

## Численное моделирование изменчивости уровня Балтийского моря\*

Е. А. Куликов

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*  
e-mail: kulikove@ocean.ru

И. В. Файн

*Институт тепло- и массообмена НАНБ, Минск, Беларусь*

The present study aims to develop an effective numerical model of Baltic Sea that will be used to carry out multi-year simulations of wind-generated sea level variations in the Gulf of Finland. Here we present some results including 1) model verification by comparing statistical characteristics of the observed and simulated time series and 2) physical analysis of the observed statistical characteristics of sea surface variability. A wind-driven 2D version of the Princeton Ocean Model (POM) has been developed and tested for the Baltic Sea. Its horizontal resolution is  $(\Delta x, \Delta y) = (1852, 3704)$  m ( $2' \times 2'$ ). We adopted a forcing mechanism of uniform wind that is randomly changing in time, with zero mean and standard deviation of 3 m/s. This approach is similar to the well known Monte-Carlo method. This simple statistical model allows studying resonant sea-level response that is related to seiche modes in the Baltic Sea. Spectra of simulated sea level records demonstrate a clear peak with a period of 27–29 hours, a well-known period of a natural oscillation mode for the Baltic Sea.

### Введение

Изменчивость уровня Балтийского моря определяется прежде всего воздействием ветра на свободную поверхность и изменениями атмосферного давления. Согласно [1], приливные колебания невелики, они равны 1...2 см для волновых составляющих  $M_2$  и  $K_1$ , и только в районе проливов, соединяющих Балтийское море с Северным, их амплитуды достигают 4...5 см. Фактически акватория Балтийского моря является замкнутым бассейном, при этом водный обмен через юго-западные мелководные проливы существенно влияет лишь на долгопериодные вариации уровня ( $\geq 10$  сут.). Очевидно, что один из важных факторов, определяющих спектр колебаний уровня, — это частотно-избирательные свойства акватории, обусловленные геометрией берега и батиметрией. Доминирующие собственные колебания Балтийского моря имеют период около 27 ч [2]. Структура этой моды такова, что вершина ее приходится на акваторию Финского залива. Поэтому естественно предположить, что при формировании штормовых нагонов в Финском заливе (в частности, петербургских наводнений) частотно-избирательные свойства бассейна играют важную роль [3].

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке программы НАТО “Science for Peace” (грант SfP 981382)

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2008.

В настоящей статье приводятся результаты численного моделирования колебаний уровня Балтийского моря, возбуждаемых воздействием ветра на свободную поверхность океана, задаваемого в виде случайной функции времени. В данном подходе использование метода Монте-Карло при анализе характера спектральных характеристик модельных рядов колебаний уровня позволяет лучше понять роль резонансного механизма в формировании экстремальных отклонений уровня в Финском заливе.

## 1. Спектр уровня Балтийского моря

Спектр Балтийского моря достаточно хорошо изучен. Еще в 1960-е годы Магаард и Краус [1] описали спектр уровня Балтийского моря по данным 35 береговых мареографов.

Были выделены основные приливные пики  $M_2$  (12.42 ч),  $S_2$  (12.00 ч),  $K_1$  (23.93 ч) и  $O_1$  (25.82 ч). В работе [4] наличие этих приливных гармоник подтверждено данными по нескольким станциям, расположенным на финском побережье. Однако, как и в предыдущем исследовании, авторам не удалось выделить значимых пиков, связанных с

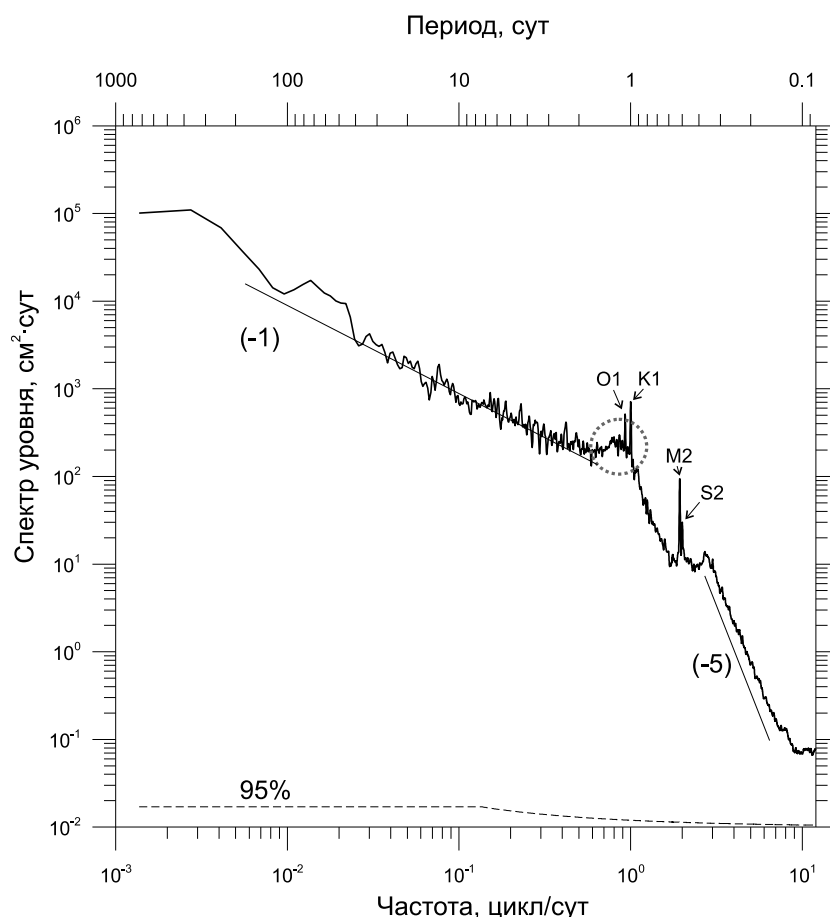


Рис. 1. Спектр колебаний уровня моря, рассчитанный для ряда ежечасных значений уровня в Санкт-Петербурге (Горный институт) за период 1977–2004 гг. Штриховой окружностью отмечен пик в спектре, связанный с резонансной сейшевой модой. Тонкие прямые линии показывают уклон спектра, а в скобках указана степень убывания с частотой  $f^{-n}$ . Штриховой линией в нижней части рисунка отмечен 95%-ный доверительный интервал

основными сейшевыми колебаниями в Балтийском море (27...29 ч). “Отсутствие” выраженного максимума в спектрах, обусловленного резонансными свойствами акватории, можно объяснить тем, что наиболее ярко эти колебания будут проявляться лишь в вершине моды, в частности в Санкт-Петербурге. На рис. 1 приведен спектр колебаний уровня за период 1977–2004 гг., рассчитанный по ряду ежечасных наблюдений уровня моря вблизи Горного института (Санкт-Петербург). Кроме приливных пиков на спектре хорошо заметен широкий максимум с периодом 27...29 ч (выделен штриховой окружностью). В низкочастотной части ( $T > 2$  сут.) спектр носит сравнительно равномерный характер. Скорость спада энергии колебаний с частотой характеризуется законом  $f^{-1}$ , где  $f$  — частота спектральной гармоники. В высокочастотной части ( $T < 3$  ч) спектральная энергия спадает гораздо быстрее, примерно как  $f^{-5}$ .

## 2. Численное моделирование колебаний уровня Балтийского моря, вызываемых случайными вариациями поля ветра

При моделировании колебаний свободной поверхности моря с периодами 0.01...10 сут., таких как приливы, сейши, штормовые нагоны, обычно используется приближение мелкой воды и, соответственно, решаются уравнения движения жидкости, интегрированные по вертикали. В настоящем исследовании использована 2D-версия известной модели ROM-Princeton Ocean Model [5]. Вынуждающая сила задавалась в виде касательного напряжения ветра:

$$(\tau_x, \tau_y) = \rho_A C_D |\mathbf{U}_W| (U_W, V_W), \quad (1)$$

где  $\mathbf{U}_W$  — скорость ветра,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\rho_A = 1.03 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $C_D = 0.0008 + 0.000065 \mathbf{U}_W$  [6].

Диссипация энергии возникающих течений обусловлена процессами, связанными с вертикальной турбулентной вязкостью. В уравнениях движения сила трения определяется величиной модуля скорости придонного течения и коэффициентом трения  $C_b$ :

$$(\tau_{bx}, \tau_{by}) = (C_b u_b |\mathbf{u}_b|, C_b v_b |\mathbf{u}_b|), \quad (2)$$

где  $\mathbf{u}_b = (u_b, v_b)$  — скорость течения выше придонного пограничного слоя (для двумерной модели полагается равной баротропной скорости  $\mathbf{u}$ ).

В данном случае мы пренебрегаем эффектом утечки волновой энергии через узкие проливы, соединяющие Балтийское море с Северным морем. Предполагается, что затухание сейшевых колебаний в бассейне полностью определяется диссипацией волновой энергии на мелководье. В модели использовались данные о батиметрии Балтийского моря GEBCO с разрешением  $1' \times 1'$  (по широте и долготе). Расчеты выполнялись на сетке с разрешением  $\Delta x = 1852 \text{ м}$  и  $\Delta y = 3704 \text{ м}$  ( $2' \times 2'$ ). При численном анализе частотно-избирательных свойств акватории часто используется расчет частотной характеристики колебаний в исследуемой акватории — амплитуды отклика уровня моря на гармоническое воздействие с заданным периодом.

Другой способ использован в работе [4]: резонансные свойства Балтийской акватории рассчитывались по частотному спектру колебаний уровня, возникающих в бассейне как результат реакции на неравновесное начальное условие — поднятие уровня моря на 1 м в Санкт-Петербурге и опускание на 1 м в районе пролива Скагеррак. При этом расчет колебаний выполнялся в течение 480 ч.

В данной работе расчет резонансных свойств акватории Балтийского моря (в частности, Финского залива) выполнялся методом Монте-Карло. Воздействие атмосферы на поверхность моря (касательное напряжение ветра) задавалось в виде однородного по пространству ветра, меняющего ежедневно направление и силу случайным образом, так что  $\langle W_x \rangle = \langle W_y \rangle = 0$ ,  $\sqrt{\langle W_x^2 \rangle} = \sqrt{\langle W_y^2 \rangle} = 3$  м/с, где  $W_x$  и  $W_y$  — зональная и меридиональная составляющие ветра. Такой модельный подход, рассматривающий вынуждающую силу в виде однородного и случайно-изотропного касательного напряжения на поверхности жидкости, гораздо ближе к реальным условиям формирования сейшевых колебаний уровня в Балтийском море.

Для оценки времени инициализации модели выполнены расчеты реакции уровня моря на “ступенькообразное” изменение ветра. На рис. 2 приведены графики изменения уровня моря в Санкт-Петербурге в результате внезапного “включения” постоянного ветра силой 3 м/с северного, восточного, южного и западного направлений. Полученные модельные записи уровня носят характер затухающих колебаний с периодом около 27...29 ч. Время адаптации можно оценить примерно в 6 сут. Скорость затухания колебаний характеризует добротность основной сейшевой моды, доминирующей в Финском

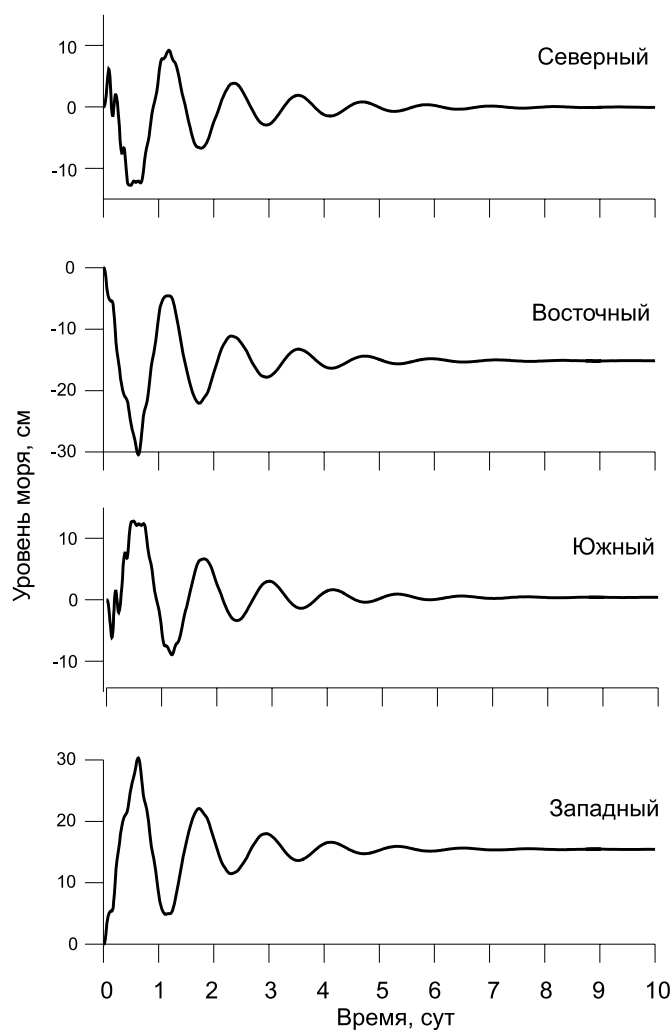


Рис. 2. Модельные расчеты колебаний уровня моря, вызванные внезапным “включением” ветра силой 3 м/с северного, восточного, южного и западного направлений для Санкт-Петербурга

заливе. Значение добротности  $Q$  можно оценить, подсчитав количество периодов колебаний осциллятора, необходимых для того, чтобы амплитуда уменьшилась в  $e$  раз. Из графиков видно, что эта величина составляет  $Q \approx 4$ .

Интересно отметить величину сгонов и нагонов, образующихся при постоянном восточном и западном ветрах. Зональный ветер  $W_x = \pm 3$  м/с вызывает изменение уровня около  $\pm 15$  см в Санкт-Петербурге.

Модельные расчеты колебаний уровня моря, вызываемых случайным воздействием ветра, выполнялись для периода времени 1 год. Полученные записи уровня моря в различных точках побережья подвергались затем спектральному анализу. На рис. 3 приведен пример расчета спектра ряда ежечасных значений уровня моря для Санкт-Петербурга (штриховая линия), а для сравнения на график помещен спектр уровня, вычисленный по данным наблюдений. На модельном спектре хорошо выделяется пик с периодом около 30 ч. Этот же пик прослеживается и на спектре, рассчитанном по данным наблюдений. При этом величины пика существенно различаются: для модели максимальное значение превышает средний уровень спектра более чем в 30 раз, а для наблюдений эта величина составляет около 2. Это объясняется прежде всего тем, что наблюдаемые колебания уровня не являются "чистым" откликом на ветровое воздействие. Значительная часть спектральной энергии колебаний уровня моря обусловлена

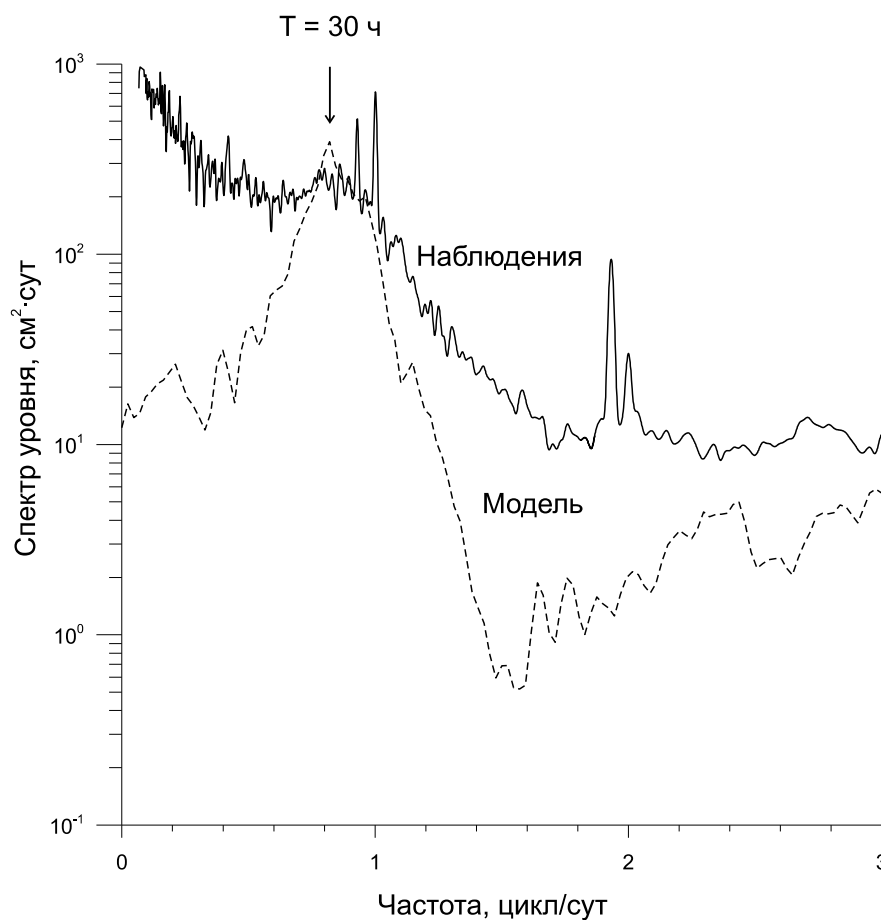


Рис. 3. Сравнение спектров колебаний уровня моря, полученных по модельным расчетам и натурным наблюдениям. Стрелкой отмечен основной пик в спектре ( $T = 30$  ч)

реакцией на изменения атмосферного давления (закон обратного барометра), не учитываемые в модели. Впрочем, и само представление вынуждающей силы в виде “белого шума” является сильным упрощением. В реальности спектр вариаций напряжений ветра носит характер “красного шума” — спектральная энергия спадает с частотой.

Наиболее интересные результаты получены из взаимного спектрального анализа модельных и наблюдаемых записей колебаний уровня моря в различных пунктах побережья Финского залива. На рис. 4 представлены когерентность и фазовый спектр, рассчитанные для пары станций Нарва — Таллинн. Ко-спектральные оценки рассчитаны для синхронных ежечасных наблюдений уровня моря в этих пунктах за период 1978–1982 гг. На низких частотах (0–1 цикл/сут.) наблюдается высокая когерентность колебаний, далее она резко падает и достигает 0 примерно на частоте 1.6 цикл/сут. и выше 2 цикл/сут. снова возрастает. Характер изменения когерентности с частотой для модельных и наблюдаемых записей совпадает.

Уменьшение когерентности объясняется тем, что волновое поле стоячих волн на частоте 1.6 цикл/сут. таково, что узел оказывается расположенным в районе Таллинна и в результате в этих двух пунктах колебания оказываются несвязанными (статистически независимыми). Это подтверждается и расчетами фазового спектра. Величины фазового спектра для модельных и наблюдаемых пар записей уровня моря оказываются весьма близки, за исключением небольшого диапазона частот в районе 1.6 цикл/сут., где когерентность падает до нуля. На частоте выше 1.6 цикл/сут. разность фаз колебаний уровня в Нарве и Таллинне испытывает скачок на  $180^\circ$ , т. е. колебания уровня в этих двух пунктах оказываются в противофазе. Следует отметить, что в диапазоне частот 0–1.5 цикл/сут. колебания уровня в Таллинне опережают по фазе колебания уровня в Нарве. Набег фазы примерно соответствует разности фаз, образующейся для бегущей гравитационной волны, распространяющейся внутрь Финского залива. Это означает, что в спектре колебаний уровня в Финском заливе преобладают волны, пришедшие извне. Эту несбалансированность потоков волновой энергии падающих и отраженных

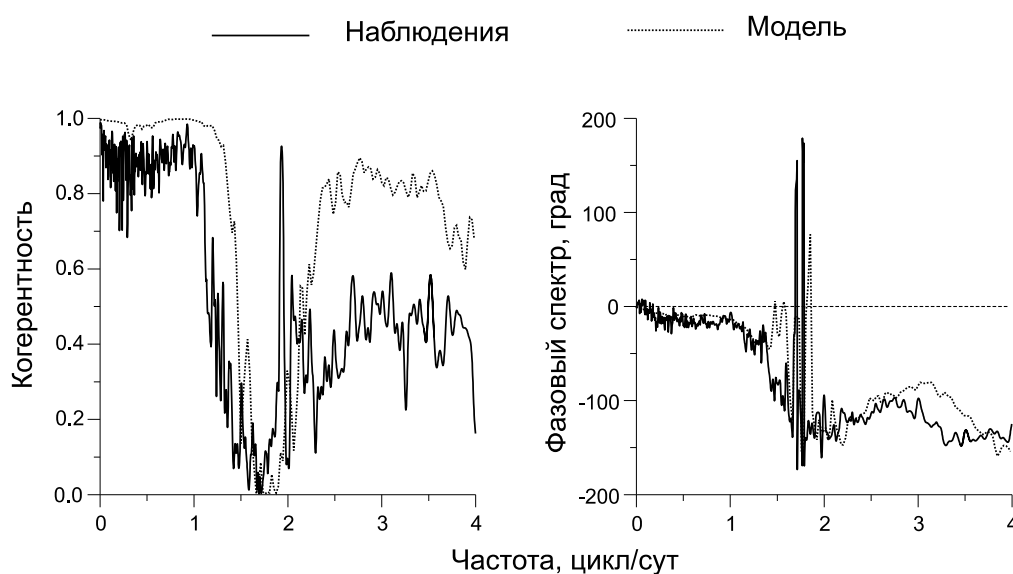


Рис. 4. Функции когерентности и фазы, рассчитанные для пары станций Нарва — Таллинн, для наблюдаемых ежечасных рядов уровня (1978–1982 гг.)

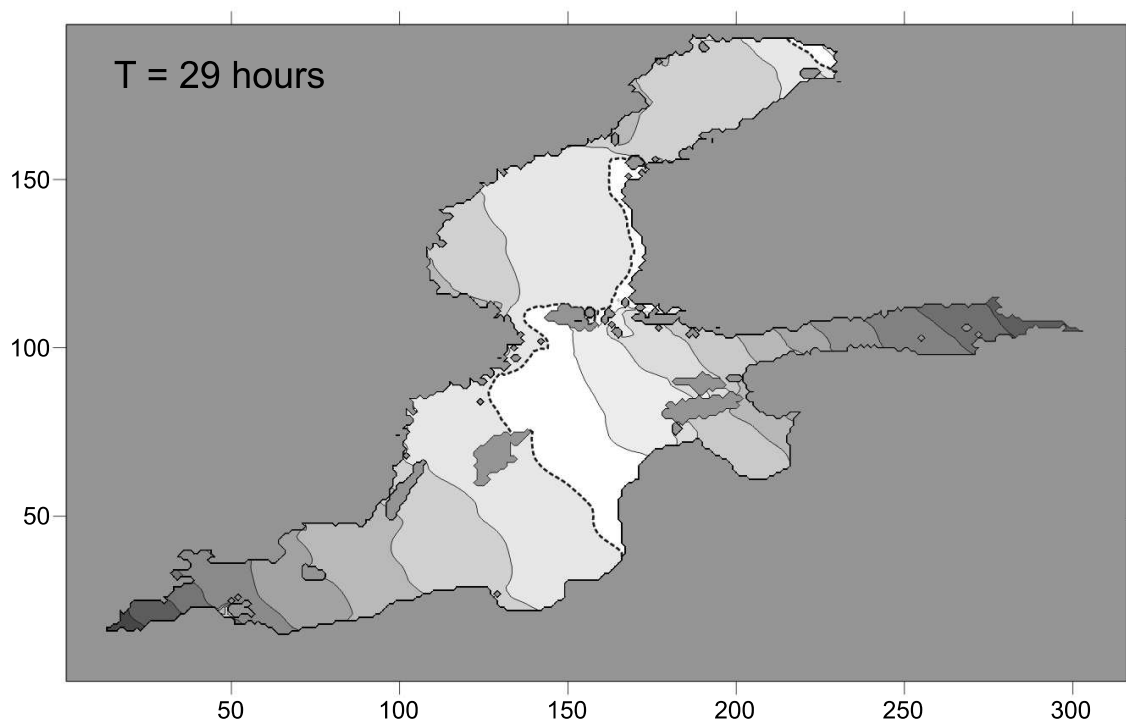


Рис. 5. Пространственная структура собственных колебаний Балтийского моря, рассчитанная для периода сейши  $T = 29$  ч

волн можно объяснить эффектом диссипации волновых течений в мелководной части залива восточнее Таллинна. Совпадение значений фазовых спектров для модельных и наблюдаемых записей уровня моря свидетельствует о правильно выбранных параметрах диссипативных членов в численной модели.

Пространственная структура собственных колебаний Балтийского моря представлена на рис. 5. Расчет выполнялся для спектральных компонентов модельных записей уровня на частоте 0.83 цикл/сут. ( $T = 29$  ч) в каждом узле расчетной сетки.

## Выводы

Использование метода Монте-Карло в численном моделировании частотно-избирательных свойств морских акваторий представляется физически обоснованным. Характер воздействия атмосферы на поверхность океана по своей природе близок к случайному, и поэтому получаемые модельные частотные характеристики, связывающие вынуждающую силу (ветровое поверхностное напряжение) и отклик уровня моря, оказываются близки к характеристикам, полученным в результате измерений. В частности, удается объяснить эффект опережения по фазе колебаний уровня моря для станций, расположенных ближе к выходу Финского залива, по отношению к колебаниям на “внутренних” станциях. Наибольший интерес представляет изучение роли резонансного механизма возбуждения аномальных колебаний уровня и формирования наводнений на побережье Финского залива. Дальнейшее развитие изложенного подхода заключается в более точном воспроизведении ветрового спектра, а также в учете изменений атмосферного давления.

## Список литературы

- [1] MAGAARD L., KRAUSS W. Spektren der Wasserstandsschwankungen der Ostsee im Jahre 1958 // Kieler Meeresforsch. 1966. Bd. 22. S. 155–162.
- [2] WUBBER C., KRAUSS W. The two-dimensional seiches of the Baltic Sea // Oceanologia Acta. 1979. Vol. 2. P. 435–446.
- [3] LISITZIN E. Unimodal seiches in the oscillation system Baltic proper, Gulf of Finland // Tellus. 1959. Vol. 4. P. 459–466.
- [4] JÖNSSON B.J., DÖÖS K., NYCANDER J., LUNDBERG P. Standing waves in the Gulf of Finland and their relationship to the basin-wide Baltic seiches // J. Geophys. Res. (in press) 2007.
- [5] MELLOR G.L. Users Guide for a Three-dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton Univ., Princeton. 2004. NJ 08544-0710. 56 p.
- [6] WU J. Wind stress and surface roughness at air-sea interface // J. Geophys. Res. 1969. Vol. 74. P. 444–455.

*Поступила в редакцию 14 марта 2008 г.*