

Ю.Н.Горячкин, В.А.Иванов, Л.Н.Репетин, Т.В.Хмара

СЕЙШИ В СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЕ

Изложены результаты исследований сейшевых колебаний уровня воды в полузамкнутой бухте, выполненных на основе натурных учащенных (автоматизированных) измерений уровня, атмосферного давления и ветра, а также с использованием численной гидродинамической модели с реальным рельефом дна. Определены спектральные характеристики, экстремальные значения, выполнен анализ физических механизмов генерации сейш в Севастопольской бухте.

Вступление

Несмотря на то, что сейши являются одним из самых распространенных видов колебаний уровня в Черном море, изучены они до настоящего времени недостаточно. Из обширной библиографии по изучению уровня Черного моря, только в нескольких публикациях, в той или иной степени, рассматриваются отдельные результаты изучения сейшевых колебаний. Большая часть работ представляет собой теоретические исследования, в которых, главным образом, рассматриваются сейши, охватывающие всю акваторию моря [1-3, 10-12, 17-20]. Теоретические оценки показывают, что особенности конфигурации береговой линии и рельеф дна могут оказывать значительное влияние на формирование спектра собственных колебаний бассейна. В Черном море могут наблюдаться одноузловые сейши с периодами 9,7 и 6,9 ч, двухузловые – с периодами 5,6 и 4,6 ч и многоузловые сейши с периодами 2,7 и 2,4 ч [2].

В бухтах и заливах Черного моря сейши изучены также совершенно недостаточно. Вместе с тем, здесь амплитуды сейш могут превышать амплитуды сезонных колебаний и быть сопоставимыми с амплитудами сгонно-нагонных колебаний уровня. Относительно хорошо изучены сейши в заливах болгарского побережья [9]. Отдельные сведения о натурных

характеристиках сейш содержатся в [4-8]. Наиболее подробное описание статистических характеристик на северном побережье Черного моря содержится в [15]. Там же отмечается, что в Севастополе наибольший период сейш – 1 ч 30 мин, наименьший – 5 мин, при этом максимальная величина сейш может достигать 40 см, повторяемость сейш с размахами 5-10 см составляет 25-30 суток в месяц и наблюдаются они в течение всего года.

Сейши, которые приводят в движение всю массу воды водоема, не могут не влиять на его гидрологический режим. Основным механизмом такого влияния являются течения, которые имеют периодический характер и соответствуют периоду сейш. При этом сейшевые течения могут иметь очень высокие скорости, резко возрастающие в прибрежных районах. Так, в [8] приводятся измеренные скорости сейшевых течений на шельфе Южного берега Крыма величиной до 70 см/с. Движения водных масс сейшевого происхождения неоднократно наблюдались в различных озерах, у побережий, в заливах и проливах, при этом скорости в узкостях достигали 2,7 м/с [11]. Движения массы воды, связанные с сейшами, неизбежно должны приводить к перемешиванию и выравниванию по вертикали температуры, солености, содержания кислорода и растворенных веществ. Еще большее влияние на гидрологический режим должны оказывать внутренние сейши, поскольку их амплитуда значительно больше. Уникальные по скорости течения, связанные с внутренней сейшей, наблюдались в районе Сочи в 1966 г. Скорость этого течения в придонном слое достигала 3 м/с [13]. В полузамкнутой, сильно вытянутой Севастопольской бухте, со слабым водообменом с открытым морем движения вод, связанные с сейшами, могут оказывать существенное влияние на динамические процессы, гидрологический и гидрохимический режимы и, следовательно, на её экологическое состояние.

Использованные материалы

Одной из причин слабой изученности сейшевых колебаний уровня является трудоемкость ручной обработки лент мареографов и практическая невозможность получения на их основе достоверной цифровой информации о высокочастотных колебаниях уровня моря. В 2001 г. на морской гидрометеорологической станции (МГ) Севастополь, расположенной на берегу Севастопольской бухты (м. Павловский), был установлен цифровой регистратор, который с помощью магнитной муфты

соединен с барабаном стандартного поплавкового мареографа СУМ. Цифровые данные измерений уровня с любой дискретностью вводились в компьютер в реальном масштабе времени, оперативно обрабатывались и накапливались в банке данных. В работе использованы ленты мареографа СУМ и цифровые данные измерений уровня моря (дискретность 5 мин.) с апреля 2001 г. по сентябрь 2002 г. В мае 2002 г. на этой же станции был установлен автоматизированный метеокomплекс, поэтому, наряду со стандартными метеорологическими наблюдениями с дискретностью 3 ч, привлекались данные автоматизированных измерений ветра и атмосферного давления (дискретность 5 мин.). Метеорологические измерения (автоматизированные и стандартные) производились на метеоплощадке, уровенные – в колодце мареографа и на водомерном посту.

Анализ данных наблюдений

В период с апреля 2001 г. по апрель 2002 г. годовой ход колебаний уровня имел типичный вид, с максимумом в конце весны – начале лета и минимумом осенью (рис.1). Общий размах – 23 см, на 8 см больше среднегодовое значения (15 см) и близок к максимальному за весь период наблюдений (26 см) [15]. В течение указанного периода измерений, максимальная амплитуда сгонно-нагонных колебаний составила 18-34 см, сейшевых – 10-24 см (рис.2). Из этого рисунка видно,

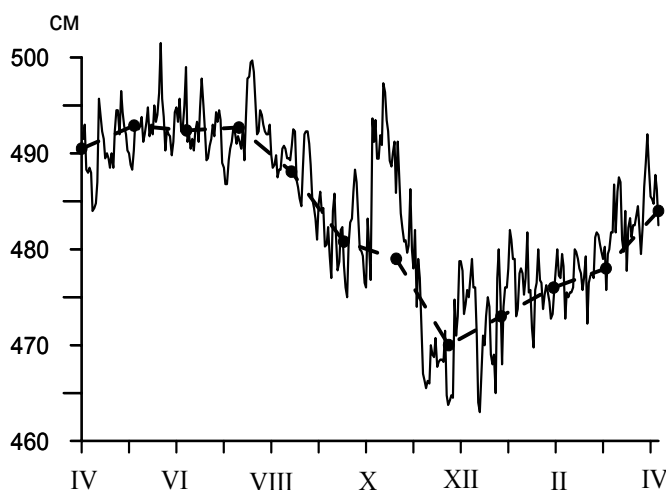


Рис.1. Среднемесячные (пунктир с точкой) и среднесуточные (сплошная) значения уровня на МГ Севастополь (2001-2002 гг.)

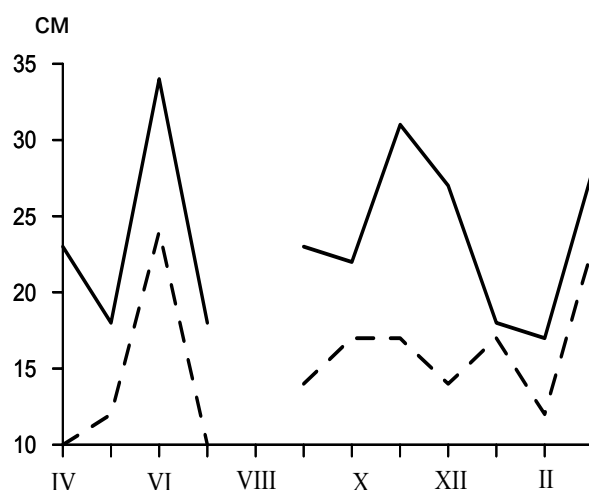


Рис.2. Максимальные размахи сгонно-нагонных (сплошная) и сейшевых (пунктир) колебаний уровня (2001-2002 гг.)

что в периоды максимальных сгонно-нагонных колебаний отмечены максимальные значения амплитуды сейш и наоборот, причем максимальные колебания сейш сопоставимы с сгонно-нагонными изменениями уровня и составляют 45-95 % последних. Для выделения энергонесущих частот в высокочастотной области были рассчитаны спектральные характеристики колебаний уровня моря по наиболее продолжительным непрерывным реализациям. Пример такого спектра, рассчитанного по 90 суточной реализации за период со 2 мая по 30 июля 2001 г., приведен на рис.3. В высокочастотной области спектра выделяются колебания приливного периода, полусуточной и суточной составляющей, причем размах полусуточных колебаний (3-4 см) больше, чем суточных (1-2 см). На всех спектрах статистически значимо выделяются колебания с периодами 0,9; 1,25 и 2,5 ч, которые характерны для сейш. Чтобы определить, насколько выделенные периоды сейшевых колебаний уровня стабильны во времени, были рассчитаны спектры для месяцев, в которых отсутствовали пропуски в рядах наблюдений. Оказалось, что энергонесущие частоты сейш стабильны во времени, по крайней мере, на масштабах месяца (рис. 4). Спектры отличаются только величиной энергии, причем наибольшая изменчивость характерна для сейш с периодом 1,25 ч (до 7 дБ), наименьшая – для 2,5 ч (до 5 дБ). При этом оказалось, что максимальной энергии сейш с периодом 2,5 ч в данном месяце не обязательно соответствует максимум энергии на других частотах.

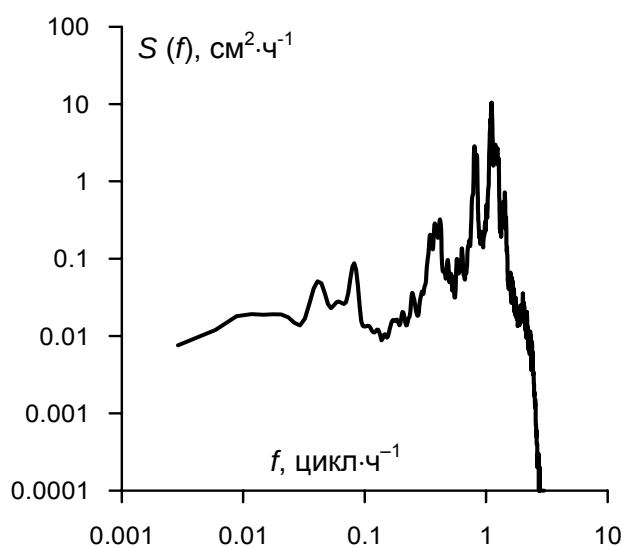


Рис.3. Спектр колебаний уровня моря в Севастополе (02.05-30.07.2001 г.)

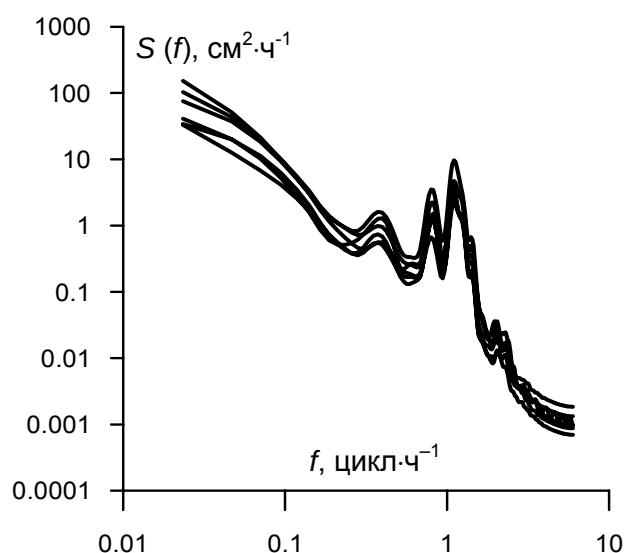


Рис.4. Спектры колебаний уровня моря в Севастополе 2001-2002 гг.

Для оценки характера изменчивости энергии сейшевых колебаний во времени, были рассчитаны текущие энергетические спектры. При этом ряды разбивались на отрезки длиной в 1 сутки, перекрытие отрезков (сдвиг) составляло 50 %. Таким образом, была оценена изменчивость энергии сейшевых колебаний на масштабах не менее 0,5 суток. Текущие временные спектры показали наличие существенной временной перемежаемости энергии сейшевых колебаний, т.е. наличие периодов времени с относительно невысокой энергией и периодов резкого её всплеска. На рис.5 показаны спектры и реализации в периоды резкого увеличения энергии и “фоновых” колебаний. При интенсификации сейшевых колебаний их амплитуды достигают 20 см и более, а у “фоновых” сейш обычно не превышают 3-5 см. При усилении колебаний их частота становится более стабильной во времени, а колебания с периодом 2,5 ч исчезают. Для теплого сезона (2 мая – 30 июля 2001 г.) по текущему спектру была рассчитана изменчивость энергии сейш с периодами 0,9 и 1,25 ч. При этом определялась средняя энергия для периода 0,9 ч в полосе частот, соответствующих периодам 0,85-1,0 ч, а для периода 1,25 ч соответственно 1,2-1,3 ч. Такая процедура была необходима, поскольку частота колебаний не стабильна во времени и это может занижать оценку общей энергии. Анализ показал, что колебания с

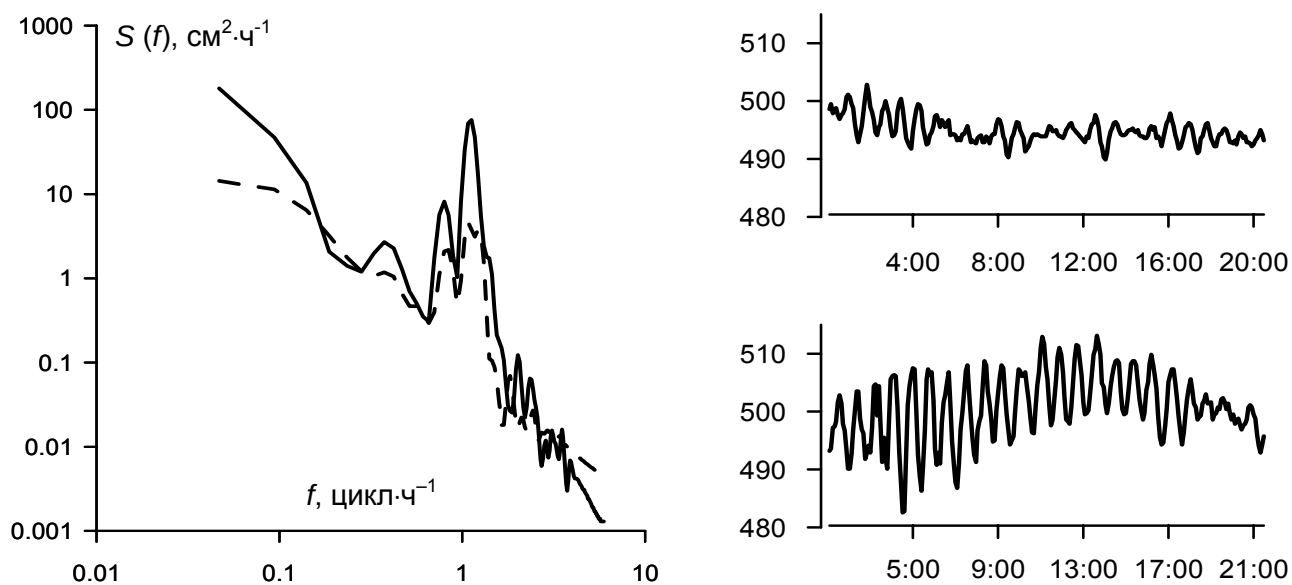


Рис.5. Слева – спектры колебаний уровня моря в период интенсивных сейшевых колебаний (сплошная) и “фоновых” (пунктир); справа – примеры реализации в период “фоновых” (вверху) и интенсивных (внизу) сейшевых колебаний

периодом 0,9 и 1,25 ч мало связаны друг с другом, коэффициент корреляции составляет 0,5. В отдельные периоды времени увеличения энергии в обоих частотных диапазонах совпадают, в другие замечен некоторый сдвиг, а в периоды ослабления сейшевых колебаний синхронного увеличения или уменьшения энергии обоих частотных диапазонов не отмечается. Для холодного сезона (февраль – март 2002 г.) получены аналогичные результаты.

Для визуальной оценки связи моментов появления интенсивных сейш и атмосферных воздействий из всего ряда наблюдений были отобраны участки записи, где размах сейш превышал 10 см. Таких записей за годовой цикл оказалось шесть. В трех случаях непосредственно возникновению интенсивных сейш предшествовало резкое понижение давления, в трех других – повышение давления. Не отмечалось однозначной связи и с изменениями скорости и направления ветра. В четырех случаях действовал северо-восточный ветер, в двух – противоположный ему юго-западный, причем скорость его была в пяти случаях более 10 м/с, а в одном случае незначительной.

Просмотр всей годовой реализации изменения давления и ветра с дискретностью 3 ч показал, что одни и те же по величине изменения в одних случаях приводят к появлению интенсивных сейш, а в других – нет. Более информативными оказались записи метеоэлементов с дискретностью 5 мин. Оказалось, что основным фактором, который стимулирует развитие цугов сейшевых колебаний, является резкие изменения тенденции атмосферного давления: увеличение (уменьшение) интенсивности падения (роста) или резкое изменение роста на падение (или падения на рост). Последнее вызывает наиболее интенсивные колебания и максимальную амплитуду сейш. Изменения давления, вызывающие интенсивные сейши, могут сопровождаться штормовым ветром южного или западных (ЮЗ, З, СЗ) направлений и общим подъемом уровня в результате нагона. Характерный пример, подтверждающий сказанное, приведен на рис.6. Из него видно, что кратковременные изменения давления приводят к увеличению энергии сейшевых колебаний, а более длительные, хотя и бóльшие по величине, нет. Напротив, для интенсификации сейш необходимо не кратковременное усиление ветра, а достаточно продолжительное (порядка 4-5 ч) его действие. Причем в Севастопольской бухте наиболее эффективны направления сильных ветров, приводящие к нагону или сгону воды.

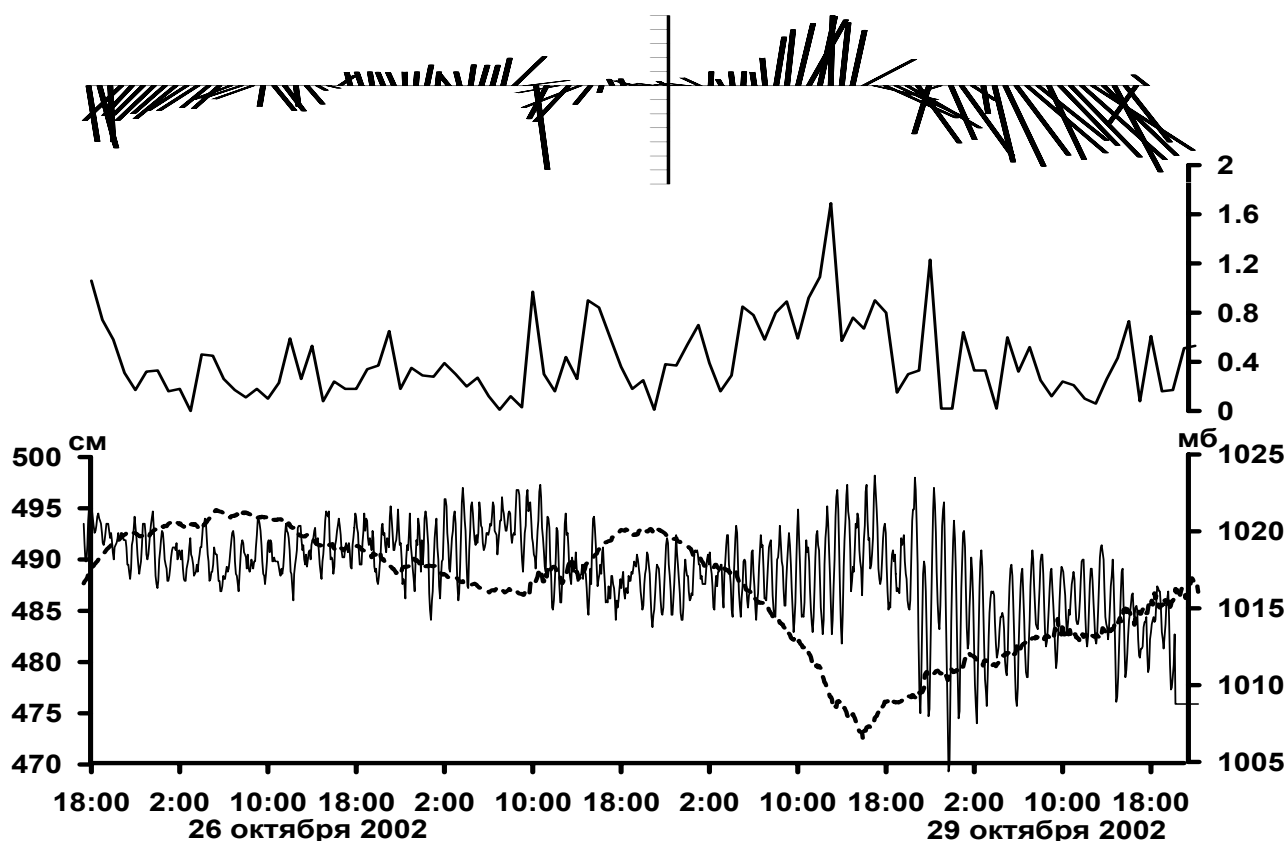


Рис.6. Колебания уровня моря (сплошная) и давления (жирный пунктир) 26-29 октября 2002 г. Вверху вектора среднечасового ветра, одно деление шкалы – 2 м/с; средняя кривая – почасовые градиенты давления

Еще в начале XX в. была подмечена связь высокочастотных колебаний уровня с атмосферными воздействиями. Вот как описывается один из таких уникальных случаев, датированный 25 августа 1911 г. [16]: “...Утром прошла гроза над Севастопольской бухтой, в 11.20 утра давление с 761,1 мм понизилось на 6 мм, к 12.30 оно снова повысилось до 761,0; затем стало плавно уменьшаться до 3 ч, а после – так же плавно увеличиваться. Резкое убывание давления в 11 ч утра дало толчок уровню, и он начал колебаться. В 11.15 уровень был на высоте 45 см, через 15 мин. снизился до 15 см, затем поднялся до 58 см и потом упал до 0 см и продолжал совершать колебания с периодом около 50-60 мин. Такая амплитуда колебаний в 58 см редко достигается в Севастополе; за целый ряд наблюдений подобной не было замечено.”

В описанном выше случае колебание давления с размахом 8 мб в течение 2-3 ч дало размах сейши в 58 см. В случае, отмеченном на рис.6, колебание давления (10-11 июня) с размахом 5 мб в течение 7-8 ч дало

размах сейши до 17 см. Как видим, количественная связь между кратковременным изменением атмосферного давления и амплитудой сейши близка к линейной. Отсюда понятно, почему использование рядов давления с дискретностью 3 ч не дает однозначной связи.

Положение поста наблюдений за уровнем в Севастополе близко к узловой линии продольных сейш для Северной и Южной бухт. Поэтому следует ожидать, что в вершинных частях бухт амплитуда сейш должна быть значительно больше, чем на м.Павловском, где расположен пост. Косвенное подтверждение этому мы нашли в воспоминаниях капитана НИС “Трепанг” О.П.Чмыхуна [14]. В них он отмечает, что 26 мая 1994 г. в период с 12 ч до 12 ч 30 мин в Большом Инкерманском ковше наблюдались кратковременные подъемы уровня воды, размахом до 1,5 м, которые заливали причал. Запись об этом занесена в судовой журнал.

В рамках классической теории свободных колебаний жидкости в замкнутых бассейнах получены решения для узкого класса задач, описывающих сейши водоемов простейших геометрических форм. Наиболее простым представляется определение параметров свободных колебаний жидкости в замкнутом водоеме с прямоугольным сечением. Если водоем имеет прямоугольную форму длины L и глубины H , то период T , с которым в нем будут происходить одноузловые сейши, можно оценить по известной формуле Мериана. Такая оценка, исходя из геометрических размеров бухт – Северная: длина 6,5 км, средняя глубина 17 м, Южная: длина 3,3 км, средняя глубина 15 м – показывает, что период собственных колебаний в Южной бухте должен составлять около 10 мин, в Северной – около 15 мин. Как видно, модель с постоянным рельефом не описывает колебания, существующие в Севастопольской бухте. Поэтому нами была использована модель с реальным рельефом. Решение этой задачи позволяет получить не только периоды колебаний, но и пространственную структуру баротропных сейш. В общем случае такие колебания представляют собой затухающие волны с периодом, определяемым главным образом морфометрическими характеристиками бассейна, а также, но в гораздо меньшей степени, трением и силой Кориолиса. Важным моментом является то, что модель описывает особый класс движений – нулевую моду, или моду Гельмгольца, которая характерна только для сейш полузамкнутых акваторий.

Постановка задачи и метод численного решения подробно обсуждался в [2]. Чтобы получить качественную картину возможных

длинноволновых движений, рассмотрим линейные уравнения мелкой воды (приближение гидростатики) на f -плоскости в терминах полных потоков:

$$\begin{aligned} \partial U / \partial t - fV &= gH \partial \xi / \partial x; \\ \partial V / \partial t + fU &= -gH \partial \xi / \partial y; \\ \partial \xi / \partial t + \partial U / \partial x + \partial V / \partial y &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь U, V – составляющие полного потока; H – глубина моря в точке (x, y) от невозмущенной поверхности моря $z = 0$; ξ – отклонение свободной поверхности от невозмущенного состояния; $f = 2\Omega \sin \varphi$ – параметр Кориолиса, где Ω – угловая частота вращения Земли, φ – широта. Граничные условия: на берегу $\partial \xi / \partial n = 0$; на открытой границе $\xi = 0$, n – нормаль к берегу.

Решение будем искать в виде гармонических функций по времени:

$$\begin{bmatrix} U(x, y, t) \\ V(x, y, t) \\ \xi(x, y, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U(x, y) \\ V(x, y) \\ \xi(x, y) \end{bmatrix} \cdot e^{-i\omega t} \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), отфильтровав волновые моды, возникающие вследствие вращения Земли, и приняв $f = 0$, получаем

$$\begin{aligned} i\omega U &= gH \partial \xi / \partial x; \\ i\omega V &= -gH \partial \xi / \partial y; \\ \partial U / \partial x + \partial V / \partial y &= i\omega \xi. \end{aligned} \quad (3)$$

Дифференцируя первое уравнение по x , а второе – по y и подставляя их в третье, получим:

$$\nabla(H\vec{G}) = \lambda \xi, \quad (4)$$

где $\vec{G} = (\partial \xi / \partial x, \partial \xi / \partial y)$, $\lambda = -\omega^2 / g$. Уравнение (4) представляет собой традиционную задачу на собственные значения. Частота колебаний баротропных сейш находится по формуле:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} = \frac{\sqrt{-g\lambda_i}}{2\pi}, \quad (5)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$.

Решение будем искать в виде гармонических функций по времени. Задача на собственные значения не дает абсолютных величин колебаний уровня поверхности из-за отсутствия вынуждающих сил. Тем не менее, этот метод позволяет получить относительные амплитуды колебаний

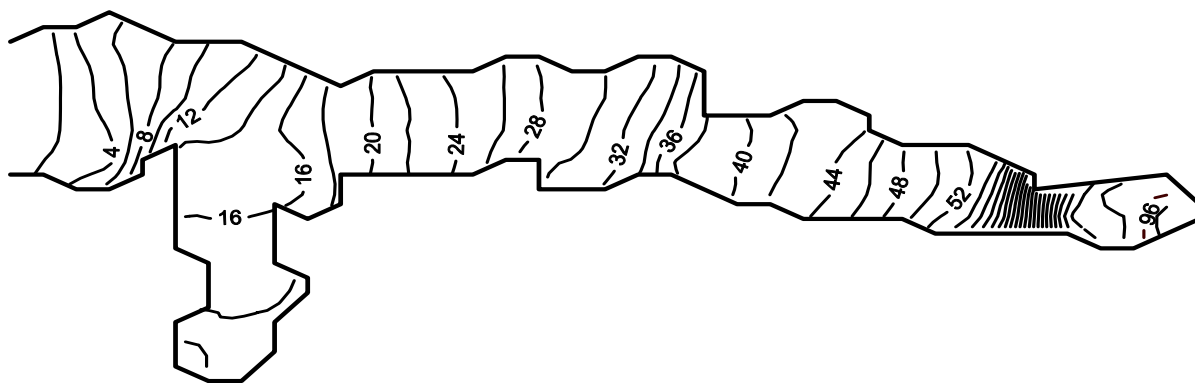


Рис.7. Пространственная структура баротропной сейши нулевой моды в Севастопольской бухте. Цифрами показаны относительные амплитуды колебаний

уровня моря на различных частотах, которые имели бы место при наличии вынуждающих сил. Параметры расчетной сетки, используемой для изучения сейшевых колебаний в бухте, были выбраны следующими: шаг по x и по y 200 м. Рельеф дна задавался реальным, неоднородности рельефа меньше шага сетки не учитывались. Результаты численного моделирования показали, что наибольший период баротропной сейши (нулевая мода) в бухте равен 50 мин, т.е. полностью совпадает с существующей реально. Для нее характерно возрастание амплитуд колебаний по мере удаления от жидкой границы по направлению к самой узкой, восточной части бухты. Область максимальных амплитуд колебаний уровня с этим периодом находится в вершинной части бухты (рис.7).

Как видно из рисунка, возможные амплитуды сейш здесь примерно в 5 раз могут превышать амплитуды в районе станции Севастополь. Учитывая, что нами наблюдались сейши с размахом более 20 см, а в [16] приводится величина размаха 58 см, то свидетельство капитана НИС “Трепанг” не представляется завышенным [14]. Дальнейшие исследования сейш в Севастопольской бухте должны быть направлены на накопление рядов данных с малой дискретностью и организацию поста наблюдений за уровнем в вершинных частях Севастопольской бухты.

Выводы

В Севастопольской бухте выделяются сейшевые колебания уровня с периодом 2,5; 1,25 ч и 50 мин; энергия последних наиболее значительна.

Сейши с периодом 50 мин и амплитудой 3-4 см наблюдаются практически постоянно. В отдельные моменты времени наблюдается их

резкая интенсификация, которая связана с кратковременными резкими изменениями давления или достаточно продолжительными сгонно-нагонными ветрами.

Максимальный размах колебаний уровня, связанных со сгонно-нагонными процессами, в анализируемый период составлял 18-34 см, сейшевых колебаний 10-24 см.

Годовой ход максимальных значений сгонно-нагонных и сейшевых колебаний уровня качественно схож. Размахи сейшевых колебаний для конкретных месяцев сопоставимы с размахами сгонно-нагонных колебаний уровня и составляют 45-95 % от последних.

Энергонесущие частоты сейш стабильны во времени, но отличаются величиной энергии (временная перемежаемость).

Численное моделирование баротропных сейш показывает, что наибольшие их амплитуды нужно ожидать в вершинных частях бухт.

* *

Викладено результати досліджень сейшевих коливань рівня води у напівзамкнутій бухті, виконаних на основі натурних прискорених (автоматизованих) вимірювань рівня, атмосферного тиску та вітру, а також з використанням чисельної гідродинамічної моделі з реальним рельєфом дна. Визначені спектральні характеристики, екстремальні значення, проведено аналіз фізичних механізмів генерації сейш в Севастопольській бухті.

* *

1. Архипкин В.С., Иванов В.А., Николаенко Е.Г. Моделирование баротропных сейш в южных морях // Моделирование гидрофизических процессов и полей в замкнутых водоемах и морях.— М.: Наука, 1989. — С.104-117.

2. Баклановская В.Ф., Блатов А.С., Кондрин А.Т., Чечель И.И. Результаты численного моделирования поверхностных и внутренних сейшевых колебаний // Метеорология и гидрология.— 1986.— № 6.— С. 74-81.

3. Бычков В.С., Стрекалов С.С. Морские нерегулярные волны.— М.: Наука, 1971.— 132 с.

4. Герман В.Х. Спектральный анализ колебаний уровня Азовского, Черного и Каспийского морей в диапазоне частот от одного цикла за несколько часов до одного цикла за несколько суток // Тр. Гос. океаногр. ин-та.— 1970.— Вып.103.— С. 52-73.

5. *Горячкин Ю.Н., Репетин Л.Н., Фомичева Л.А.* Особенности изменчивости уровня моря в прибрежной зоне юго-западной части Крыма // Тр. УкрНИГМИ.– 2001. – Вып.249. – С. 245 - 248.

6. *Иванов В.А., Блатов А.С.* Натурные характеристики колебаний уровня // Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря (на примере Южного берега Крыма).– К.: Наук. думка, 1992. – С. 77 - 87.

7. *Иванов В.А., Ястреб В.П.* О колебаниях уровня Черного моря // Водные ресурсы. – 1989. – С. 97 - 104.

8. *Каминский С.Т., Федосеев В.Б.* Влияние сгонно-нагонных явлений на образование сейш в Черном море // МГФИ.– 1975.– № 1.– С.210-220.

9. *Кръстева Е.* Сейшообразные колебания на морского ниво около Варненская и Бургаския залив // Проблемы географии (НРБ). – 1976.– Т.2.– №3. – С. 51 - 60.

10. *Курчатова И.В.* Сейши в Черном и Азовском морях // Изв. Центр. Гидромет. Бюро.– 1925.– Вып.4. – С. 149 - 158.

11. *Лабзовский Н.А.* Непериодические колебания уровня моря.– Л.: Гидрометеиздат, 1971.– 236 с.

12. *Марамзин В.Я.* Расчет сейшевых колебаний методом конечных элементов в бассейнах произвольной формы // Теоретические и экспериментальные исследования длинноволновых процессов.– Владивосток.– 1985.– С. 46-67.

13. *Пыркин Ю.Г., Пивоваров А.А., Хунджуа Г.Г.* О колебательных движениях воды в придонных слоях Черного моря // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.– 1968.– Т.4.– № 2.– С. 199 - 205.

14. *Тумаров А.А.* Корабли и люди. Страницы истории.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001.– 208 с.

15. *Фомичева Л.А., Рабинович А.Б., Демидов А.Н.* Уровень моря // Проект "Моря СССР". Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.IV. Черное море Вып.1. Гидромет. исслед.– СПб: Гидрометеиздат, 1991.– С. 329 - 339.

16. *Шокальский Ю.М.* Океанография.– Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1959.– 284 с.

17. *Defant A.* Die Seiches des Schwarzen Meers // Ann. Hydrogr. Marit Meteorol.– 1933.– 61, № 3.– P. 56-58.

18. *Endros A.* Die Seiches des Schwarzen und Azowschen meers und die dortigen Hubhohen der Gezeiten // Ann. Hydrogr. Marit. Meteorol.– 1924.– 52.– №2.– P. 23-41.

19. *Thorade H.* Seiches im Schwarzen und Asowschen Meer // Ann. Hydrogr. Marit. Meteorol.– 1925.– 53.– №10.– P. 234-241.

20. *Thorade H.* Untereuchungen uber die Seiches im Schwarzen Meer (Bericht uber die neuen russ) // Ann. Hydrogr. Marit Meteorol.– 1925.– 53.– №10.– P. 338-345.