

УДК 532.59;556.556.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ СЕЙШЕВЫХ КОЛЕБАНИЙ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ

© 2023 г. Ю. В. Манилюк<sup>1</sup>, \*, Д. И. Лазоренко<sup>1</sup>, \*\*, В. В. Фомин<sup>1</sup>, \*\*\*, Д. В. Алексеев<sup>1</sup>, \*\*\*\*<sup>1</sup>Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь,  
ул. Капитанская, 2, 299011 Россия

\*e-mail: uvmsev@mhi-ras.ru

\*\*e-mail: d.lazorenko.dntmm@gmail.com

\*\*\*e-mail: v.fomin@mhi-ras.ru

\*\*\*\*e-mail: d.alekseev@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 30.09.2022 г.

После доработки 23.01.2023 г.

Принята к публикации 16.02.2023 г.

На основе гидродинамической конечно-элементной модели ADCIRC исследуются различные режимы сейшевых колебаний в узкой протяженной глубоководной бухте на примере Севастопольской бухты. В качестве возмущений рассматриваются длинные волны, проникающие в бухту через ее вход. Расчеты выполнены для возмущений с периодами 2.5, 2.9 и 6.2 мин, принадлежащих собственным модам бухты с различной пространственной структурой: поперечной, продольно-поперечной и продольной соответственно. Воздействие данных возмущений приводит к генерации не только резонансных мод с периодами, близкими к периоду возмущения, но и интенсивной моды Гельмгольца, возникающей после прекращения действия возмущения и приводящей к значительному увеличению амплитуды колебаний уровня. В проведенных исследованиях сейш, вызываемых возмущениями в виде монохроматических длинных волн, приходящих из открытого моря, не удалось получить подтверждения, что наибольшую потенциальную опасность для прибрежной зоны вытянутой глубоководной бухты представляют так называемые экстремальные моды, имеющие поперечную структуру. Мода со структурой, близкой к поперечной, была сгенерирована, но ее максимальная амплитуда оказались в 2.5 раза меньше, чем у продольно-поперечной и продольной сейш. Наибольшее усиление набегающих волн отмечено для продольно-поперечной моды с периодом 2.9 мин.

**Ключевые слова:** сейши в бухтах, экстремальные моды сейш, севастопольские бухты, модель ADCIRC**DOI:** 10.31857/S0030157423060114, **EDN:** QOSMGE

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Сейши в частично замкнутых бассейнах (бухтах, заливах, гаванях), соединяющихся с морем, представляют собой особый вид движений ('harbor oscillations'). Они отличаются от сейшевых колебаний в полностью замкнутых водоемах [7, 18] тем, что обычно генерируются не за счет непосредственного воздействия внешних факторов (атмосферного давления, ветра, осадков и пр.) на внутреннюю акваторию, а за счет проникновения длинных волн из открытого моря через вход; потери волновой энергии, в основном, связаны не с процессами диссипации, а происходят за счет излучения ее через открытую границу.

Сейши в бухтах имеют периоды, близкие к собственным периодам бухты, а пространственные структуры колебаний уровня и связанных с ними сейшевых течений — к пространственным

структурам собственных функций. Определить собственные периоды и собственные функции бухты можно, решив задачу на собственные значения. При этом обычно используются два вида граничных условий. Первый, более простой [7, 18], — когда предполагается, что у входа в бухту находятся узловые линии всех собственных мод. Второй [13] позволяет учесть затухание колебаний воды в бухте за счет излучения энергии через ее вход. В работе [10] показано, что для узкой протяженной бухты разница в результатах (значения собственных периодов бухт, пространственные структуры собственных функций), полученных при использовании граничных условий излучения и узловой линии на входе в бухту, незначительна. Поэтому во многих случаях можно воспользоваться упрощенным граничным условием первого вида. Для бассейнов простой формы существуют аналитические решения [2, 18], с помо-

стью которых можно найти приближенные оценки параметров сейш в реальных водоемах. Например, в [3] на основе аналитических решений проведены оценки значений периодов и амплитуд скоростей сейшевых течений (по заданным амплитудам колебаний уровня) для Петрозаводской губы Онежского озера, а в [2] – для северо-западных бухт, хорошо согласующиеся с данными натурных наблюдений.

Недостатком подхода, основанного на решении задачи на собственные значения, является невозможность получить количественные значения амплитуд колебаний уровня и скоростей сейшевых течений, а также определить условия генерации определенных мод сейш. Но важным достоинством данного метода является то, что он дает возможность вычислить достаточно точные значения собственных периодов реальных бухт и получить представление о пространственных структурах колебаний воды в них. Поэтому данный метод целесообразно применять для нахождения первоначальных оценок, которые будут служить первым приближением для дальнейших исследований.

При решении прикладных задач важно установить не только резонансные периоды бухты и области наиболее интенсивных колебаний уровня и течений, но и определить условия, при которых будет иметь место наибольший отклик на действие возмущений. Для получения количественных оценок амплитуд колебаний уровня и скоростей сейшевых течений необходимо решать задачу о вынужденных колебаниях, когда жидкость в бассейне выводится из состояния равновесия действием возмущающей силы, а сейши рассматриваются как колебания воды, происходящие после прекращения действия возмущения [7]. Особую опасность может представлять ситуация, когда одновременно действуют несколько возмущений. Например, штормовой нагон и метеоциклонами [12].

Теоретически для судов и береговой инфраструктуры в бухтах наиболее опасны резонансные моды с экстремально узкими пиками на диаграммах усиления [9]. В [16] их предложено называть экстремальными модами (*extreme modes*). Амплитуды таких мод значительно возрастают при увеличении длительности действия возмущения [9]. Они могут послужить причиной возникновения сильного тягуна. Но в связи с тем, что данные моды имеют узкий диапазон коэффициента усиления и для их генерации требуются достаточно длительные воздействия – до сотен и даже тысяч периодов экстремальной моды [9], вероятность их возникновения незначительна. Особенностью экстремальных мод является их пространственная структура, затрудняющая излучение энергии колебаний воды через вход в бухту [9, 16]. Напри-

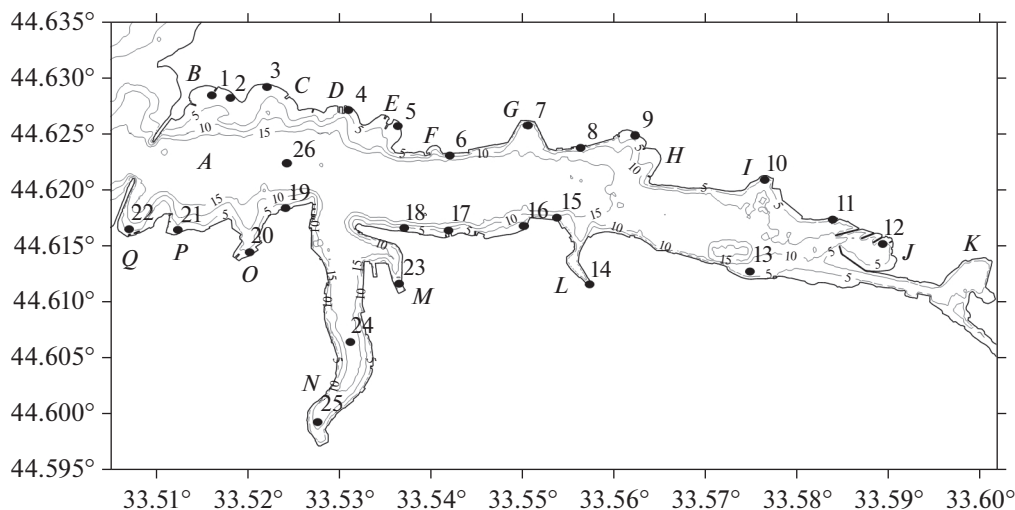
мер, для протяженной узкой бухты к таким модам можно отнести поперечные и продольно-поперечные моды. Но в то же время, из-за особенностей данных пространственных структур колебаний воды передача им энергии от волн, проникающих в бухту из открытого моря, становится неэффективной. В лабораторных экспериментах [11] не удалось сгенерировать экстремальную моду монохроматическими волнами, входящими в модельный прямоугольный бассейн. Авторы [11] указывают, что это связано с тем, что для возбуждения данной моды требуется длительное время в сотни и даже тысячи волновых периодов; также им не удалось точно настроить волнопродуктор на резонансный период. В связи с этим они делают вывод, что возбуждение экстремальной моды в лабораторных условиях маловероятно и поэтому в реальных условиях допустимо пренебречь учетом возможности генерации экстремальных мод. Использование таких допущений предполагает пренебрежение опасностью негативного воздействия экстремальных мод на суда, находящиеся в гавани, и береговую инфраструктуру. Поэтому, прежде чем делать такие допущения, надо с большой тщательностью исследовать возможность генерации мод данного типа и определить условия их возникновения с учетом особенностей изучаемой бухты.

Общие закономерности экстремальных мод пока не установлены. Исследования проведены для небольшого количества модельных бассейнов. Поэтому представляет практический и научный интерес изучение возникновения экстремальных мод в реальных бухтах.

Дополнительным фактором, влияющим на параметры сейшевых колебаний в бухте, является наличие связанных с ней бухт. Такая система представляет собой систему связанных резонаторов. Наличие связи приводит к тому, что собственные моды крупных бухт могут проявляться в соседних бухтах, расширяя их модовый состав [5, 6, 8, 14]. В работе [17] на основе лабораторных экспериментов показано, что при возбуждении сейш в одной бухте системы связанных бухт колебания воды передаются в соседнюю.

Севастопольская бухта – самая большая в системе северо-западных бухт. Она включает в себя ряд небольших бухт, активно эксплуатируемых в хозяйственной деятельности. Малые бухты имеют собственные названия (рис. 1), которые будут использованы ниже при анализе результатов модельных расчетов.

Согласно аналитических оценок, приведенных в [6], к потенциально экстремальным модам Севастопольской бухты можно отнести одноузловую поперечную собственную моду с периодом 2.8 мин. При этом близкий период имеет и двухузловая продольно-поперечная собственная



**Рис. 1.** Расположение виртуальных мареографов, батиметрия (тонкие линии – изобаты (в метрах)) и бухты, входящие в Севастопольскую бухту (A): B – Константиновская, C – Матюшенко, D – Старосеверная, E – Северная, F – Инженерная, G – Доковая (Панаиотова), H – Голландия, I – Сухарная, J – Маячная, K – Графская, L – Килен, M – Корабельная, N – Южная, O – Артиллеристская, P – Александровская, Q – Мартынова.

мода Севастопольской бухты, а также продольные собственные моды Карантинной, Стрелецкой, Камышовой и Южной бухт, что может способствовать возбуждению сейшевых колебаний с данным периодом в Севастопольской бухте за счет связи между данными бухтами.

Для сравнения представляет интерес также рассмотреть резонансную моду Севастопольской бухты с пространственной структурой, не затрудняющей излучение энергии колебаний воды в открытое море. Например, продольную трехузловую сейшу с периодом 6.3 мин [6]. Отметим, что таким собственным периодом не обладает ни одна из бухт, входящих в систему севастопольских бухт, за исключением одноузловой продольной сейши Камышовой бухты [6].

Цель настоящей работы – на основе численных экспериментов исследовать возможность генерации длинноволновыми возмущениями, приходящими из открытого моря, экстремальных мод сейшевых колебаний в протяженной узкой бухте.

## 2. ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для исследования отклика Севастопольской бухты на внешние длинноволновые возмущения была проведена серия численных экспериментов на основе конечно-элементной модели *ADCIRC* (*Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries*) [15]. В настоящей работе использован линейный вариант модели, описанный в [5]. Расчетная область [5] включала в себя систему севастопольских бухт и часть прибрежной зоны в виде сектора с радиусом 8 км. Сетка сгущалась в бухтах (длины сторон треугольников здесь составляли ~ 50 м). Шаг интегрирования по времени  $\Delta t = 0.025$  с.

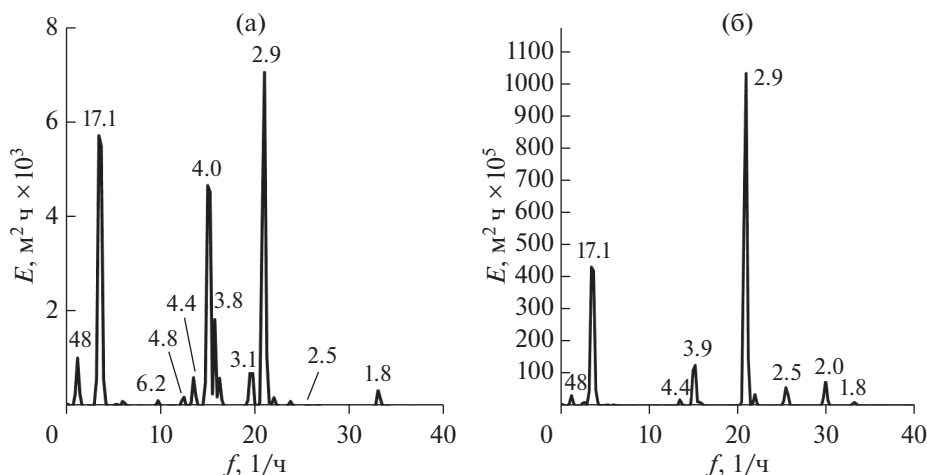
Для выделения мод сейш расчеты на начальном этапе проводились для возмущения, представляющего собой суперпозицию гармонических волн, генерируемых на жидкой границе, имеющих периоды, заключенные в диапазоне, включающем искомый период, значение которого получено с помощью аналитических оценок.

Каждый численный эксперимент состоял из двух этапов. На первом этапе при нулевых начальных условиях осуществлялась генерация волн возмущениями на открытой границе расчетной области в виде [6]:

$$\eta = \frac{a_0}{N} \sum_{n=1}^N \sin \omega_n t, \quad (1)$$

где  $a_0 = 0.1$  м – амплитуда колебаний;  $N$  – количество гармоник в ряде;  $n$  – номер гармоники;  $\omega_n = 2\pi/T_n$  – частота колебаний;  $T_n$  – период колебаний,  $t$  – время. Период колебаний каждой гармоники ряда (1) определяется выражением  $T_n = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min})\delta_n$ , где  $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$  – минимальный и максимальный периоды колебаний,  $\delta_n = (n - 1)/(N - 1)$ . Количество гармоник  $N = (T_{\max} - T_{\min})/t_d + 1$  (в расчетах использовался шаг  $t_d = 10$  с).

На втором этапе граничное условие (1) заменялось условием свободного прохождения и моделировались свободные колебания воды. В каче-



**Рис. 2.** Энергетические спектры сейшевых колебаний в Севастопольской бухте, вызванных возмущениями с периодами, лежащими в диапазоне 1–15 мин: (а) точка 9; (б) точка 26. Показаны периоды (в минутах) для основных пиков.

стве начальных условий задавались поля волновой скорости и колебаний уровня для момента времени  $t$ , соответствующего окончанию первого этапа расчетов. Длительность первого этапа расчетов составляла 24 ч (расчет для возмущений в заданном диапазоне периодов) и 6 ч (расчет для возмущения с заданным периодом) модельного времени, а второго – 4 ч (расчет свободных колебаний).

Длительность первого этапа расчетов выбрана на следующих основаниях. Для возникновения тягуна в черноморских портах Туапсе, Сочи, Батуми, Поти необходимо, чтобы продолжительность шторма составляла 7–13 ч [1]. Сильный тягун в Туапсе возникает, если длительность возмущения равна 24 ч [4]. К возникновению тягуна в Севастопольской бухте может приводить возмущение продолжительностью 18 ч [1]. Поэтому при проведении предварительных расчетов для установления значений параметров численной модели рассматривались длительности действия возмущений до 24 ч. Выявлено, что стационарный режим колебаний наступает в Севастопольской бухте через 4–5 ч после начала действия возмущений. Это позволило при моделировании ограничить действия возмущений временным интервалом длительностью, равной 6 ч.

На основе полученных на втором этапе волновых полей строились энергетические спектры, позволяющие выделить резонансные периоды Севастопольской бухты, значения которых использовались в дальнейших расчетах, выполняемых по методике, приведенной выше. Сначала осуществлялась генерация волн на полученных резонансных периодах Севастопольской бухты, затем проводился анализ свободных колебаний, происходящих после прекращения действия возмущений.

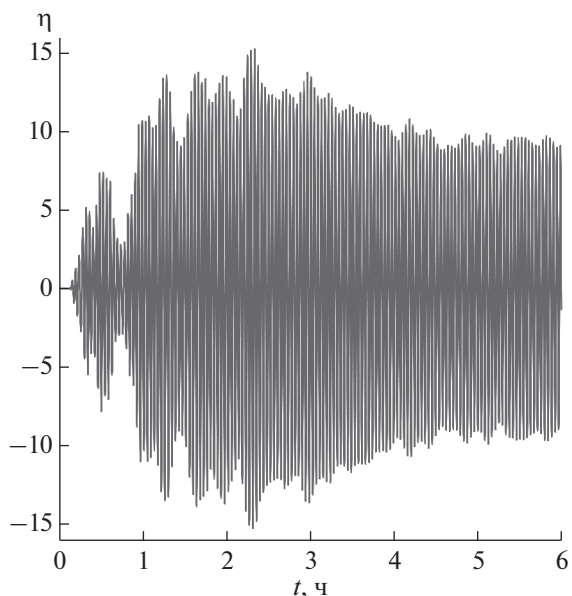
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### 3.1. Длинноволновые колебания в Севастопольской бухте, вызванные возмущениями с периодами, лежащими в интервале 1–15 мин

Данных натуральных наблюдений за высокочастотными сейшами в диапазоне периодов 1–10 мин, представляющих потенциальную опасность в плане возникновения тягуна в Севастопольской бухте, нет. В [6] исследуется генерация сейш в системе севастопольских бухт в зависимости от длительности действия возмущений. В частности, в этой работе показано, что интенсивные высокочастотные сейши с периодами 1–10 мин возникают при длительностях действия возмущений более 15 ч. На рис. 2 показаны модельные спектры, построенные для колебаний уровня в точках 9 и 26 (рис. 1), вызванных возмущениями в диапазоне периодов 1–15 мин длительностью 24 ч, рассчитанных по методике, описанной в разделе 2. Как видно из этих рисунков, модовый состав сейш в данном диапазоне периодов достаточно широк. Здесь не будем останавливаться на анализе модового состава. Его можно найти в работе [6]. Из предполагаемых к исследованию мод мода с периодом 2.9 мин наиболее интенсивна.

#### 3.2. Экстремальные моды сейшевых колебаний

Для поиска потенциально экстремальных мод сейшевых колебаний Севастопольской бухты были выполнены расчеты для интервала периодов возмущений, заключенных в диапазоне 2.4–3.0 мин. Данный диапазон включает в себя период поперечной и продольно-поперечных мод Севастопольской бухты, равных по аналитическим оценкам 2.8 мин [6]. При колебаниях данного вида излучение энергии в открытое море через вход в бухту затруднено, т.к. они происходят поперек



**Рис. 3.** Процесс генерации волн в Севастопольской бухте возмущением с периодом 2.5 мин, бухта Северная (точка 5). Амплитуды нормированы на  $a_0 = 0.1$  м.

бухты. По результатам расчетов были установлены наиболее энергонесущие в рассмотренном диапазоне периоды волн, возникающих в Севастопольской бухте: 2.5 и 2.9 мин. Затем была выполнена серия численных экспериментов по генерации сейш возмущениями с данными значениями периодов.

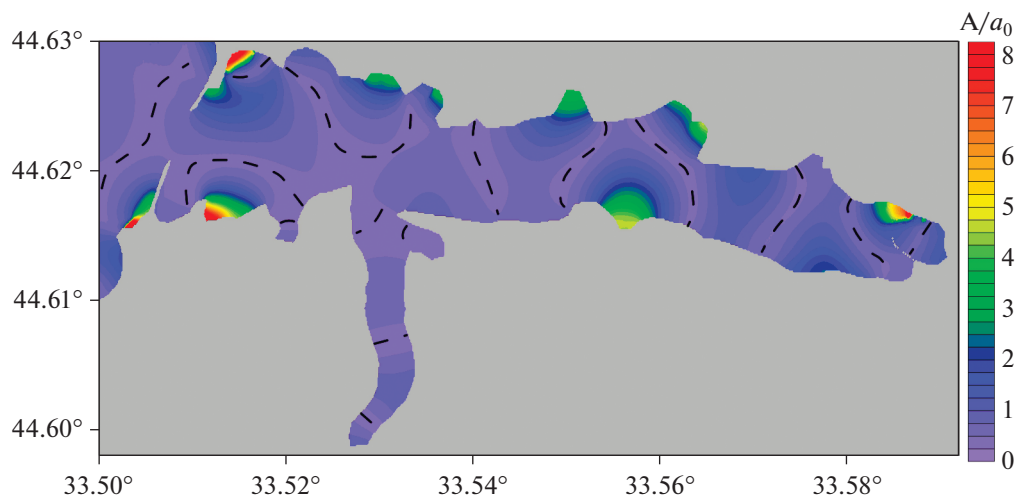
### 3.2.1. Колебания, вызываемые возмущением с периодом, равным 2.5 мин

Анализ результатов расчетов генерации волн в Севастопольской бухте возмущением с периодом

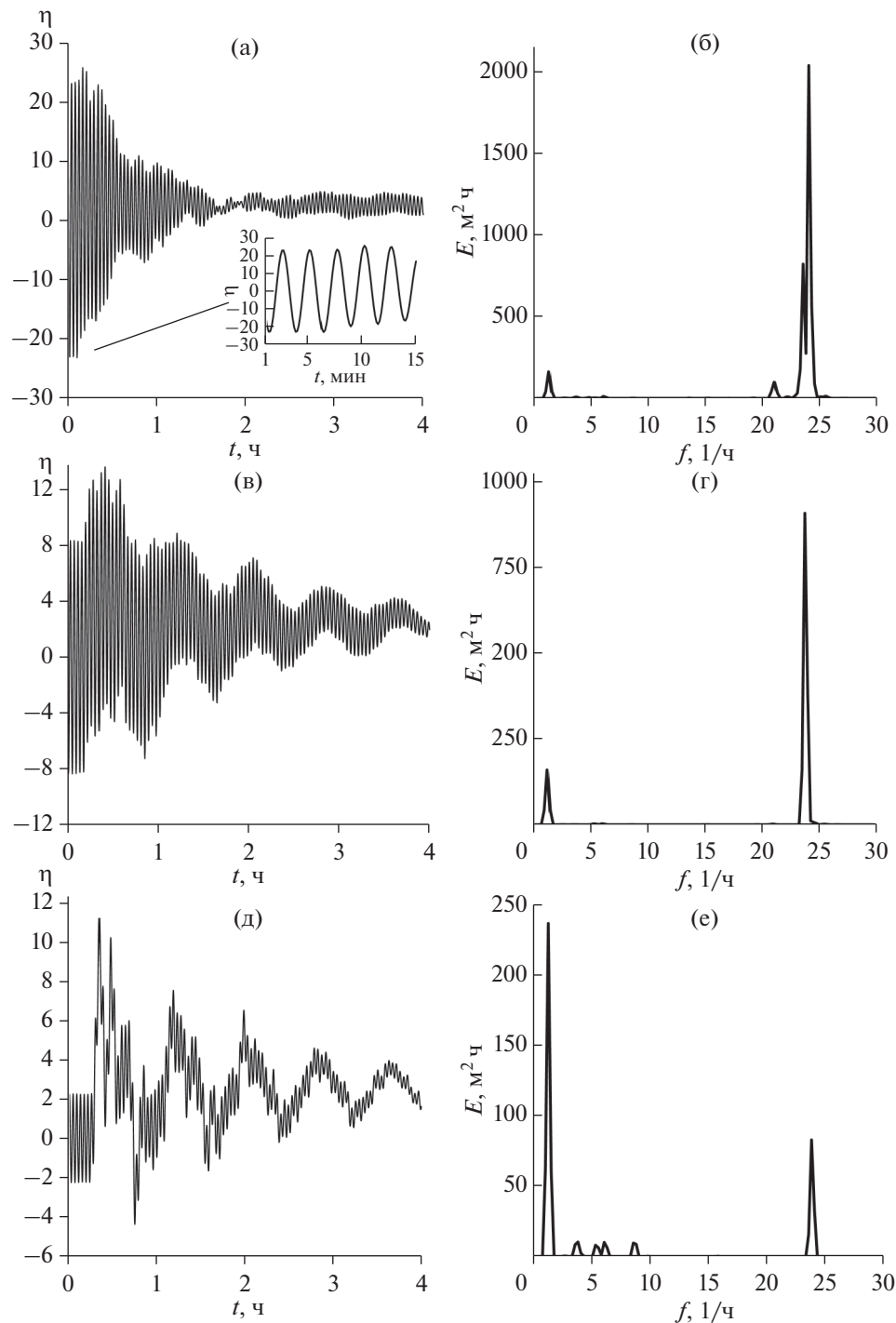
2.5 мин показал, что вынужденные колебания воды в бухте выходят на стационарный режим, при котором рост амплитуды колебаний уровня прекращается при продолжении действия возмущения через 70–95 периодов волны (3–4 ч) (рис. 3).

На рис. 4 представлено пространственное распределение безразмерных амплитуд колебаний уровня в Севастопольской бухте, происходящих после прекращения действия данного возмущения. В связи с тем, что Севастопольская бухта входит в сложную систему связанных бухт, включающую в себя Карантинную, Стрелецкую, Круглую, Камышовую и другие достаточно крупные бухты, модовый состав сейш в ней расширяется за счет собственных мод соседних бухт. Поэтому, генерируя сейши в Севастопольской бухте возмущением на собственном периоде 2.5 мин, мы получаем в бухте не только моду с периодом 2.5 мин, но резонансные моды остальных бухт системы, проникающие в Севастопольскую бухту за счет связи.

Как видно из рис. 4, пространственная структура колебаний уровня близка к поперечной в западной половине бухты: нет узловых линий, расположенных поперек бухты, они и другие изолинии большей частью представляют собой кривые в виде секторов с центрами в малых бухтах: Константиновской, Александровской, Северной, Доковой, Голландия, Килен и других. Восточная половина Севастопольской бухты уже западной и содержит меньшее количество малых бухт. Колебания воды в ней имеют как поперечные, так и продольные составляющие. Но, в целом, для данной волны излучение энергии через вход в бухту затруднено. Наибольшее усиление волн имеет место в Александровской бухте – в 25 раз, в Доковой и Килен бухтах – в 14 раз.



**Рис. 4.** Пространственное распределение безразмерных амплитуд колебаний уровня (нормированных на  $a_0 = 0.1$  м, узловые линии показаны штриховыми линиями) в Севастопольской бухте, вызванных действием возмущения с периодом, равным 2.5 мин.

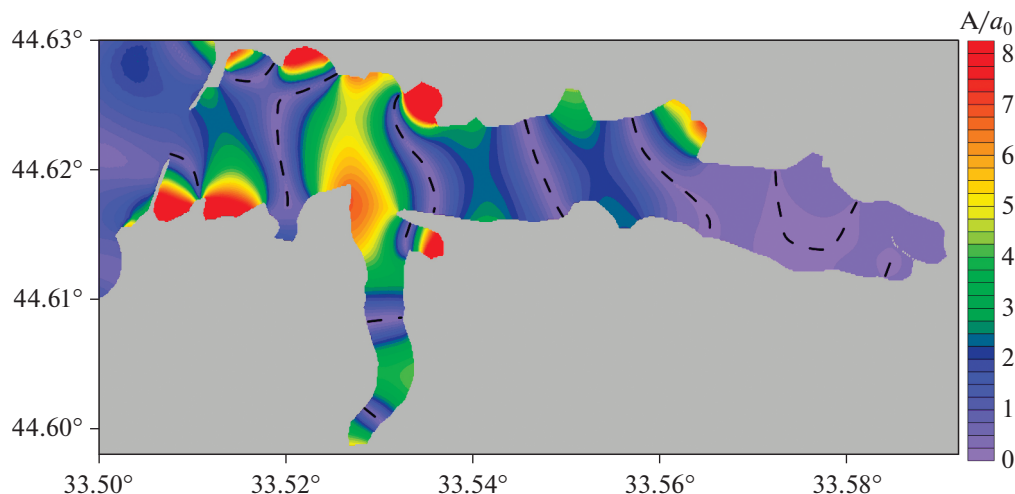


**Рис. 5.** Модельные мареограммы и энергетические спектры сейшевых колебаний, вызванных возмущением с периодом 2.5 мин: (а), (б) – Александровская бухта (точка 21), (в), (г) – Доковая бухта (точка 7), (д), (е) – Маячная бухта (точка 12). Амплитуды нормированы на  $a_0 = 0.1$  м.

Спектральный анализ колебаний уровня, имеющих место после прекращения действия возмущения, показал, что на всех виртуальных мареографах (рис. 1) регистрируется мода с периодом, равным 2.5 мин (рис. 5). Также практически во всех частях акватории Севастопольской бухты проявля-

ется ее мода Гельмгольца с периодом, равным 48 мин (рис. 5). В результате анализа модельных мареограмм установлено, что в Севастопольской бухте имеют место три типа колебаний уровня.

Для первого характерно преобладание высокочастотной составляющей и быстрое затухание



**Рис. 6.** Пространственное распределение безразмерных амплитуд колебаний уровня (нормированных на  $a_0 = 0.1$  м, узловые линии показаны штриховыми линиями): в Севастопольской бухте, вызванных действием возмущения с периодом, равным 2.9 мин.

(рис. 5а, 5б). Второй тип колебаний имеет место в бухтах Доковая (рис. 5в, 5г), Северная, Голландия, Килен. Они достаточно интенсивны, медленно затухают, и четко прослеживается модуляция модой Гельмгольца Севастопольской бухты. Для третьего типа колебаний характерно преобладание моды Гельмгольца над высокочастотной составляющей, они также медленно затухают. Данный тип колебаний имеет место в вершинах Севастопольской (рис. 5д, 5е) и Южной (точка 25) бухт.

Для всех типов выделенных колебаний уровня характерно, что после прекращения действия возмущения в продолжение около 25 мин (полупериод моды Гельмгольца Севастопольской бухты) продолжают высокочастотные колебания с постоянной амплитудой с периодом вынуждающей силы. Затем их амплитуда резко возрастает (рис. 5) и меняется их характер — ощутимый вклад начинает вносить мода Гельмгольца, генерация которой происходит за счет ухода излишков воды, поступившей в бухту за время действия возмущения. При этом величины пучностей больше, чем впуклостей (рис. 5а, 5в, 5д).

### 3.2.2. Колебания, вызываемые возмущением с периодом, равным 2.9 мин

В результате воздействия возмущения с периодом 2.9 мин в западной части Севастопольской бухты, ограниченной защитным молом с одной стороны и узловой линией, проходящей от Артиллерийской бухты поперек Севастопольской бухты, — с другой стороны, формируется область продольно-поперечных колебаний (рис. 6).

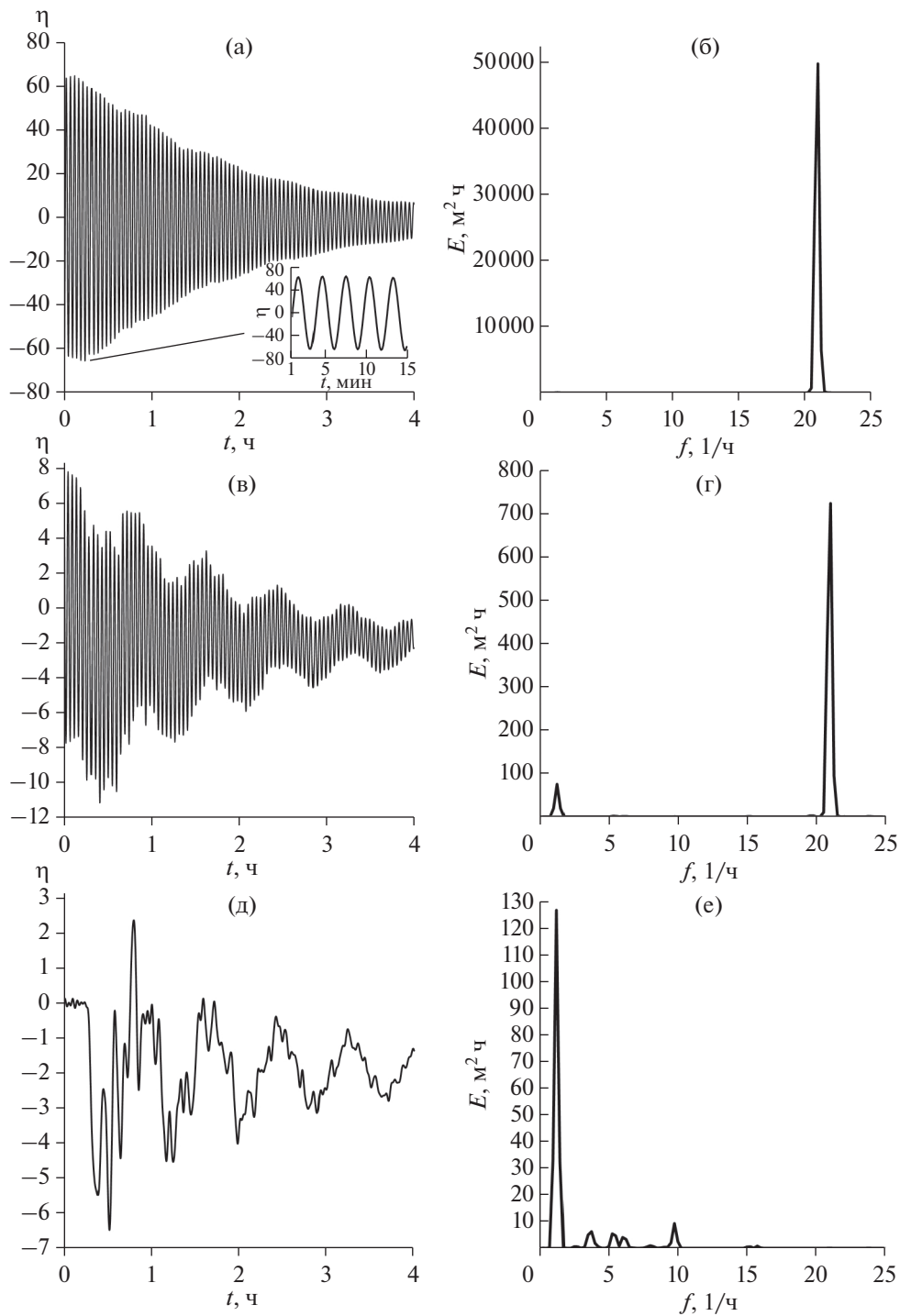
В этой системе колебания происходят между бухтами Александровской и Константиновской, а также между бухтами Мартыновой и Матюшенко. Наличие данной системы затрудняет излучение

энергии в открытое море. В восточной половине Севастопольской бухты колебания носят продольный характер и узловые линии расположены поперек бухты. В Южной бухте формируется двухузловая продольная сейша (значение ее периода, равное 2.9 мин, совпадает с аналитической оценкой [6]).

Стационарный режим вынужденных колебаний наступает через 50–60 периодов волны (2.5–3.0 ч) — быстрее, чем у моды, рассмотренной выше, пространственная структура которой близка к поперечной. В то же время усиление набегающих волн для данной моды больше, чем у поперечной сейши. Наибольшее усиление волн имеет место в бухтах: Северная — в 62 раза, Корабельная — в 41 раз, Александровская — в 28 раз, Мартынова — в 22 раза.

Аналогично волне, вызванной возмущением с периодом, равным 2.5 мин, для данной волны также можно выделить три типа колебаний уровня (рис. 7): интенсивные высокочастотные колебания на резонансном периоде бухты, равном периоду возмущающей силы (рис. 7а, 7б), достаточно быстро затухающие; интенсивные высокочастотные колебания, промодулированные модой Гельмгольца (рис. 7в, 7г), и колебания в виде интенсивной моды Гельмгольца (рис. 7д, 7е). Причем, до прекращения действия возмущения в таких областях акватории бухты колебания уровня незначительные, их амплитуды не превышают 2–3 см. Но после прекращения действия возмущения они резко возрастают в десятки раз. Например, в точке 12 (рис. 7д, 7е), находящейся в вершине Севастопольской бухты, амплитуды колебаний уровня увеличиваются в 30 раз.

В отличие от поперечной сейши, у данной волны впуклости превышают пучности (рис. 7а, 7в, 7д).



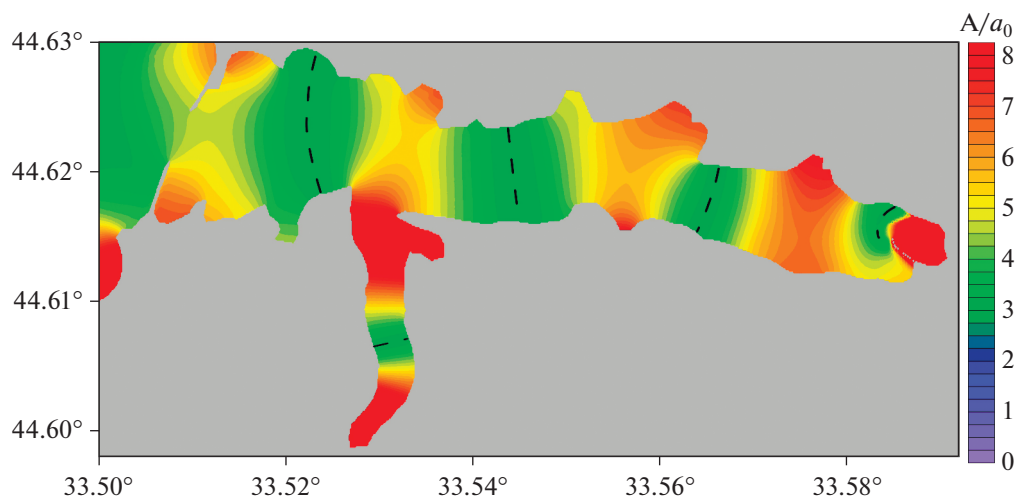
**Рис. 7.** Модельные мареограммы и энергетические спектры сейшевых колебаний, вызванных возмущением с периодом 2.86 мин: (а), (б) – Северная бухта (точка 5), (в), (г) – Доковая бухта (точка 7), (д), (е) – Маячная бухта (точка 12). Амплитуды нормированы на  $a_0 = 0.1$  м.

Через 20–25 мин (примерно через полпериода моды Гельмгольца) после прекращения действия возмущений режим стационарных колебаний прекращается и происходит резкое увеличение их амплитуды практически во всей акватории Севастопольской бухты, связанное с возникновением моды Гельмгольца.

### 3.3. Неэкстремальные моды сейшевых колебаний

К таким модам можно отнести продольные моды сейшевых колебаний, т.к. для них излучение энергии в открытое море через вход в бухту затруднено и стационарный режим при их генерации должен теоретически наступать быстрее.





**Рис. 8.** Пространственное распределение безразмерных амплитуд колебаний уровня (нормированных на  $a_0 = 0.1$  м, узловые линии показаны штриховыми линиями) в Севастопольской бухте, вызванных действием возмущения с периодом, равным 6.2 мин.

Для исследования сейш данного типа в Севастопольской бухте удобно выбрать продольную трехузловую сейшу. По аналитическим оценкам, выполненным в [6], ее период составляет от 6.3 до 6.9 мин. Был выполнен расчет генерации волн в системе севастопольских бухт возмущением с периодами, заключенными в интервале 6.0–7.0 мин. Анализ результатов расчетов позволил выделить наиболее энергонесущий период – 6.2 мин. Затем проведена генерация сейши на этом периоде. В результате получена трехузловая продольная мода (рис. 8), что хорошо согласуется с аналитическими оценками.

Для выхода вынужденных колебаний на стационарный режим потребовалось 40 периодов волны (около 4 часов), что меньше в 1.5–2.5 раза, чем для двух видов сейш, рассмотренных выше. Наибольшее усиление набегающих волн имеет место в бухтах: Маячная – в 59 раз, Южная, Килен – в 45 раз, Корабельная – в 38 раз, Сухарная – в 25 раз, Северная – в 21 раз.

Колебания уровня, как и в предыдущих рассмотренных случаях, имеют три типа (рис. 9).

Также имеет место усиление колебаний примерно через 25 мин (полупериод моды Гельмгольца Севастопольской бухты) после прекращения действия возмущений, связанные с возникновением моды Гельмгольца. При этом величины впуклостей больше величин пучностей (рис. 9а, 9в, 9д).

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Воздействие высокочастотных длинноволновых возмущений на собственных периодах Севастопольской бухты (2.5, 2.9 и 6.2 мин), приходящих из открытого моря, приводит к генерации в ней не только резонансных мод с периодами,

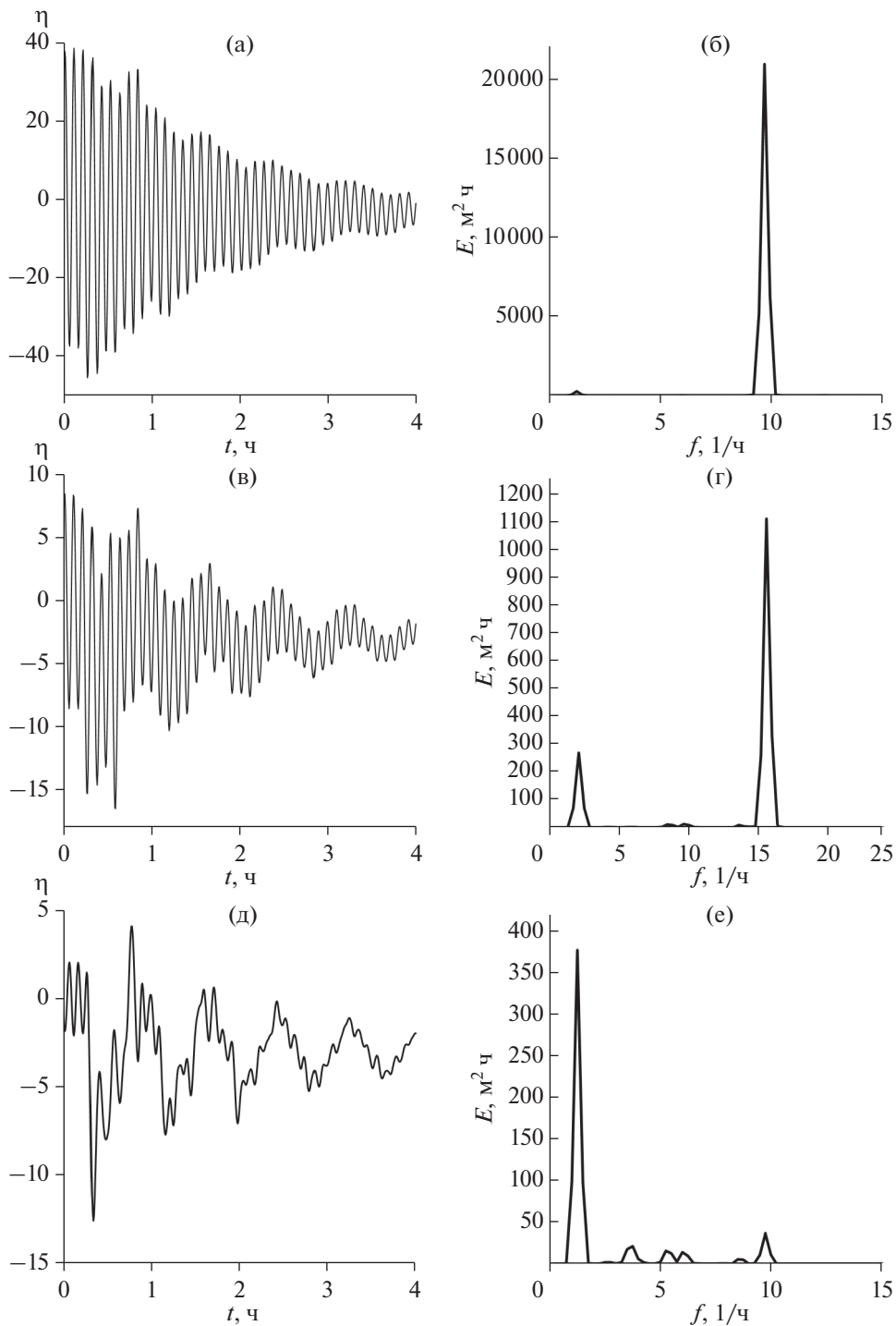
близкими к периоду возмущения, но и значительной моды Гельмгольца. Причем во многих областях акватории интенсивности колебаний уровня для данных мод сопоставимы, а в вершине бухты мода Гельмгольца доминирует.

2. Анализ результатов расчетов показал, что длинноволновые возмущения, проникающие в Севастопольскую бухту из открытого моря, приводят к формированию в ее акватории областей с высокой интенсивностью колебаний уровня. Данные области располагаются в малых бухтах, входящих в состав Севастопольской бухты. Это может представлять опасность для пришвартованных судов и портовой инфраструктуры.

3. Наибольшие амплитуды колебаний уровня для всех рассмотренных в работе видов сейш имели место в областях акватории, где доминируют высокочастотные колебания воды на резонансной частоте бухты, на которой производилась генерация волн.

4. Самыми безопасными областями для стоянки судов являются прямолинейные участки побережья в центральной части Севастопольской бухты, где сейшевые колебания имеют меньшую интенсивность.

5. В наших исследованиях не удалось получить подтверждения, что наибольшую потенциальную опасность для прибрежной зоны вытянутой глубоководной бухты представляют так называемые экстремальные моды. Мода со структурой, близкой к поперечной, была сгенерирована. Установлено, что, действительно, время достижения стационарного режима у нее больше, чем у продольно-поперечной и продольной мод. Но максимальные амплитуды оказались в 2.5 раза меньше. В то же время у другой моды (период 2.9 мин), имеющей пространственную структуру, затрудняющую излучение энергии колебаний в открытое море, про-



**Рис. 9.** Модельные мареограммы и энергетические спектры сейшевых колебаний, вызванных возмущением с периодом 6.2 мин: (а), (б) – Килен бухта (точка 14), (в), (г) – Доковая бухта (точка 7), (д), (е) – вершина Севастопольской бухты (точка 11). Амплитуды нормированы на  $a_0 = 0.1$  м.

исходит наибольшее усиление волн по сравнению со всеми рассмотренными здесь модами. Максимальный коэффициент усиления волн у продольной трехузловой сейши с периодом 6.2 мин всего на 5% меньше, чем у моды с периодом 2.9 мин. Но при этом она в целом интенсивнее.

**Источник финансирования.** Работа выполнена в рамках госзадания по теме № *FNNN-2021-0005* “Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Балинец Н.А.* Условия возникновения тягуна в портах Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2007. № 15. С. 362–369.
2. *Иванов В.А., Манилюк Ю.В., Санников В.Ф.* Сейши в бассейне с открытым входом // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59. № 4. С. 23–30. <https://doi.org/10.15372/PMTF20180404>
3. *Иванов В.А., Пальшин Н.И., Манилюк Ю.В.* Сейши Петрозаводской губы Онежского озера // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 5. С. 503–510. <https://doi.org/10.31857/S0321-0596465503-510>
4. *Манилюк Л.С., Балинец Н.А.* Тягун в портах Черного моря // Метеорология и гидрология. 2005. № 9. С. 120–122.
5. *Манилюк Ю.В., Лазоренко Д.И., Фомин В.В.* Исследование сейшевых колебаний в смежных бухтах на примере Севастопольской и Карантинной бухт // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36. № 3. С. 261–276. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-3-261-276>
6. *Манилюк Ю.В., Лазоренко Д.И., Фомин В.В.* Сейшевые колебания в системе севастопольских бухт // Водные ресурсы. 2021. № 5. С. 526–536. <https://doi.org/10.31857/S0321059621050126>
7. *Рабинович А.Б.* Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 325 с.
8. *Aranguiz R., Catalan P.A., Cecioni C. et al.* Tsunami resonance and spatial pattern of natural oscillation modes with multiple resonators // JGR Oceans. 2019. V. 124. Iss. 11. P. 7797–77816. <https://doi.org/10.1029/2019JC015206>
9. *Bellotti G.* Transient response of harbours to long waves under resonance conditions // Coastal Engineering. 2007. V. 54. Iss. 9. P. 680–693. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.02.002>
10. *Bellotti G., Briganti R., Beltrami G., Franco L.* Modal analysis of semi-enclosed basins // Coastal Engineering. 2012. V. 64. P. 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.02.002>
11. *Dong G., Zheng Z., Gao J. et al.* Experimental investigation on special modes with narrow amplification diagrams in harbor oscillations // Coastal Engineering. 2020. V. 159. August 2020, 103720. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103720>
12. *Heidarzadeh M., Rabinovich A.B.* Combined hazard of typhoon generated meteorological tsunamis and storm surges along the coast of Japan // Natural Hazards. 2021. V. 106. P. 1639–1672. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04448-0>
13. *Lee J.J.* Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary geometry // Journal of Fluid Mechanics. 1971. V. 45. № 2. P. 375–394.
14. *Liu P. L.-F., Monserrat M., Macros M., Rabinovich A.B.* Coupling between two inlets: observation and modeling // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № C3. 3069. P. 14-1–14-10. <https://doi.org/10.1029/2002JC001478>
15. *Luettich R.A., Westerink J.J.* Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC; 2004. [http://adcirc.org/adcirc\\_theory\\_2004\\_12\\_08.pdf](http://adcirc.org/adcirc_theory_2004_12_08.pdf)
16. *Ma X., Zheng Z., Zhang X., Dong G.* Numerical investigation on special modes with narrow amplification diagram in harbor oscillations // Ocean Dynamics. 2020. V. 70. Iss. 1. P. 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10236-019-01325-8>
17. *Nakano M., Fajimoto N.* Seiches in bays forming coupled system // Journal of the Oceanographical Society of Japan. 1987. V. 43. P. 124–134.
18. *Rabinovich A.B.* Seiches and Harbor Oscillations (Chapter 9) // Handbook of Coastal and Ocean Engineering / Ed. Y.C. Kim. – Singapore: World Scientific Publ., 2009. P. 193–236.

## Investigation of the Regimes of Seiche Oscillations Sevastopol Bay

Yu. V. Manilyuk<sup>a, #</sup>, D. I. Lazorenko<sup>a, ##</sup>, V. V. Fomin<sup>a, ###</sup>, D. V. Alekseev<sup>a, ####</sup><sup>a</sup>Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia<sup>#</sup>e-mail: [uvmsev@mhi-ras.ru](mailto:uvmsev@mhi-ras.ru)<sup>##</sup>e-mail: [d.lazorenko.dntmm@gmail.com](mailto:d.lazorenko.dntmm@gmail.com)<sup>###</sup>e-mail: [v.fomin@mhi-ras.ru](mailto:v.fomin@mhi-ras.ru)<sup>####</sup>e-mail: [d.alekseev@mhi-ras.ru](mailto:d.alekseev@mhi-ras.ru)

Based on the ADCIRC hydrodynamic finite element model, various regimes of seiche oscillations in a narrow extended deep-water bay are studied using the Sevastopol Bay as an example. Long waves penetrating into the bay through its entrance are considered as perturbations. Calculations are made for perturbations with periods of 2.5; 2.9; 6.2 min, belonging to the eigenmodes of the bay with different spatial structure: transverse; longitudinal-transverse, longitudinal, respectively. The impact of these perturbations leads to the generation of not only resonant modes with periods close to the perturbation period, but also an intense Helmholtz mode that occurs after the perturbation ceases and leads to a significant increase in the amplitude of level oscillations. In the studies of seiches caused by perturbations in the form of monochromatic long waves coming from the open sea, it was not possible to confirm that the greatest potential danger to the coastal zone of an elongated deep-water bay is represented by the so-called extreme modes having a transverse structure. A mode with a structure close to transverse was generated, but its maximum amplitude turned out to be 2.5 times less than that of the longitudinal-transverse and longitudinal seiches. The greatest amplification of the incident waves was noted for the longitudinal-transverse mode with a period of 2.9 min.

**Keywords:** seiches in bays, extreme modes of seiches, Sevastopol bays, ADCIRC model