

УДК 532.59; 556.556.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИЛЫ КОРИОЛИСА НА СЕЙШЕВЫЕ КОЛЕБАНИЯ В АЗОВСКОМ МОРЕ

Ю. В. Манилюк*, В. В. Фомин

Морской гидрофизический институт РАН (ул. Капитанская, 2, Севастополь, Россия, 299011), *uvmsev@yandex.ru

На основе математического моделирования исследуются сейшевые колебания на береговых станциях Азовского моря, возникающие в результате воздействия стационарного ветра разных направлений длительностью 12 ч. Выполнены расчеты с учетом и без учета силы Кориолиса. Сравнительный анализ результатов расчетов показал, что в Должанской, а также в расположенных на южном побережье Азовского моря Мысовом и Темрюке учет влияния вращения Земли в большинстве рассмотренных случаев приводит к увеличению максимальных отклонений уровня моря, достигая в Темрюке 50 %. В Приморско-Ахтарске, а также в расположенных на северном побережье Бердянске и Мариуполе, напротив, в большинстве рассмотренных случаев учет силы Кориолиса приводит к ослаблению сейш, максимально в Бердянске – до 44 %. В Таганроге, находящемся на северо-восточной окраине моря в вершине Таганрогского залива, имеют место наибольшие абсолютные значения отклонений уровня моря, но учет силы Кориолиса не вызывает существенных изменений максимальных отклонений уровня – они не превышают 21 %. Вращение Земли приводит в Азовском море к возникновению сдвига фаз между колебаниями уровня, имеющими место в случае, когда сила Кориолиса учитывается, и без ее учета. В зависимости от направления ветра, вызвавшего сейши, данный сдвиг фаз может быть устойчивым либо изменяться с течением времени. Сейшевые колебания, имеющие место при учете силы Кориолиса, в целом более интенсивные на начальной стадии процесса, но быстрее затухают, чем колебания без ее учета. При всех рассмотренных направлениях ветра, как с учетом вращения Земли, так и без учета, генерируется интенсивная мода сейшевых колебаний с периодом, равным 14,4 ч. Вращение Земли увеличивает интенсивность данной моды. Кроме этого, сила Кориолиса приводит к генерации более высокочастотных мод (с периодами 6,5; 6,9 ч) по сравнению со случаями, когда она не учитывается (периоды 7,2; 7,5 ч). При этом высокочастотные колебания, рассчитанные без учета вращения Земли, интенсивнее, чем с учетом. Анализ результатов расчетов показал, что вращение Земли оказывает ощутимое влияние на величины амплитуд, модовый состав, характер движения воды сейшевых колебаний в Азовском море. В данном водоеме необходимо учитывать силу Кориолиса при моделировании сейш.

Ключевые слова: Азовское море; длинные волны; сейши; сила Кориолиса

Для цитирования: Манилюк Ю. В., Фомин В. В. Исследование влияния силы Кориолиса на сейшевые колебания в Азовском море // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 2. С. 5–18. doi: 10.17076/lim1948

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ (FNNN-2024-0016).

Yu. V. Manilyuk*, V. V. Fomin. A STUDY OF THE CORIOLIS FORCE EFFECT ON SEICHE OSCILLATIONS IN THE SEA OF AZOV

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences (2 Kapitanskaya St., 299011 Sevastopol, Russia), *uvmsev@yandex.ru

Seiche oscillations at coastal stations of the Sea of Azov caused by the action of stationary winds of different directions lasting 12 hours are investigated based on mathematical modeling. Calculations are made with and without taking into account the Coriolis force. A comparative analysis of the calculation results showed that in Dolzhanskaya, as well as in points located on the southern coast of the Azov Sea: Mysovoy, Temryuk, factoring in the Earth's rotation in most of the cases led to an increase in the maximum level deviations, reaching up to 50 % in Temryuk. In Primorsko-Akhtarsk, as well as in points located on the northern coast: Berdyansk, Mariupol, on the contrary, factoring in account the Coriolis force in most cases led to a weakening of seiches, the most notably in Berdyansk – up to 44 %. In Taganrog, located at the north-eastern end of the sea at the top of the Taganrog Bay, the absolute values of sea level deviations are the largest, but factoring in the Coriolis force does not cause significant changes in the maximum level deviations – they do not exceed 21 %. The Earth's rotation leads to a phase shift in the Sea of Azov between the level oscillations that occur in the case when the Coriolis force is taken into account and in the case it is not. Depending on the direction of the wind that cause the seiches, this phase shift can be stable or change over time. Seiche oscillations that occur when taking into account the Coriolis force are generally more intensive in the initial stage of the process, but they fade away faster than when it is disregarded. For all the wind directions considered, both with and without taking into account the rotation of the Earth, an intensive mode of seiche oscillations with a period of 14.4 hours is generated. The rotation of the Earth augments the intensity of this mode. In addition, the Coriolis force leads to the generation of higher-frequency modes (with periods of 6.5; 6.9 hours) compared to cases when it is not taken into account (periods of 7.2; 7.5 hours). At the same time, high-frequency oscillations calculated without taking the rotation of the Earth into account are more intensive than with it. Analysis of the calculation results showed that the Earth's rotation has a noticeable effect on the amplitude, modal composition, and nature of the water movement of seiche oscillations in the Sea of Azov. Taking the Coriolis force into account when modeling seiches in this sea is essential.

Keywords: Sea of Azov; long waves; seiches; Coriolis force

For citation: Manilyuk Yu. V., Fomin V. V. A study of the Coriolis force effect on seiche oscillations in the Sea of Azov. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 2. P. 5–18. doi: 10.17076/lim1948

Funding. Financial support for the research was provided from the federal budget for the implementation of state assignment to the Federal Research Center Marine Hydrophysical Institute RAS (MHI RAS) (FNNN-2024-0016).

Введение

Сейшевые колебания являются одним из самых распространенных явлений, наблюдающихся в ограниченных водоемах. Причин, вызывающих сейши, множество. К ним относятся: неравномерное распределение атмосферного давления над акваторией или его периодическое изменение во времени; действие ветра на водную поверхность; резкое повышение или понижение уровня в какой-либо части водоема за счет притока или оттока речных вод, выпадения осадков; сейсмические колебания земной коры [Океанографическая..., 1980]. Важными факторами, определяющими параметры сейш,

являются профиль берегов и батиметрия водоема, наличие островов и полуостровов. Влияние этих факторов на сейши рассмотрено в работе [Kodomari, 1982], а влияние фактора наличия крупных заливов – в работе [Manilyuk, Cherkessov, 1997].

Сила Кориолиса, обусловленная вращением Земли, при определенных условиях может оказывать заметное воздействие на движение воды. Для его оценки обычно используется число Россби: $Ro = U/(Lf)$, где U – характерная скорость геофизического явления (в нашем случае скорость распространения длинных волн, которая вычисляется по формуле: $U = \sqrt{gH}$; здесь g – ускорение свободного

падения, H – средняя глубина бассейна); L – характерный пространственный масштаб геофизического явления (длина бассейна), $f = 2\Omega \sin \varphi$ – параметр Кориолиса, где угловая скорость вращения Земли Ω – географическая широта.

При $Ro < 1$ сила Кориолиса существенно влияет на движение воды [Kodomari, 1982]. Например, в средних широтах $f \sim 10^{-4}$, и если величина U порядка нескольких метров в секунду, то водоему нужна длина более нескольких сотен километров, чтобы удовлетворить $Ro < 1$. Это условие выполняется лишь в некоторых крупнейших водоемах мира, например, в озерах, входящих в систему Великих озер: Верхнее, Эри, Онтарио. А также в Каспийском и Балтийском морях. Ладожское и Онежское – два крупнейших озера в Европе – возможно, слишком малы для таких процессов [Hutter et al., 2011]. В работах [Platzman, Rao, 1964; Rao, Schwab, 1976; Schwab, Rao, 1977; Sebastia et al., 2014] рассматривалось влияние силы Кориолиса в Великих озерах и сделан вывод, что вращение Земли обычно вызывало небольшое увеличение периода сейш для низшей моды, а приращение периода было менее 1 %. Поэтому делается допущение, что влияние силы Кориолиса на период сейш в природных озерах пренебрежимо мало. В работе [Rao, 1966] на основе численной модели исследуются собственные колебания однородной жидкости в прямоугольных бассейнах постоянной глубины с учетом вращения. В ней показано, что вращение приводит к изменению значений собственных периодов и образованию амфидромических систем.

Азовское море относится к типу внутренних морей. Его протяженность в зональном направлении (без учета Таганрогского залива) составляет около 230 км, средняя глубина моря ~ 7 м, средняя широта $\varphi = 46^\circ$. При этих значениях параметров $Ro = 0,34$. Поэтому следует ожидать, что сила Кориолиса может оказывать влияние на сейшевые колебания. Вопрос о влиянии вращения Земли на сейшевые колебания в Азовском море является практически неисследованным. Лишь в работах [Матишов, Инжебейкин, 2009; Филиппов, 2012] некоторое внимание уделено этому вопросу.

В силу мелководности Азовского моря (его максимальная глубина составляет 13,5 м) ветер является основным фактором, определяющим генерацию сейш, охватывающих весь водоем.

Целью настоящей работы является изучение на основе математического моделирования влияния силы Кориолиса на параметры сейшевых колебаний в Азовском море,

возбуждаемых в результате действия ветров различных направлений.

Материалы и методы

Сведения о сейшах Азовского моря и обзор литературы

Одной из характерных особенностей Азовского моря является наличие сейш большой амплитуды, возникающих после прекращения действия возмущений, вызывающих сгонно-нагонные колебания уровня моря. Амплитуды сейшевых колебаний могут достигать 40–60 % от экстремальных значений нагона или сгона [Гидрометеорология..., 1991]. По данным наблюдений [Волкова, Овсянников, 1978; Доценко, Иванов, 2013], размахи сейшевых колебаний уровня моря могут достигать в Ейске, Геническом, Приморско-Ахтарске 50 см, в Таганроге – 70 см.

Время затухания сейшевых колебаний изменяется в широких пределах (от 2 до 8 суток [Гидрометеорология..., 1991]) и существенно зависит от характера возмущений. В силу этого наводнение, вызванное подъемом уровня моря, или понижение уровня в портах и судоходных каналах, являющееся результатом сгона, может повториться неоднократно после прекращения действия возмущающих сил. Таким образом, нахождение периодов и пространственной структуры сейш Азовского моря, а также условий, при которых генерируется та или иная мода сейш, является весьма важным.

Начало исследованиям сейшевых колебаний в Азовском море положила работа [Курчатов, 1925], в которой И. В. Курчатов вычислил период одноузловой сейши Азовского моря, равный 23 ч. Также в этой работе проведен анализ записей с мареографов, расположенных в Ейске и Темрюке, за июнь–август 1924 г. В результате выделен период колебаний, равный 24,5 ч. Интенсивные сейши с этим периодом имеют место и в Темрюке и Ейске. При этом фазы колебаний сдвинуты на 180° друг относительно друга. Амплитуда колебаний уровня моря была больше в Ейске, чем в Темрюке, и достигала 80 см. В среднем амплитуды сейш в Ейске составляют 30–40 см, в Темрюке – около 25 см. Кроме того, в указанной работе на основе анализа мареограмм делается вывод о наличии в Темрюке сейш с периодом 6–7 ч, характерных для юго-западной части моря.

В публикации [Герман, 1970] обработаны и проанализированы данные наблюдений за 1967–1968 годы для пунктов Геническ, Бердянск, Мариуполь, Кривая коса, Перебойный,

Ейск, Должанская, Ясенская переправа, Приморско-Ахтарск, Темрюк и Мысовое с интервалом дискретности 3 или 6 часов в зависимости от пункта. Анализ функций спектральной плотности показал, что наряду с двухсуточной волной в Азовском море существует сложная система волн с периодами 24, 15 и 12,5 ч. Колебания с периодом 24 ч прослеживаются во всех рассмотренных пунктах побережья, за исключением Должанской. Составляющие с периодами около 15 и 12,5 ч проявляются в виде небольших пиков функций спектральной плотности колебаний уровня для пунктов Геничesk, Приморско-Ахтарск, Темрюк и Мысовое.

В работе [Волкова, Овсянников, 1978] на основе анализа рядов ежедневных четырехсрочных наблюдений на станциях Темрюк, Приморско-Ахтарск, Ейск, Бердянск и Геничesk получены значения амплитуд сейш и периоды младших мод. При этом колебания уровня моря для каждой рассмотренной станции показали четко выраженную 24-часовую периодичность. Установлено, что суточные колебания наиболее ярко проявляются летом и практически отсутствуют зимой. Это свидетельствует об их связи с бризовыми ветрами. Суточные колебания уровня моря наиболее интенсивны в Ейске, Геничesке, Приморско-Ахтарске, где их размахи лежат в пределах 50 см, и в Таганроге – до 70 см. Наименьшие размахи колебаний имеют место в Бердянске и Темрюке (20–30 см). Кроме пика на 24 ч на графиках спектральной плотности, приведенных в этой работе, выделяются также пики на периодах 15–16 ч и около 8 ч.

Имеется ряд работ, посвященных исследованию сейш Азовского моря на основе математического моделирования. В [Иванов и др., 1994] с помощью конечно-элементной численной модели [Манилюк, Черкесов, 1994] решается задача о собственных колебаниях бассейна Азовского моря без учета вращения Земли. В ней получены следующие собственные периоды: 27,9; 16,3; 12,5; 10,9; 8,7; 8,2; 7,4; 6,5; 6,1; 5,9; 5,5 ч, а также соответствующие им собственные функции, определяющие пространственную структуру колебаний уровня моря. В [Манилюк, Черкесов, 2016] на основе аналитического решения без учета вращения Земли получены собственные периоды для ограниченного бассейна, представляющего приближенную модель Азовского моря: 25,3; 14,0; 12,6; 12,3; 9,4; 7,0; 6,8; 6,3 ч.

Разнообразные численные модели, в которых сейши Азовского моря представляются в виде колебаний воды, происходящих после

прекращения действия того или иного вида атмосферных возмущений, позволяют получить решения задачи с учетом влияния силы Кориолиса. Так, в [Еремеев и др., 2000] с помощью модели, разработанной в отделе теории волн Морского гидрофизического института, учитывающей вращение Земли, исследовано влияние направления и скорости перемещения над Азовским морем типичных мелкомасштабных циклонов на генерацию в нем сейш. Установлено, что в результате прохождения над морем мелкомасштабных типичных циклонов возбуждаются сейшевые колебания следующих периодов: 27,0; 16,3; 14,5; 11,0; 8,5; 7,2 ч и выделены условия возникновения указанных мод. В работах, выполненных в Южном научном центре РАН [Матишов и др., 2008; Матишов, Инжебейкин, 2009; Инжебейкин и др., 2011], на основе современных данных о морфометрических характеристиках моря с помощью двумерной численной гидродинамической модели, базирующейся на теории мелкой воды, учитывающей вращение Земли, исследованы собственные колебания уровня Азовского моря. Получены частотные и пространственные характеристики первых пяти мод осцилляций уровня Азовского моря, соответствующие сейшевым колебаниям с периодами 38,4; 23,7; 12,1; 8,8; 5,1 ч. В работе, выполненной в Государственном океанографическом институте им. Н. Н. Зубова [Филиппов, 2012], проведено гидродинамическое моделирование длинноволновых колебаний на основе решения системы уравнений мелкой воды с учетом влияния силы Кориолиса. В качестве возмущения использовались поля постоянного ветра северного или восточного направлений. Получены оценки периодов сейшевых колебаний, остающихся после прекращения действия ветра, проанализирована их пространственная структура. Выделены следующие периоды сейшевых колебаний: 23,0; 15,0; 8,2; 7,5; 6,0 ч.

Также на основе модели длинных волн в работе [Сабурин, Елизарова, 2017] приведены результаты расчетов для западного и южного ветров со скоростью 15 м/с и продолжительностью 10 ч. Исследовано влияние силы трения о дно на параметры сейш. Показано, что она практически не влияет на величины периодов колебаний, но приводит к значительному (в 5–6 раз) уменьшению времени их затухания. После воздействия западного ветра выделены сейши с периодом 15,5–15,8 ч, которые наиболее заметны в Бердянске, Таганроге, Геничesке. После прекращения воздействия южного ветра возникает сейша с периодом 6,2–6,5 ч, с наибольшей интенсивностью проявляющаяся

в Темрюке и Бердянске. В Таганроге имеет место более сложная картина осцилляций, обусловленная сложением колебаний разных частот. Также в этой работе отмечается, что происходит вращение сейш против часовой стрелки, при этом полный оборот совершается за 24–25 ч.

В статье [Демышев и др., 2017] с использованием модели POM изучалось влияние продолжительного восточного ветра на колебания уровня и течения, возникающие после прекращения действия возмущающих сил. На прибрежных станциях выделены периоды 15–16 ч, а в центральной части моря – 13–16,5 ч. В работе [Корженовская и др., 2022] приводятся результаты исследований спектра длинноволновых колебаний уровня Азовского моря на основе данных натурных наблюдений. Выделены следующие периоды собственных колебаний, наблюдаемые практически на всех прибрежных станциях: 22,5; 14,1; 6,7; 3,2 ч. Результаты численного моделирования, основанного на решении задачи на собственные значения, дали следующие периоды собственных колебаний бассейна: 23,5; 13,9; 11,2; 9,6; 8,7; 7,5; 6,6; 5,8 ч. Численное моделирование на основе POM для эксперимента с заданием полей ветра и давления из реанализа и эксперимента с использованием модельного ветра дало несколько различающиеся на низких частотах периоды: 24,2; 14,7; 9,9; 3,4 ч в первом случае и 25,3; 14,6; 10,8; 7,6; 5,0 и 3,7 ч во втором случае. Имеющиеся незначительные различия в периодах с результатами решения задачи на собственные значения, по мнению авторов работы [Корженовская и др., 2022], могут быть объяснены учетом вращения Земли в POM.

Таким образом, имеется значительное количество публикаций, посвященных исследованию сейш в Азовском море, но до настоящего времени влияние силы Кориолиса на них остается практически неизученным. Ниже с использованием математического моделирования делается попытка внести ясность в этот вопрос.

Математическая модель и численные эксперименты

Исследование сейшевых колебаний в Азовском море проводилось с помощью модели ADvanced CIRCulation (ADCIRC) [Luettich et al., 1992; Luettich, Westerink, 2004]. Это конечно-элементная нелинейная модель мелкой воды, широко используемая для исследования гидродинамических процессов в океанах, морях,

заливах и эстуариях. Одно из основных ее применений – моделирование полей уровня воды и течений в прибрежной зоне, вызванных приливами и различными метеорологическими воздействиями [Westerink et al., 2008; Sebastia et al., 2014; Garzon, Ferreira, 2016; Colvin et al., 2018; Pavlova et al., 2020; Shashank et al., 2021]. Модель применялась и к Азовскому морю для расчета штормовых нагонов и наводнений в дельте реки Дон [Fomin et al., 2018] и дельте реки Кубань [Фомин и др., 2018]. Также имеется серия статей [Манилюк, Черкесов, 2016; Манилюк и др., 2020а, б, 2021, 2023], в которых с помощью ADCIRC изучаются сейшевые колебания в системах связанных бухт.

В настоящем исследовании использовалась конфигурация ADCIRC из работы [Фомин, Полозок, 2013]. Неструктурированная расчетная сетка, состоящая из 10 835 треугольных конечных элементов, покрывала Азовское море, Керченский пролив и часть Черного моря. В качестве атмосферного форсинга использовался ветер на высоте 10 м. Ветровое напряжение рассчитывалось с использованием квадратичного закона сопротивления Гарратта [Garratt, 1977]. Коэффициент аэродинамического сопротивления задавался линейной функцией скорости ветра. Для расчета придонных касательных напряжений использовалась квадратичная зависимость от скорости течений с гибридной аппроксимацией коэффициента трения [Фомин, Полозок, 2013].

В модельных расчетах сток рек не учитывался. Уровень моря на южной открытой границе расчетной области определялся с помощью условия излучения [Luettich, Westerink, 2004]. Горизонтальная вязкость не включалась. Шаг интегрирования по времени составлял 3 с. Расчеты проводились в режиме параллельных вычислений с использованием технологии Message Passing Interface (MPI).

Моделирование сейшевых колебаний в Азовском море проводилось для южного (Ю), юго-восточного (Ю-В), юго-западного (Ю-З), западного (З), восточного (В), северного (С), северо-восточного (С-В) и северо-западного (С-З) ветров со скоростями 15 м/с. Ветер действовал на протяжении 12 ч, после чего расчет выполнялся в режиме свободных колебаний, происходивших на временном интервале длительностью 168 ч (7 суток). Временные ряды колебаний уровня моря анализировались начиная с момента времени $t = 24$ ч для восьми прибрежных станций: Геническ, Бердянск, Мариуполь, Таганрог, Должанская, Приморско-Ахтарск, Темрюк, Мысовое (рис. 1).

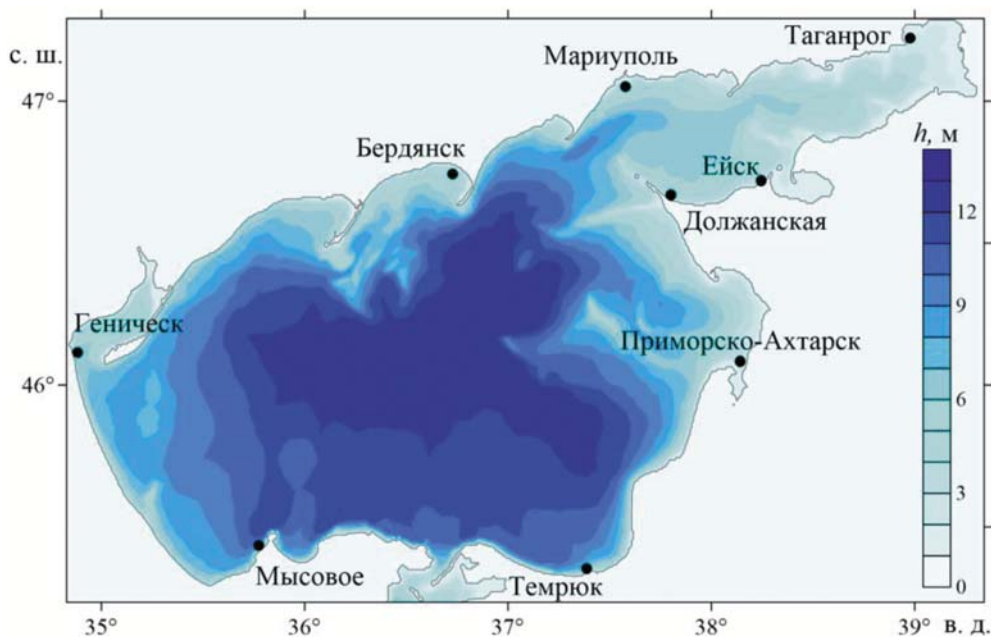


Рис. 1. Азовское море. Расположение береговых станций, в которых анализировались рассчитанные колебания уровня

Fig. 1. Sea of Azov. Location of the coastal stations where the calculated level oscillations were analyzed

Результаты и обсуждение

В таблице приведены рассчитанные максимальные отклонения уровня моря для свободных колебаний, происходящих на протяжении 6 суток начиная от момента времени $t = 12$ ч после прекращения действия ветра. Как видно, наибольшее влияние на амплитуды сейш вращение Земли оказывает в Темрюке, где с учетом вращаения Земли максимальные отклонения уровня увеличиваются для всех рассмотренных случаев на 23–50 % в зависимости от направления ветра. При воздействии З и В ветров влияние вращаения Земли в данном пункте наиболее существенное. Аналогичная картина отмечается в Должанской, где во всех рассмотренных случаях учет силы Кориолиса приводит к увеличению максимальных отклонений уровня на 11–42 % в зависимости от направления ветра. Наибольшее влияние вращаения Земли имеет при воздействии С-З и Ю-В ветров. В Мысовом учет силы Кориолиса также приводит к увеличению максимальных отклонений уровня моря во всех рассмотренных случаях (наибольшее значение составляет 40 % при воздействии С-З и Ю-В ветров), за исключением сейш, вызванных действием З и В ветров, когда данный эффект не проявляется. В Мариуполе, напротив, в большинстве рассмотренных случаев

учет вращаения Земли приводит к ослаблению сейш (максимально – до 29 %, когда действуют С и Ю ветры), за исключением случаев воздействия З и В ветров, при котором влияние силы Кориолиса отсутствует.

В Геничеське, Бердянске, Таганроге, Приморско-Ахтарске учет силы Кориолиса может приводить как к усилению сейшевых колебаний, так и к их ослаблению, в зависимости от направления вызвавшего их ветра. Из указанных пунктов наиболее выражено учет влияния вращаения Земли имеет место в Бердянске, где приводит к увеличению или уменьшению максимальных отклонений уровня моря до 44 % в зависимости от направления ветра.

Наиболее слабо влияние вращаения Земли на максимальные отклонения уровня выражено в Геничеське (не превышает 13 %), расположенном на северо-западной окраине моря в Утлюкском лимане. В Таганроге, находящемся на северо-восточной окраине моря в вершине Таганрогского залива, учет влияния вращаения Земли также не приводит к значительным изменениям максимальных отклонений уровня моря – они не превышают 21 %, хотя в данном пункте имеют место их наибольшие абсолютные значения.

Отметим, что при действии ветров с одинаковыми параметрами, но имеющих противоположные направления, получаются равные значения максимальных отклонений уровня моря

Максимальные отклонения уровня моря (см), рассчитанные в режиме свободных колебаний, в зависимости от направлений вызвавших их ветров

Maximum sea level deviations (cm), calculated in the free oscillation mode, depending on the wind directions that caused them

Пункт Coastal point	Направление ветра Wind direction							
	З W	С-З NW	Ю-З SW	С N	Ю S	В E	С-В NE	Ю-В SE
Геническ Genichesk	18/17 -6%	13/13 0%	17/15 -13%	8/9 11%	8/9 11%	18/17 -6%	17/15 -13%	13/13 0%
Бердянск Berdyansk	5/9 44%	10/9 -11%	13/9 -44%	18/16 -13%	18/16 -13%	5/9 44%	13/9 -44%	10/9 -11%
Мариуполь Mariupol	7/7 0%	7/6 -17%	10/9 -10%	9/7 -29%	9/7 -29%	7/7 0%	10/9 -10%	7/6 -17%
Таганрог Taganrog	18/25 18%	16/14 -14%	22/28 21%	12/10 -17%	12/10 -17%	18/25 18%	22/28 21%	16/14 -14%
Должанская Dolzhanskaya	7/9 22%	7/12 42%	8/9 11%	6/7 14%	6/7 14%	7/9 22%	8/9 11%	7/12 42%
Приморско-Ахтарск Primorsko-Akhtarsk	11/15 27%	10/10 0%	17/16 -6%	14/9 -36%	14/9 -36%	11/15 27%	17/16 -6%	10/10 0%
Темрюк Temryuk	6/12 50%	11/16 31%	7/10 30%	10/13 23%	10/13 23%	6/12 50%	7/10 30%	11/16 31%
Мысовое Mysovoe	8/8 0%	6/10 40%	9/10 10%	8/10 20%	8/10 20%	8/8 0%	9/10 10%	6/10 40%

Примечание. В числителе через косую черту приведены соответственно отклонения уровня, рассчитанные без учета и с учетом силы Кориолиса. В знаменателе – относительные увеличения или уменьшения (со знаком минус) максимальных отклонений уровня, вызванные учетом силы Кориолиса.

Note. The numerator shows the level deviations calculated with and without the Coriolis force, respectively, through a slash. The denominator shows the relative increases or decreases (with a minus sign) of the maximum level deviations caused by the Coriolis force.

в режиме свободных колебаний, происходящих после завершения переходных процессов. При анализе из временных рядов колебаний уровня были удалены интервалы длительностью 24 ч от начала прекращения действия ветра и рассматривается только процесс установившихся свободных колебаний. Данный результат можно объяснить тем, что воздействие на акваторию моря ветров с одинаковыми параметрами, но противоположных направлений вызывает схожие отклики колебательной системы, только колебания будут происходить в противофазе. Об этом свидетельствуют результаты анализа мареограмм, проведенного нами вне рамок данной статьи.

Рассмотрим особенности сейшевых колебаний для пунктов, расположенных на побережьях двух видов: проходящих в зональном и меридиональном направлениях. У Азовского моря их протяженность отличается примерно в 2 раза (зональное длиннее, рис. 1). На рис. 2 и 3 для пунктов Бердянск (побережье, проходящее в зональном направлении) и Приморско-Ахтарск (побережье, проходящее в меридиональном направлении) приведены мареограммы для режима свободных колебаний, вызванных

воздействием ветров разных румбов, рассчитанные с учетом и без учета вращения Земли. Отсчет времени начинается через 24 ч после прекращения действия ветра, когда все переходные процессы завершены. Видно, что направление ветра, действующего на акваторию, и учет вращения Земли оказывают существенное воздействие на параметры сейшевых колебаний в Азовском море.

Сейши, порожденные воздействием З и Ю-З ветров с учетом и без учета силы Кориолиса, в Бердянске имеют противофазный характер (рис. 2, а, б). Сейшевые колебания, сгенерированные С ветром, сначала имеют противофазный характер (рис. 2, с), затем перестраиваются на протяжении ~ 1,5 суток и становятся синфазными, после чего через ~ 1,5 суток снова возвращаются к противофазной структуре. Сейши, возбуждаемые С-З ветром, имеют более сложный характер, обусловленный наличием нескольких мод, сопоставимых по интенсивности (рис. 2, д). На начальном этапе колебания уровня моря близки к синфазным, затем с $t \sim 36$ ч они становятся противофазными, а с $t \sim 72$ ч – снова синфазными. При этом заметно, что в случае

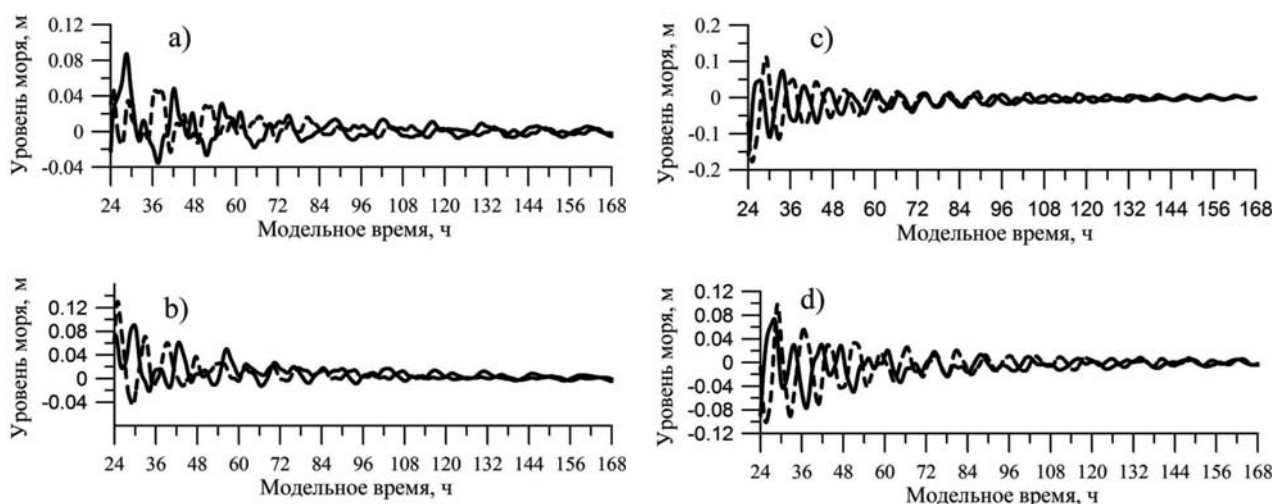


Рис. 2. Мареограммы в пункте Бердянск, рассчитанные с учетом (сплошная линия) и без учета (пунктирная линия) вращения Земли, для режима свободных колебаний. Здесь и на рис. 3: а) колебания, происходящие после прекращения действия западного ветра, б) юго-западного, с) северного, d) северо-западного

Fig 2. Mareograms at the point of Berdyansk, calculated taking into account (solid line) and without taking into account (dashed line) the Earth rotation, for the free oscillation mode. Here and in Fig. 3: a) oscillations occurring during the pause of the west wind, b) southwest wind, c) north wind, d) northwest wind

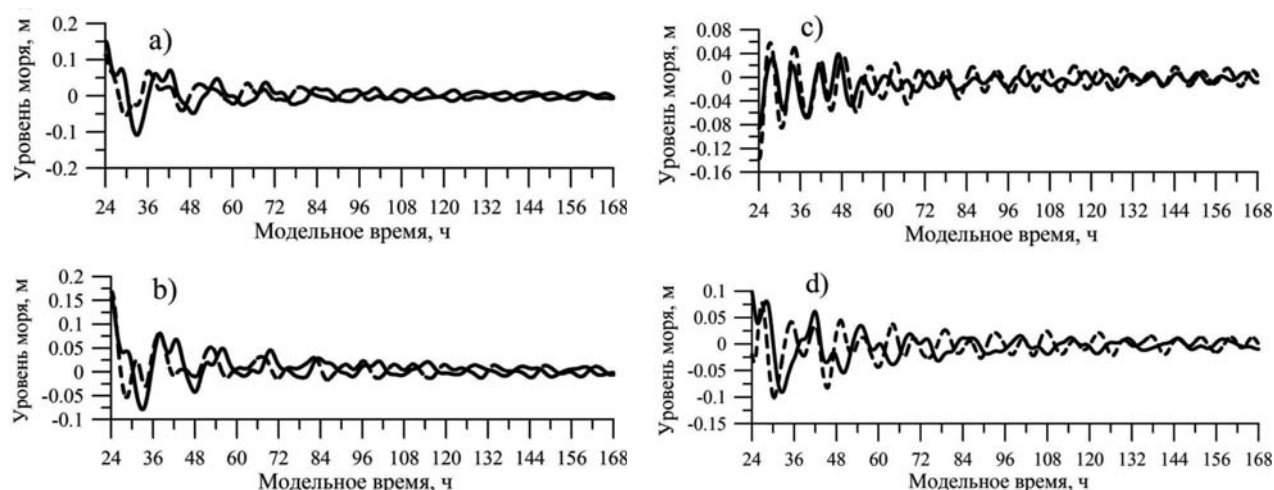


Рис. 3. Мареограммы в пункте Приморско-Ахтарск, рассчитанные с учетом (сплошная линия) и без учета (пунктирная линия) вращения Земли, для режима свободных колебаний

Fig 3. Mareograms at the point of Primorsko-Akhtarsk, calculated taking into account (solid line) and without taking into account (dashed line) the Earth rotation, for the free oscillation mode

с учетом вращения Земли преобладает мода с большим периодом.

На восточном побережье моря для сейшевых колебаний прослеживаются закономерности, аналогичные имеющим место на северном побережье. В Приморско-Ахтарске сейши, порожденные воздействием З и Ю-З ветров с учетом и без учета силы Кориолиса, имеют противофазный характер (рис. 3, а, б). У сейшевых колебаний, вызванных С и С-З ветром,

с течением времени изменяется разность фаз (рис. 3, с, d). При этом заметно, что для сейш, сгенерированных С-З ветром, для случая, когда учитывается вращение Земли, преобладает мода, имеющая больший период, чем для случая без учета вращения.

Таким образом, вращение Земли приводит в Азовском море к возникновению сдвига фаз между колебаниями уровня моря, имеющими место в случае, когда сила Кориолиса

учитывается, и случае без ее учета. При воздействии З и Ю-З ветров сдвиг фаз устойчивый и колебания уровня моря происходят в противофазе, а у сейш, порождаемых действием С и С-З ветров, сдвиг фаз значительно меняется с течением времени и колебания могут происходить как синфазно, так и противофазно.

Отметим также, что сейшевые колебания, имеющие место при учете силы Кориолиса, в целом более интенсивные на начальной стадии процесса, но затухают быстрее, чем колебания без ее учета.

Рассмотрим, как учет силы Кориолиса влияет на спектральный состав и интенсивность сейшевых колебаний, возбуждаемых действием ветра. На рис. 4 и 5 для Бердянска и Приморско-Ахтарска приведены периодограммы для сейшевых колебаний, вызванных ветрами различных направлений. Как показывает анализ этих рисунков, и для Бердянска, и для Приморско-Ахтарска независимо от учета влияния вращения Земли выделяется интенсивный пик

на периоде 14,4 ч. Вращение Земли увеличивает интенсивность данной моды сейш. Этот период (или близкий к нему период, равный 15 ч) установлен многими исследователями на основе как обработки данных натурных наблюдений, так и математического моделирования, включая решения задач на собственные значения и с начальным возмущением (см. выше подраздел «Сведения о сейшах Азовского моря и обзор литературы»). Анализ результатов расчетов показал, что колебание с периодом 14,4 ч проявляется с высокой интенсивностью во всех рассмотренных в данной работе пунктах (рис. 1), как при учете силы Кориолиса, так и без ее учета.

В Бердянке кроме периода 14,4 ч выделяется период 7,5–7,6 ч, полученный при расчетах, когда сила Кориолиса не учитывается, и период, равный 6,9 ч – когда учитывается (рис. 4). При этом мода с периодом 7,5–7,6 ч интенсивнее, чем мода с периодом 6,9 ч. В Приморско-Ахтарске наблюдается аналогичная картина (рис. 5):

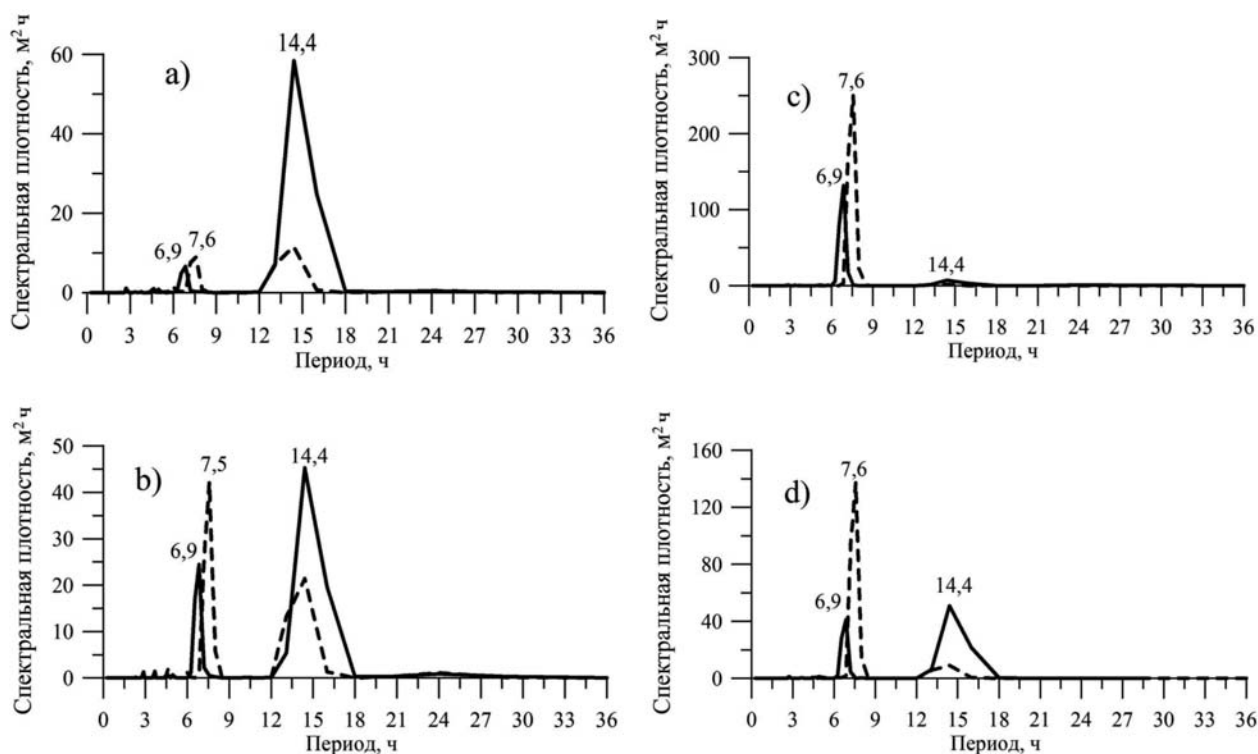


Рис. 4. Периодограммы сейшевых колебаний, вызванных воздействием ветров разных направлений, на северном побережье Азовского моря в пункте Бердянск, рассчитанные с учетом (сплошная линия) и без учета (пунктирная линия) вращения Земли. Здесь и на рис. 5: а) после прекращения действия западного ветра, б) юго-западного, с) северного, д) северо-западного

Fig 4. Periodograms of seiche oscillations caused by the impact of winds of different directions on the northern coast of the Sea of Azov at the point of Berdyansk, calculated taking into account (solid line) and without taking into account (dashed line) the Earth rotation. Here and in Fig. 5: a) during the pause of the west wind, b) southwest wind, c) north wind, d) northwest wind

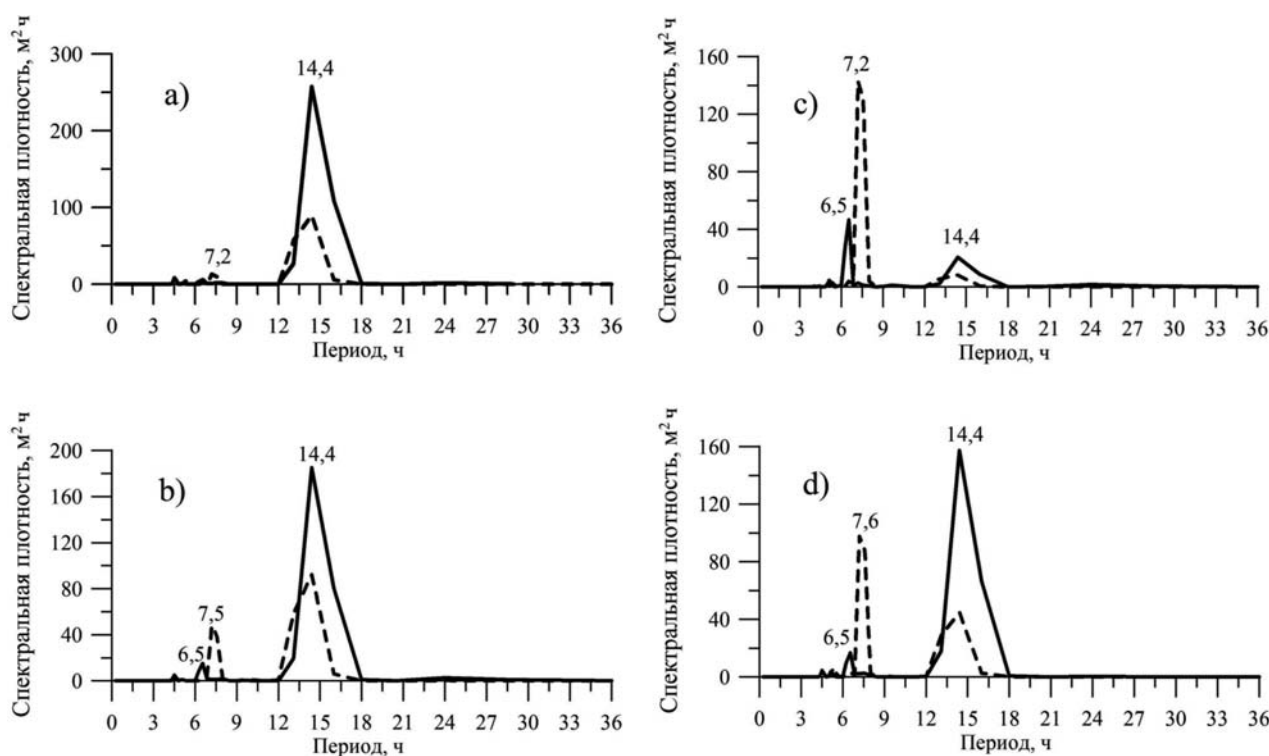


Рис. 5. Периодограммы сейшевых колебаний, вызванных воздействием ветров разных направлений, на северном побережье Азовского моря в пункте Приморско-Ахтарск, рассчитанные с учетом (сплошная линия) и без учета (пунктирная линия) вращения Земли

Fig 5. Periodograms of seiche oscillations caused by the impact of winds of different directions on the northern coast of the Sea of Azov at the point of Primorsko-Akhtarsk, calculated taking into account (solid line) and without taking into account (dashed line) the Earth rotation

высокочастотное колебание с периодом 7,5–7,6 ч, имеющее место без учета силы Кориолиса, интенсивнее, чем мода с периодом 6,9 ч – с ее учетом.

Таким образом, вращение Земли уменьшает интенсивность высокочастотных собственных мод и уменьшает их периоды.

Отметим, что периоды, равные 6,5 и 7,4 ч, получены также в работах [Иванов и др., 1994; Корженовская и др., 2022] при решении задачи на собственные значения без учета силы Кориолиса. Период около 7,5 ч получен в работах [Еремеев и др., 2000; Филиппов, 2012; Сабурин, Елизарова, 2017; Корженовская и др., 2022] при решении задач с разными видами начальных возмущений с учетом силы Кориолиса.

Заключение

С использованием численной модели ADCIRC проведено исследование сейшевых колебаний в Азовском море, возникающих в результате воздействия стационарного ветра, имеющего продолжительность 12 ч и ско-

рость 15 м/с. Рассмотрен отклик моря на действие ветров восьми направлений. Выполнены расчеты с учетом ($f > 0$) и без учета ($f = 0$) влияния силы Кориолиса. Анализом результатов численных экспериментов установлено следующее.

В Должанской, а также в расположенных на южном побережье Азовского моря Мысовом и Темрюке учет влияния вращения Земли в большинстве рассмотренных случаев приводит к увеличению максимальных отклонений уровня моря, достигая в Темрюке 50 %. В Приморско-Ахтарске, а также в расположенных на северном побережье Бердянске и Мариуполе, напротив, в большинстве рассмотренных случаев учет силы Кориолиса приводит к ослаблению сейш, максимально в Бердянске – до 44 %. В Таганроге, находящемся на северо-восточной окраине моря в вершине Таганрогского залива, имеют место наибольшие абсолютные значения отклонений уровня моря, но учет влияния вращения Земли не приводит к значительным изменениям максимальных отклонений уровня – они не превышают 21 %.

В случаях $f > 0$ имеет место сдвиг фаз между колебаниями уровня моря по сравнению со случаями $f = 0$. При воздействии З и Ю-З ветров этот сдвиг фаз устойчивый и колебания уровня моря происходят в противофазе, а у сейш, порождаемых действием С и С-З ветров, сдвиг фаз значительно меняется с течением времени и колебания могут происходить как синфазно, так и противофазно.

В целом сейшевые колебания при $f > 0$ более интенсивны на начальной стадии процесса, но быстрее затухают, чем колебания при $f = 0$.

При всех рассмотренных направлениях ветра как при $f > 0$, так и при $f = 0$ генерируется интенсивная мода сейшевых колебаний с периодом, равным 14,4 ч. Вращение Земли увеличивает интенсивность данной моды. Кроме того, учет силы Кориолиса приводит к генерации более высокочастотных мод с периодами 6,5 или 6,9 ч, чем в случаях без учета вращения: периоды 7,2 или 7,5–7,6 ч. При этом высокочастотные колебания более интенсивны при $f = 0$.

Анализ результатов расчетов показал, что вращение Земли оказывает ощутимое влияние на величины амплитуд, модовый состав, характер движения воды сейшевых колебаний в Азовском море. В данном водоеме необходимо учитывать силу Кориолиса при моделировании сейш.

Литература

- Волкова Г. П., Овсянников А. Н. Некоторые особенности колебаний уровня в Азовском, Черном и Балтийском морях // Труды ГОИН. М.: Гидрометеоздат, 1978. Вып. 137. С. 43–46.
- 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 // Труды ГОИН. М.: Гидрометеоздат, 1970. Вып. 103. С. 52–73.
- Демышев С. Г., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я. Анализ влияния постоянного ветра на скорость течений и сейшевые колебания уровня Азовского моря // Метеорология и гидрология. 2017. № 6. С. 46–54.
- Доценко С. Ф., Иванов В. А. Катастрофические природные явления Азово-Черноморского региона. Севастополь: ЭкоСи-Гидрофизика, 2013. 193 с.
- Еремеев В. Н., Коновалов А. В., Манилюк Ю. В., Черкесов Л. В. Моделирование длинных волн в Азовском море, вызванных прохождением циклонов // Океанология. 2000. Т. 40, № 5. С. 658–665.
- Иванов В. А., Манилюк Ю. В., Черкесов Л. В. О сейшах Азовского моря // Метеорология и гидрология. 1994. № 6. С. 105–110.
- Инжебейкин Ю. И. Особенности формирования кратковременных наводнений и экстремальных течений в Азовском море // Труды Государственного океанографического института. 2011. № 213. С. 91–102.
- Корженовская А. И., Медведев И. П., Архипкин В. С. Сейшевые колебания уровня Азовского моря: наблюдения и численное моделирование // Моря России: Вызовы отечественной науки: Тезисы докладов Всерос. науч. конф. (Севастополь, 26–30 сентября 2022 года). Севастополь: МГИ РАН, 2022. С. 95–97.
- Курчатов И. В. Сейши в Черном и Азовском морях // Известия Центрального гидромет. бюро ЦУМОРА. 1925. Вып. 4. С. 149–158.
- Манилюк Ю. В., Черкесов Л. В. Математическое моделирование сейшевых колебаний в Азовском море методом конечных элементов // Морской гидрофизический журнал. 1994. № 5. С. 3–8.
- Манилюк Ю. В., Черкесов Л. В. Исследование свободных колебаний жидкости в ограниченном бассейне, представляющем приближенную модель Азовского моря // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 2. С. 16–26. doi: 10.22449/0233-7584-2016-2-16-26.
- Манилюк Ю. В., Лазоренко Д. И., Фомин В. В. Исследование сейшевых колебаний в смежных бухтах на примере Севастопольской и Карантинной бухт // Морской гидрофизический журнал. 2020а. Т. 36, № 3. С. 261–276. doi: 10.22449/0233-7584-2020-3-261-276.
- Манилюк Ю. В., Лазоренко Д. И., Фомин В. В. Моделирование сейшевых колебаний в системе севастопольских бухт // Моря России: исследование береговой и шельфовой зон: Тезисы докладов всерос. науч. конф. (XXVIII береговая конференция). Севастополь, 2020б. С. 135–136.
- Манилюк Ю. В., Лазоренко Д. И., Фомин В. В. Сейшевые колебания в системе севастопольских бухт // Водные ресурсы. 2021. Т. 48, № 5. С. 526–536. doi: 10.31857/S0321059621050126.
- Манилюк Ю. В., Лазоренко Д. И., Фомин В. В., Алексеев Д. В. Исследование режимов сейшевых колебаний Севастопольской бухты // Океанология. 2023. Т. 63, № 6. С. 916–926. doi: 10.31857/S0030157423060114.
- Матишов Г. Г., Матишов Д. Г., Инжебейкин Ю. И. Влияние сейш на формирование экстремальных уровней и течений в Азовском море // Вестник Южного научного центра. 2008. Т. 4, № 2. С. 46–61.
- Матишов Г. Г., Инжебейкин Ю. И. Численное исследование сейшевых колебаний уровня Азовского моря // Океанология. 2009. Т. 49, № 4. С. 485–493.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Проект «Моря СССР». Т. V, Азовское море / Под ред. Н. П. Гоптарева и др. СПб.: Гидрометеоздат, 1991. 236 с.
- Океанографическая энциклопедия. Л.: Гидрометеоздат, 1980 (1974?). 304 с.
- Сабурин Д. С., Елизарова Т. Г. Численное моделирование сейшевых колебаний в Азовском море с использованием сглаженных уравнений гидродинамики // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2017. № 2. С. 74–81.
- Филиппов Ю. Г. Свободные колебания уровня Азовского моря // Метеорология и гидрология. 2012. № 2. С. 78–82.

Фомин В. В., Лемешко Е. М., Лазоренко Д. И. Моделирование морских наводнений в дельте реки Кубань // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 1. С. 52–62. doi: 10.7868/S2073667318010069

Фомин В. В., Полозок А. А. Технология моделирования штормовых нагонов и ветрового волнения в Азовском море на неструктурированных сетках // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2013. Вып. 27. С. 139–145.

Colvin J., Lazarus S., Splitt M., Weaver R., Taeb P. Wind-driven setup in east central Florida's Indian River Lagoon: Forcings and parametrizations. *Estuar. Coast Shelf Sci.* 2018. Vol. 213. P. 40–48. doi: 10.1016/j.ecss.2018.08.004

Fomin V. V., Alekseev D. V., Lemeshko E. M., Lazorenko D. I. Simulation and analysis of sea floods in the Don River Delta // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2018. Vol. 43, no. 2. P. 95–102. doi: 10.3103/S106837391802005X

Garratt J. R. Review of drag coefficients over oceans and continents // *Mon. Weather Rev.* 1977. Vol. 105. P. 915–929. doi: 10.1175/1520-0493(1977)105<0915:RODCOO>2.0.CO;2

Garzon J., Ferreira C. Storm surge modeling in large estuaries: Sensitivity analyses to parameters and physical processes in the Chesapeake Bay // *J. Mar. Sci. Eng.* 2016. Vol. 4(3). Art. 45. doi: 10.3390/jmse4030045

Hutter K., Wang Y., Chubarenko I. P. Physics of lakes. Vol. 2: Lakes as Oscillators. Springer, 2011. 646 p.

Kodomari S. On the studies of the periodic motions in a lake (2): Effect of the lake basin shape on the periodic motion // *J. Faculty Sci., Hokkaido Univ., Ser. 7 (Geophysics)*. 1982. Vol. 7, no. 2. P. 185–226.

Luettich R. A., Westerink J. J. Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC Finite Element Model Version 44.XX. 2004. URL: https://www.researchgate.net/publication/240474926_Formulation_and_Numerical_Implementation_of_the_2D3D_ADCIRC_Finite_Element_Model_Version_44XX (дата обращения: 13.03.2025).

Luettich R. A., Westerink J. J., Scheffner N. W. ADCIRC: An Advanced Three-dimensional Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries. Report 1: Theory and Methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. 1992. URL: https://adcirc.org/wp-content/uploads/sites/2255/2018/11/1992_Luettich02.pdf (дата обращения: 13.03.2025).

Manilyuk Yu. V., Cherkosov L. V. The influence of the gulf's geometry on seiche oscillations in an enclosed basin // *Physical Oceanography*. 1997. Vol. 8, iss. 4. P. 217–227. doi: 10.1007/BF02523662

Pavlova A. V., Arkhipkin V. S., Myslenkov S. A. Storm surge modeling in the Caspian Sea using an unstructured grid // *Russ. J. Earth. Sci.* 2020. Vol. 20. ES1006. doi: 10.2205/2019ES000688

Platzman G. W., Rao D. B. The free oscillations of Lake Erie // *Studies on Oceanography* / Ed. K. Yoshida. Tokyo: Univ. Press, 1964. P. 359–382.

Rao D. B. Free gravitational oscillations in rotating rectangular basins // *J. Fluid Mech.* 1966. Vol. 25, iss. 3. P. 523–555. doi: 10.1017/S0022112066000235

Rao D. E., Schwab J. Two dimensional normal modes in arbitrary enclosed basins on a rotating Earth: Application to Lakes Ontario and Superior // *Philos. Trans. R. Soc. A: Mathematical and Physical Sciences*. 1976. Vol. 281, no. 1299. P. 63–96. doi: 10.1098/rsta.1976.0021

Shashank V. G., Manda S., Si S. Impact of varying landfall time and cyclone intensity on storm surges in the Bay of Bengal using ADCIRC model. *J. Earth Syst. Sci.* 2021. Vol. 130. Art. 194. doi: 10.1007/s12040-021-01695-y

Schwab D. J., Rao D. B. Gravitational oscillations of Lake Huron, Saginaw Bay, Georgian Bay, and the North Channel // *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82, iss. 15. P. 2105–2116. doi: 10.1029/JC082i015p02105

Sebastia A., Proft J., Dietrich J. C., Du W., Bedient P. B., Dawson C. N. Characterizing hurricane storm surge behavior in Galveston Bay using the SWAN+ ADCIRC model // *Coastal Engineering*. 2014. Vol. 88. P. 171–181. doi: 10.1016/j.coastaleng.2014.03.002

Westerink J. J., Luettich R. A., Feyen J. C., Atkinson J. H., Dawson C., Roberts H. J., Powell M. D., Dunion J. P., Kubatko E. J., Pourtaheri H. A basin- to channel-scale unstructured grid hurricane storm surge model applied to Southern Louisiana // *Mon. Weather Rev.* 2008. Vol. 136. P. 833–864. doi: 10.1175/2007MWR1946.1

References

Colvin J., Lazarus S., Splitt M., Weaver R., Taeb P. Wind driven setup in east central Florida's Indian River Lagoon: Forcings and parametrizations. *Estuar. Coast Shelf Sci.* 2018;213:40–48. doi: 10.1016/j.ecss.2018.08.004

Demyshev S. G., Cherkosov L. V., Shul'ga T. Y. Analysis of effects of constant wind on the velocity of currents and seiche oscillations in the Azov Sea level. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2017;42(6): 388–393. doi: 10.3103/S1068373917060048

Dotsenko S. F., Ivanov V. A. Catastrophic natural phenomena of the Azov-Black Sea region. Sevastopol': Ecosi-Hydrophysica; 2013. 193 p. (In Russ.)

Eremeev V. N., Konovalov A. V., Manilyuk Yu. V., Cherkosov L. V. Modeling of long waves in the Sea of Azov generated by cyclone propagation. *Oceanology*. 2000;40(5):616–623.

Filippov Yu. G. Natural fluctuations of the Sea of Azov level. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2012;37(2):126–129. doi: 10.3103/S1068373912020082

Fomin V. V., Polozok A. A. Technology of modeling storm surges and wind waves in the Azov Sea on unstructured grids. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa = Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*. 2013;27: 139–145. (In Russ.)

Fomin V. V., Alekseev D. V., Lemeshko E. M., Lazorenko D. I. Simulation and analysis of sea floods in the Don River Delta. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2018;43(2):95–102. doi: 10.3103/S106837391802005X

Fomin V. V., Lemeshko E. M., Lazorenko D. I. Modeling of marine inundations in the Kuban River Delta. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika = Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2018;11(1):52–62. (In Russ.). doi: 10.7868/S2073667318010069

- Garratt J. R. Review of drag coefficients over oceans and continents. *Mon. Weather Rev.* 1977;105:915–929. doi: 10.1175/1520-0493(1977)105<0915:RODCOO>2.CO;2
- Garzon J., Ferreira C. Storm surge modeling in large estuaries: Sensitivity analyses to parameters and physical processes in the Chesapeake Bay. *J. Mar. Sci. Eng.* 2016;4(3):45. doi: 10.3390/jmse4030045
- German V. Kh. Spectral analysis of sea level oscillations in the Azov, Black, and Caspian Seas in the frequency range from one cycle per several hours to one cycle per several days. *Trudy GOIN = Proceedings of State Oceanographic Institute*. Iss. 103. Moscow: Gidrometeoizdat; 1970. P. 52–73. (In Russ.)
- Hutter K., Wang Y., Chubarenko I. P. Physics of lakes. Vol. 2: Lakes as Oscillators. Springer; 2011. 646 p.
- Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. *Proekt «Morya SSSR». T. V. Azovskoe more = Project 'Seas of the USSR'. Vol. V, The Sea of Azov*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat; 1991. 236 p. (In Russ.)
- Inzhebeikin Yu. I. The peculiarities of short-term floods and extremal currents formation in the Azov Sea. *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta = Proceedings of N. N. Zubov State Oceanographic Institute*. 2011;213:91–102. (In Russ.)
- Ivanov V. A., Manilyuk Yu. V., Cherkesov L. V. The Sea of Azov seiches. *Russian Meteorology and Hydrology*. 1994;6:53–57.
- Kodomari S. On the studies of the periodic motions in a lake (2): Effect of the lake basin shape on the periodic motion. *J. Faculty Sci., Hokkaido Univ., Ser. 7 (Geophysics)*. 1982;7(2):185–226.
- Korzhenovskaya A. I., Medvedev I. P., Arkhipkin V. S. Seiche oscillations of the Azov Sea level: observations and numerical modeling. *Morya Rossii: Vyzovy otechestvennoi nauki: Tezisy dokladov Vseros. nauch. konf. (Sevastopol', 26–30 sentyabrya 2022 goda) = Seas of Russia: Challenges of Russian science: Abstracts of the All-Russian scientific conf., (Sevastopol, Sept. 26–30, 2022)*. Sevastopol': MGI RAN; 2022. P. 95–97. (In Russ.)
- Kurchatov I. V. Seiches in the Black and Azov Seas. *Izvestiya Tsentral'nogo gidromet. byuro TsUMORa = Proceed. of the Central Hydrometeorological Bureau of the Central Administration of Maritime Transport*. 1925;4:149–158. (In Russ.)
- Luetlich R. A., Westerink J. J. Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC Finite Element Model Version 44.XX. 2004. URL: https://www.researchgate.net/publication/240474926_Formulation_and_Numerical_Implementation_of_the_2D3D_ADCIRC_Finite_Element_Model_Version_44XX (accessed: 13.03.2025).
- Luetlich R. A., Westerink J. J., Scheffner N. W. ADCIRC: An Advanced Three-dimensional Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries. Report 1: Theory and Methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. 1992. URL: https://adcirc.org/wp-content/uploads/sites/2255/2018/11/1992_Luetlich02.pdf (accessed: 13.03.2025).
- Manilyuk Yu. V., Cherkesov L. V. The influence of the gulf's geometry on seiche oscillations in an enclosed basin. *Physical Oceanography*. 1997;8(4):217–227. doi: 10.1007/BF02523662
- Manilyuk Yu. V., Cherkesov L. V. Simulation of seiche oscillations in the Sea of Azov, using the finite element technique. *Phys. Oceanogr.* 1995;6(5):325–329. doi: 10.1007/BF02197480
- Manilyuk Yu. V., Cherkesov L. V. Investigation of free liquid oscillations in a bounded basin representing an approximate model of the Sea of Azov. *Phys. Oceanogr.* 2016;2:14–23. doi: 10.22449/1573-160X-2016-2-14-23
- Manilyuk Yu. V., Lazorenko D. I., Fomin V. V. Investigation of seiche oscillations in the adjacent bays by the example of the Sevastopol and the Quarantine Bays. *Phys. Oceanogr.* 2020;27(3):242–256. doi: 10.22449/1573-160X-2020-3-242-256
- Manilyuk Yu. V., Lazorenko D. I., Fomin V. V. Modeling of seiche oscillations in the system of Sevastopol bays. *Morya Rossii: issledovanie beregovoi i shel'fovoi zon: Tezisy dokladov vseros. nauch. konf. (XXVIII beregovaya konferentsiya) = Seas of Russia: study of coastal and shelf zones. Abstracts of the All-Russian scientific conf. (XXVIII coastal conference)*. Sevastopol'; 2020. P. 135–136. (In Russ.)
- Manilyuk Yu. V., Lazorenko D. I., Fomin V. V. Seiche oscillations in the system of Sevastopol Bays. *Water Resources*. 2021;48(5):726–736. doi: 10.1134/S0097807821050122
- Manilyuk Yu. V., Lazorenko D. I., Fomin V. V., Alekseev D. V. Study of seiche oscillations regimes in Sevastopol Bay. *Oceanology*. 2023;63(6):796–805. doi: 10.1134/S0001437023060115
- Matishov G. G., Matishov D. G., Inzhebeykin Yu. I. The influence of seiches on the formation of extreme levels and currents in the Sea of Azov. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 2008;4(2):46–61. (In Russ.)
- Matishov G. G., Inzhebeykin Yu. I. Numerical study of the Azov Sea level oscillations. *Oceanology*. 2009;49(4):445–452. doi: 10.1134/S0001437009040018
- Oceanographic encyclopedia*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1980. 304 p. (In Russ.)
- Pavlova A. V., Arkhipkin V. S., Myslenkov S. A. Storm surge modeling in the Caspian Sea using an unstructured grid. *Russ. J. Earth. Sci.* 2020;20:ES1006. doi: 10.2205/2019ES000688
- Platzman G. W., Rao D. B. The free oscillations of Lake Erie. Yoshida K. (ed.). *Studies on Oceanography*. Tokyo: Univ. Press; 1964. P. 359–382.
- Rao D. B. Free gravitational oscillations in rotating rectangular basins. *J. Fluid Mech.* 1966;25(3):523–555. doi: 10.1017/S0022112066000235
- Rao D. E., Schwab J. Two dimensional normal modes in arbitrary enclosed basins on a rotating Earth: Application to Lakes Ontario and Superior. *Philos. Trans. R. Soc. A: Mathematical and Physical Sciences*. 1976;281(1299):63–96. doi: 10.1098/rsta.1976.0021
- Saburin D. S., Elizarova T. G. Numerical modeling of seiche oscillations in the Sea of Azov using smoothed hydrodynamic equations. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa = Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*. 2017;2:74–81. (In Russ.)

Schwab D. J., Rao D. B. Gravitational oscillations of Lake Huron, Saginaw Bay, Georgian Bay, and the North Channel. *J. Geophys. Res.* 1977;82(15):2105–2116. doi: 10.1029/JC082i015p02105

Sebastia A., Proft J., Dietrich J. C., Du W., Bedient P. B., Dawson C. N. Characterizing hurricane storm surge behavior in Galveston Bay using the SWAN+ ADCIRC model. *Coastal Engineering*. 2014;88:171–181. doi: 10.1016/j.coastaleng.2014.03.002

Shashank V. G., Manda S., Si S. Impact of varying landfall time and cyclone intensity on storm surges in the Bay of Bengal using ADCIRC model.

J. Earth Syst. Sci. 2021;130:194. doi: 10.1007/s12040-021-01695-y

Volkova G. P., Ovsyannikov A. N. Some features of level fluctuations in the Azov, Black and Baltic Seas. *Trudy GOIN = Proceedings of State Oceanographic Institute*. Iss. 137. Moscow: Gidrometeoizdat; 1978. P. 43–46. (In Russ.)

Westerink J. J., Luettich R. A., Feyen J. C., Atkinson J. H., Dawson C., Roberts H. J., Powell M. D., Dunion J. P., Kubatko E. J., Pourtaheri H. A basin- to channel-scale unstructured grid hurricane storm surge model applied to Southern Louisiana. *Mon. Weather Rev.* 2008;136:833–864. doi: 10.1175/2007MWR1946.1

Поступила в редакцию / received: 15.08.2024; принята к публикации / accepted: 08.11.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Манилюк Юрий Владимирович

канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник отдела теории волн

e-mail: uvmsev@yandex.ru

Фомин Владимир Владимирович

д-р физ.-мат. наук, заведующий отделом вычислительных технологий и математического моделирования

e-mail: fomin.dntmm@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Manilyuk, Yuri

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher

Fomin, Vladimir

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of Department of Computing Technologies and Mathematical Modeling