

Научная статья

УДК 551.46.0+551.461+551.468

EDN: RSBWFT

Климатические спектры колебаний скоростей течений и уровня Азовского моря по данным численного моделирования

Б. В. Дивинский , С. Б. Куклев

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

 *divin@ocean.ru*

Поступила в редакцию 26.01.2026; одобрена после рецензирования 07.02.2026;
принята к публикации 20.05.2026.

Аннотация

Цель работы – анализ спектральной структуры колебаний скорости течений и возвышений уровня на акватории Азовского моря за климатический период, выявление пространственных и сезонных особенностей этих колебаний в мезомасштабном и синоптическом диапазоне (от часов до десятков суток), а также оценка внутригодовой изменчивости скоростей течений в центральной части моря.

Методы и результаты. Основным методом исследований являлось численное моделирование с применением объединенной гидродинамической модели, учитывающей взаимосвязь ветрового волнения, течений и уровня в условиях мелкого моря. Модель верифицирована по натурным данным. Расчеты гидродинамических параметров выполнены за 46-летний климатический период (с 1979 по 2024 г.) Выходные данные – трехмерные пространственные поля компонент скоростей морских течений и уровня Азовского моря дискретностью в 1 ч. На основе спектрального анализа выявлены основные периоды колебаний гидродинамических параметров: 0,5; 1; 3,6–4,2; 5,6–7,1 и 13,6–14,8 сут. Энергия колебаний возрастает с периодом, двухнедельные флуктуации наиболее интенсивны. Мощность флуктуаций скоростей течений в поверхностном слое в 2–3 раза выше, чем в придонном. На периодах, превышающих 1 сут, колебания скоростей поверхностных и придонных течений незначительно преобладают весной, колебания уровня максимальны осенью на периодах в 5,6–7,1 и 13,6–14,8 сут, а на периоде 3,6–4,2 сут – весной. Для всех параметров суточные колебания максимальны летом, полусуточные – осенью. Пространственное распределение колебаний уровня имеет четкую зональность: наибольшие амплитуды на периодах больше 3 сут наблюдаются на северо-востоке и юго-западе моря, на суточных – на востоке и западе, на полусуточных – на юго-востоке и северо-западе. В центральной части моря в спектре меридиональной компоненты скорости выделяются два пика: годовой (доминирующий) и полугодовой, в зональной компоненте к ним добавляется период в 0,7 лет (~ 260 сут). Низкочастотные колебания (~ 2 и 4 года) на частотных спектрах выражены слабо.

Выводы. Полученные спектральные характеристики отражают реакцию мелководного Азовского моря на атмосферное воздействие. Пространственно-сезонная изменчивость колебаний может быть использована для верификации гидродинамических моделей и оценки климатической изменчивости течений в регионе.

Ключевые слова: Азовское море, численное моделирование, течения, колебания уровня, климат, спектры

Благодарности: численное моделирование и формирование базы данных гидродинамических параметров выполнена в рамках госзадания ИО РАН № FMWE-2024-0027. Настоящее исследование, включающее постановку задачи, предварительную обработку, анализ массива данных и полученных результатов выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-00104, <https://rscf.ru/project/25-17-00104>.

Для цитирования: Дивинский Б. В., Куклев С. Б. Климатические спектры колебаний скоростей течений и уровня Азовского моря по данным численного моделирования // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 4. С. 611–627. EDN RSBWFT.

Original article

Climatic Spectra of the Fluctuations of Current Velocities and Surface Elevation in the Sea of Azov Based on Numerical Modeling Data

B. V. Divinsky , S. B. Kuklev

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
 divin@ocean.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the study is to analyze the spectral structure of fluctuations in current velocities and sea level elevations in the Sea of Azov over a climatic period, to reveal the spatial and seasonal features of these fluctuations in the mesoscale and synoptic ranges (from hours to dozens of days), as well as to assess the intra-annual variability of current velocities in the central part of the sea.

Methods and Results. The primary research method consisted in numerical modeling which involved a unified hydrodynamic model taking into account the interrelationships between wind waves, currents, and sea level in shallow water conditions. The model was previously verified using the experimentally obtained sea state parameters. The required hydrodynamic parameters were calculated for a 46-year climatic period (1979–2024). The output data consisted of the three-dimensional spatial fields of sea current velocity components and the sea level in the Azov Sea with the 1-h resolution. The main periods of hydrodynamic parameter oscillations – 0.5; 1; 3.6–4.2; 5.6–7.1 and 13.6–14.8 days – were identified based on spectral analysis. The energy of fluctuations increased with the period; two-week fluctuations were the most intense. The power of current velocity fluctuations in the surface layer is 2–3 times higher than that in the bottom one. On the periods exceeding one day, the velocity fluctuations of surface and bottom currents slightly dominated in spring. Whereas the sea level fluctuations on the periods of 5.6–7.1 and 13.6–14.8 days were maximum in fall and on the periods of 3.6–4.2 days – in spring. For all the parameters, diurnal fluctuations were maximal in summer, and semidiurnal ones – in fall. Spatial distribution of sea level fluctuations was of a clear zonality: the highest amplitudes on the periods exceeding 3 days were observed on the northeast and southwest of the sea, on the diurnal periods – on the east and west, and on the semidiurnal ones – on the southeast and northwest. As for the central sea, two peaks were well pronounced in the spectrum of velocity meridional component: the annual (dominant) and semi-annual ones; in the zonal component, the 0.7-year period (~ 260 days) was added to them. In the frequency spectra, the low-frequency fluctuations (~ 2 and 4 years) were weakly pronounced.

Conclusions. The obtained spectral characteristics demonstrate the response of the shallow Sea of Azov to atmospheric forcing. The spatial and seasonal variability of fluctuations can be used both for verifying the hydrodynamic models and assessing the climatic variability of currents in the region.

Keywords: Sea of Azov, numerical modeling, currents, sea level fluctuations, climate, spectra

Acknowledgments: Numerical modeling and formation of a hydrodynamic parameter database were carried out within the framework of state assignment of Shirshov Institute of Oceanology, RAS No. FMWE-2024-0027. The study, including problem formulation, preliminary processing, analysis of the data array and the obtained results, was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-17-00104, <https://rscf.ru/project/25-17-00104>.

Введение

Гидродинамический режим любой морской акватории определяют в первую очередь течения, ветровое волнение и колебания уровня, формируемые под влиянием географического положения объекта, особенностей батиметрии и атмосферных условий. Для Азовского моря наиболее изученными являются колебания свободной поверхности, чему способствовала широкая сеть прибрежных гидрометеостанций, ведущих постоянный мониторинг уровня моря. Библиография исследований по этому вопросу слишком обширна; не умаляя вклада других авторов, отметим работы [1–12]. Благодаря развитию спектральных волновых моделей достаточно хорошо исследован и волновой режим моря [13–18].

Исследования течений Азовского моря, как правило, были посвящены специализированным задачам – анализу особых условий формирования поля течений под воздействием ветров определенных направлений или отдельных штормов¹ [19–23]. В работе [24] обобщены результаты натурных наблюдений, выполненных в 2023–2024 гг., и описаны несколько гидродинамических ситуаций, характеризующих особенности циркуляции Азовского моря, а также выделены приливные компоненты в спектрах колебаний скоростей течений.

В условиях дефицита данных прямых инструментальных измерений параметров течений естественной альтернативой выступает численное моделирование, позволяющее получать продолжительные и непрерывные ряды характеристик морских течений по всей акватории моря. В работе [25] приведены результаты расчетов параметров течений за 45-летний климатический период (с 1979 по 2023 г.) и установлена трехмерная пространственная структура течений Азовского моря.

Основная цель представленной работы – исследование спектральной структуры колебаний скоростей течений и возвышений уровня на мезомасштабном и синоптическом масштабах изменчивости (от часов до десятков суток), анализ пространственных и сезонных особенностей колебаний этих гидродинамических параметров, а также оценка возможных внутри- и межгодовых колебаний скорости течений в центральной части моря.

Материалы и методы

Модель и используемые материалы. Выделим две ключевые морфологические и гидрологические особенности Азовского моря, напрямую влияющие на корректность получаемых результатов численного моделирования: 1) обширные участки мелководья, для которых расчетные значения уровня моря сопоставимы с локальными глубинами; 2) возможность образования ледового покрытия в зимний период.

¹ Понов С. К. Моделирование и прогноз изменений уровня и скорости течений в морях России : дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2018. 300 с.

Первое указанное обстоятельство приводит к взаимосвязанности параметров течений, возвышений уровня и ветрового волнения, что учитывается использованием объединенной гидродинамической модели, в которой характеристики течений рассчитываются с помощью 5-слойной σ -координатной гидродинамической модели *ADCIRC*, ветрового волнения – с применением спектральной волновой модели *MIKE 21 SW*. При этом параметры ветрового волнения определяются с учетом скоростей и направлений течений, а также возвышений уровня моря; поля течений корректируются радиационными напряжениями, возникающими при обрушении волн. Исходные метеорологические поля (скорость ветра, приземное атмосферное давление, концентрация льда) задаются выборкой из массива данных глобального реанализа *ERA5*. Пространственный шаг по широте и долготе составляет $0,125^\circ$, по времени – 3 ч для скоростей ветра и давления, 1 сут – для концентрации льда.

Модель верифицирована по доступным экспериментальным данным наблюдений за параметрами течений, уровнем моря и ветровым волнением, полученным инструментальными методами (датчики давления, измерители течений *ADCP* и «Вектор-2»), а также по спутниковым наблюдениям. Этапы верификации детально изложены в работе [26].

Учет ледового покрытия. Остановимся подробнее на проблеме ледового покрытия, существенно влияющего на поля течений и волнения. Климатические аспекты формирования льда рассматривались во многих работах [27–31]. В частности, эти исследования показали, что:

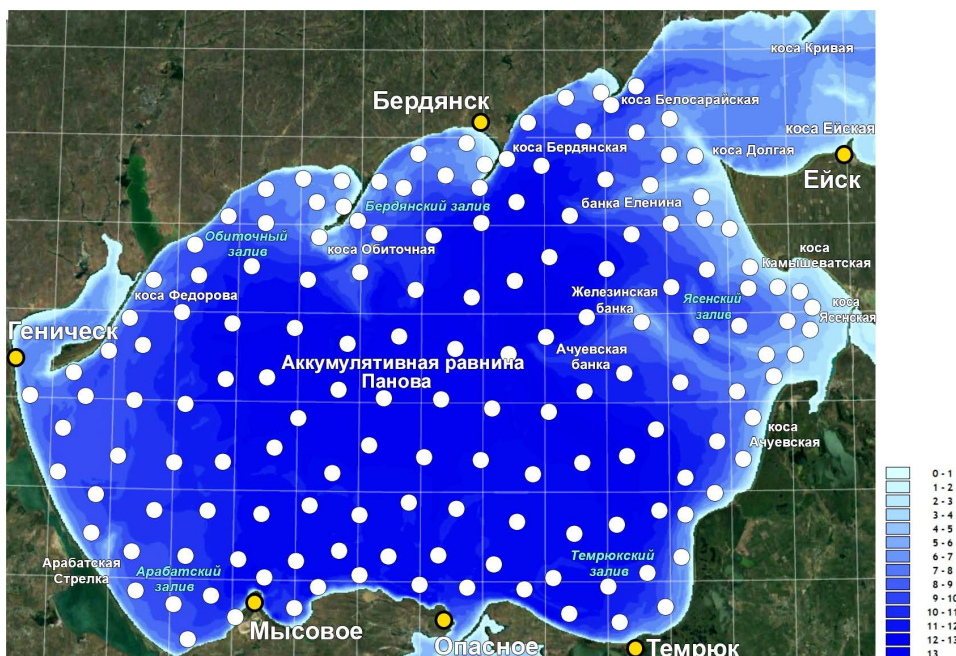
1) карты пространственного распределения льда по акватории моря различаются (порой существенно) в зависимости от способа получения и анализа спутниковой информации. Другими словами, выбор базы данных, используемой при моделировании полей течений, с неизбежностью субъективен, поскольку нет возможности сравнить данные, например, реанализов за определенный конкретный срок с наблюдениями, которые можно было бы признать эталонными (особенно в открытом море). Напомним, что для моделирования нужны хотя бы ежесуточные поля ледового покрытия;

2) для Азовского моря повторяемость суровых зим, определяемых суммарными отрицательными температурами воздуха, составляет 17 % [28]. При этом почти вся акватория покрыта льдом различной сплоченности. В умеренные (повторяемость – 46 %) и мягкие (37 %) зимы ледовый покров сосредоточен, как правило, в Таганрогском заливе и на мелководных участках по периметру моря. Таким образом, лед на акватории Таганрогского залива в зимний период присутствует почти всегда.

Процедуры осреднения полей течений за продолжительный срок менее чувствительны к точности задания исходных данных, допуская пробелы и отсутствие данных в определенные периоды, чем спектральный анализ, требующий непрерывных временных рядов скоростей течений. Поскольку ошибки в исходных полях данных о ледяном покрове наиболее значимы для мелководного Таганрогского залива, а также ввиду возможных неопределенностей в спутниковых реанализах спектральный анализ колебаний скоростей течений и возвышений уровня проведен лишь для точек основного зеркала моря за (условно) безледный период с марта по ноябрь.

Выбор расчетных точек и обработка данных. Расчеты гидродинамических параметров Азовского моря выполнены за 46 лет с 1979 по 2024 г. Выходными расчетными величинами являются трехмерные пространственные поля скоростей течений и возвышений уровня Азовского моря дискретностью в 1 ч.

На акватории моря выбраны 155 расчетных точек (рис. 1), положение которых соответствует глубинам, равным или превышающим 4 м. Для этих точек сформированы 46 временных рядов скоростей течений в поверхностном и придонном слоях, а также возвышений уровня за весь период с марта по ноябрь и отдельно за сезоны (весна, лето, осень) каждого года с 1979 по 2024 г.



Р и с. 1. Положение расчетных точек на акватории Азовского моря
F i g. 1. Location of calculation points in the Sea of Azov

Спектральный анализ. Спектральные оценки получены периодограммным методом Уэлча, реализованным в среде *Matlab*. Этот метод использует весовую функцию для предотвращения растекания спектра и уменьшения смещения получаемой оценки спектральных составляющих, а также разбиение исходного сигнала на перекрывающиеся фрагменты, что увеличивает общее число сегментов и снижает дисперсию оценки.

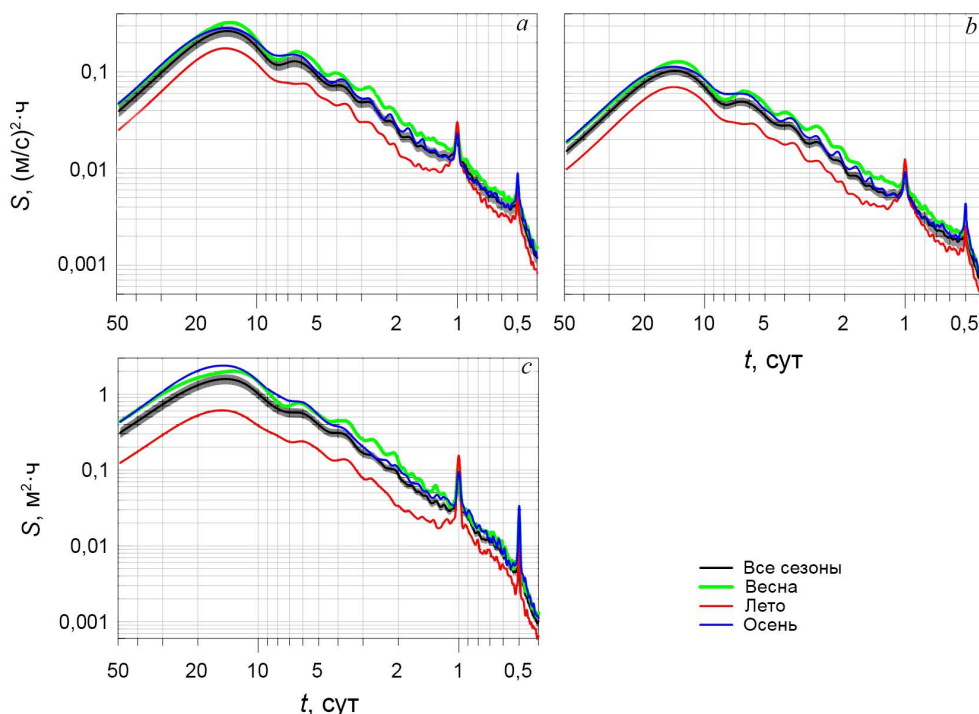
Полученные для каждой точки 46 спектров в дальнейшем осредняются за весь безледный период, а также по каждому сезону, что дает климатические среднегодовые оценки спектральной плотности колебаний скоростей течений и возвышений уровня.

Заметим также, что спектральному анализу, как правило, подвергаются не сами модули скорости, а ее компоненты – либо географические (северная и восточная), либо проекции на вдольбереговую и поперечную к берегу оси. Для локальных задач и конкретных побережий такой подход вполне оправдан, но в нашем случае при рассмотрении всей акватории моря для удобства интерпретации предпочтительнее анализировать именно модули скорости.

Далее под частотными спектрами будем понимать среднегодовые, т. е. климатические, осредненные за 46 лет спектры колебаний гидродинамических параметров.

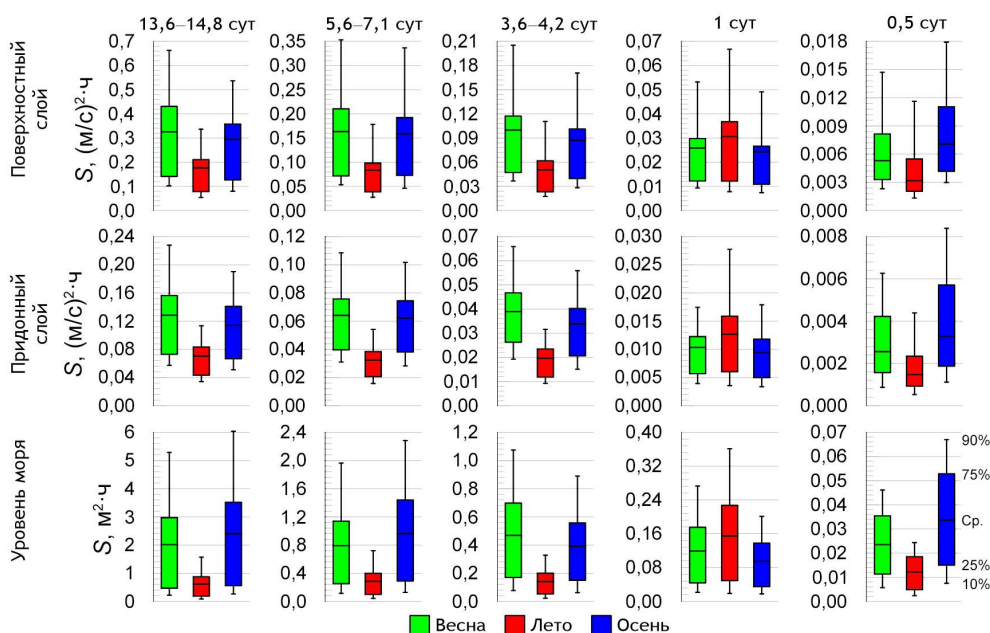
Результаты и обсуждение

На рис. 2, 3 представлены соответственно спектры колебаний скоростей течений в двух рассматриваемых слоях, а также возвышений уровня, осредненные по всем 155 точкам моря.



Р и с. 2. Частотные спектры колебаний скорости течений в поверхностном (а) и придонном (b) слоях, а также колебаний уровня моря (с). Серая область – 95%-ный доверительный интервал
F i g. 2. Frequency spectra of current velocity fluctuations in the surface (a) and bottom (b) layers, as well as sea level fluctuations (c). Gray shading shows the 95% confidence intervals

Как выявил спектральный анализ, мезомасштабная и синоптическая изменчивости характеризуются основными пиками колебаний скоростей течений и возвышений уровня на периодах в 0,5; 1; 3,6–4,2; 5,6–7,1 и 13,6–14,8 сут (рис. 2, 3). Энергия колебаний возрастает с увеличением периода: наиболее интенсивны двухнедельные колебания, наименее – полусуточные, хотя при этом они хорошо выражены. Мощность флуктуаций скоростей течений в поверхностном слое в 2–3 раза выше, чем в придонном.



Р и с. 3. Межгодовые статистические характеристики спектральных плотностей колебаний гидродинамических параметров

F i g. 3. Interannual statistical characteristics of spectral densities of hydrodynamic parameter fluctuations

Суточная и полусуточная гармоника хорошо выражены в **экспериментальных** спектрах колебаний уровня Азовского моря [12, 24]. Такие же колебания обнаружены для Балтийского [32] и Черного [33] морей. Спектры скоростей течений в мировой практике изучены в гораздо меньшей степени, что связано в первую очередь с техническими трудностями проведения долговременных экспериментов. Важное место в истории экспериментальных исследований течений занимают два гидрофизических полигона – Института океанологии РАН (на северо-восточном шельфе Черного моря в районе г. Геленджика) и Морского гидрофизического института (п. Кацивели, Крым). По данным проведенных Институтом океанологии наблюдений за 2016–2023 гг. установлено, что характерные периоды колебаний скоростей прибрежных течений составляют 1; 2,2 и 5 сут [34]. Обработка данных, полученных Морским гидрофизическим институтом в 2002–2023 гг., позволила выделить следующие периоды колебаний скоростей: 0,5; 1; 3,5; 6; 12 сут [35, 36]. На озере Онтарио, США (характерные размеры 300 × 90 км), анализ данных донной станции *ADCP* за апрель – октябрь 2018 г. выявил колебания скоростей течений на периодах 1; 5,2; 6,8 и 10,5 сут [37]. В южной части Каспийского моря на основе данных *ADCP* за 2017–2018 гг. зарегистрированы колебания скоростей периодами в ~ 0,5; 1; ~ 2 и ~ 7 сут [38]. Таким образом, выявленная численными методами для Азовского моря периодичность колебаний гидродинамических параметров характерна для многих водоемов Мирового океана.

Колебания скоростей течений и уровня имеют выраженные сезонные особенности. На рис. 3 приведены диаграммы размаха (так называемые ящики

с усами), характеризующие межгодовые вариации спектральных плотностей колебаний на основных периодах изменчивости отдельно по сезонам.

Диаграммы построены на основе статистической обработки сорока шести спектров, каждый из которых получен осреднением по 155 точкам спектров за конкретный год. Графики показывают среднегодовые значения, а также 10, 25, 75 и 90-й квантили распределений.

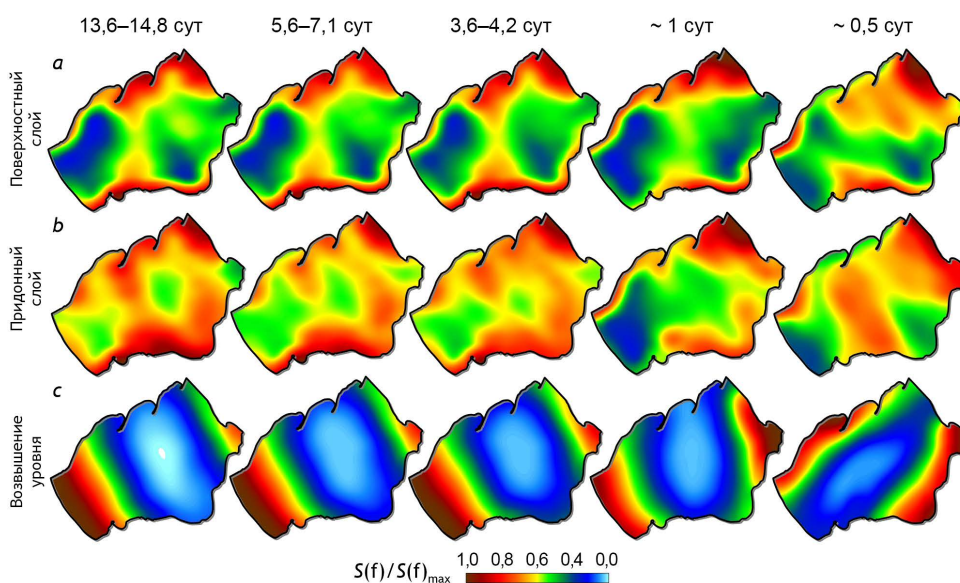
Выделим основные особенности сезонных колебаний в диапазонах мезомасштабной и синоптической изменчивостей (рис. 3):

- в весенний период колебания скоростей поверхностных и придонных течений незначительно преобладают на периодах, превышающих 1 сут (3,6–4,2, 5,6–7,1, 13,6–14,8 сут);
- осенью колебания уровня наиболее развиты на периодах 5,6–7,1 и 13,6–14,8 сут, весной – на периодах 3,6–4,2 сут;
- для скоростей течений и для возвышений уровня летом максимальны суточные колебания, осенью – полусуточные.

Уточним, что форма «ящичков» характеризует межгодовые вариации колебаний: прямоугольники с цветовой заливкой на рис. 3 содержат 50 % выборки, а расстояния между крайними квантилями – 80 %. Хорошо виден существенный межгодовой размах колебаний весной и осенью во всем диапазоне изменчивости. В летний период наибольший межгодовой размах наблюдается у суточных колебаний.

Пространственные распределения **среднегодовых** (за 46 лет) значений спектральной плотности на основных периодах колебаний скоростей течений в поверхностном и придонном слоях, а также возвышений уровня приведены на рис. 4. Из них следует, что максимальные колебания скоростей течений на периодах в сутки и более наблюдаются вдоль северного и южного побережий, а также в полосе, проходящей через центр моря. Эта полоса соответствует западной (для поверхностных течений) и восточной (для придонных) периферии обширного циклона, являющегося ключевой особенностью климатической циркуляции вод Азовского моря. Картина полусуточных колебаний скоростей течений более мозаична и отражает, скорее, реакцию водной среды на быструю смену внешних условий. Пространственные распределения колебаний уровня обнаруживают довольно строгую зональность. Наибольшие амплитуды наблюдаются в противоположных частях моря: на периодах синоптической изменчивости (больше трех суток) – на северо-востоке и юго-западе моря, суточные колебания – на востоке и западе, полусуточные – на юго-востоке и северо-западе. Угол между условными осями, разделяющими эти области для периодов в 13,6–14,8 и 0,5 сут, составляет $\sim 70^\circ$. Таким образом, наблюдаются существенные различия в синоптическом и мезомасштабном откликах акватории Азовского моря на внешнее воздействие.

В условиях мелководного Азовского моря элементы трехмерной циркуляции вод (основные и волновые течения, штормовые нагоны, сейшевые колебания) формируются в основном под влиянием атмосферных условий, а именно параметров ветра и приземного давления. Определенный вклад вносят и другие факторы воздействия (речной сток, стратификация вод и пр.), но их учет требует более расширенной постановки задачи и выходит за рамки настоящей работы.



Р и с. 4. Нормированные на максимальные значения среднегодовые величины энергии спектральных колебаний скоростей течений в поверхностном (а) и придонном (б) слоях и уровня моря (с)

F i g. 4. Annual average values (normalized to maximum ones) of the energy of spectral fluctuations of current velocities in the surface (a) and bottom (b) layers and sea level (c)

Характеристики ветра (скорость и направление) и давления различны в разных районах Азовского моря. Тем не менее для оценок климатической изменчивости метеорологических полей вполне допустимо ограничиться одной точкой в центре моря.

На рис. 5 приведены розы ветров для центра моря за безледный период с 1979 по 2024 г., а также для отдельных сезонов. Розы построены по данным реанализа *ERA5*. Как следует из рис. 5, с марта по ноябрь преобладают ветры северо-восточного направления (25 %), ветер с юго-востока и юга наблюдается довольно редко (4 и 8 % соответственно), повторяемость остальных румбов – ~ 12–13 %. Весной увеличивается повторяемость южных и юго-западных ветров (17 и 13 %). Летом доминирует северо-восточный ветер (почти 30 %), при этом доля ветров с севера (19 %) и северо-запада (14 %) возрастает, а с востока уменьшается (до 7 %). Основная особенность ветрового режима осенью – увеличение переноса с востока (18 % повторяемости) и высокая повторяемость сильных (со скоростями, превышающими 15 м/с) западных и северо-западных ветров. Отметим, что эти результаты согласуются с выводами, приведенными в работе ² и базирующимися на данных реанализа *NCEP/NCAR*.

² Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей / отв. исп. Л. И. Лопатухин [и др.]. Санкт-Петербург : Российский морской регистр судоходства, 2006. 451 с.

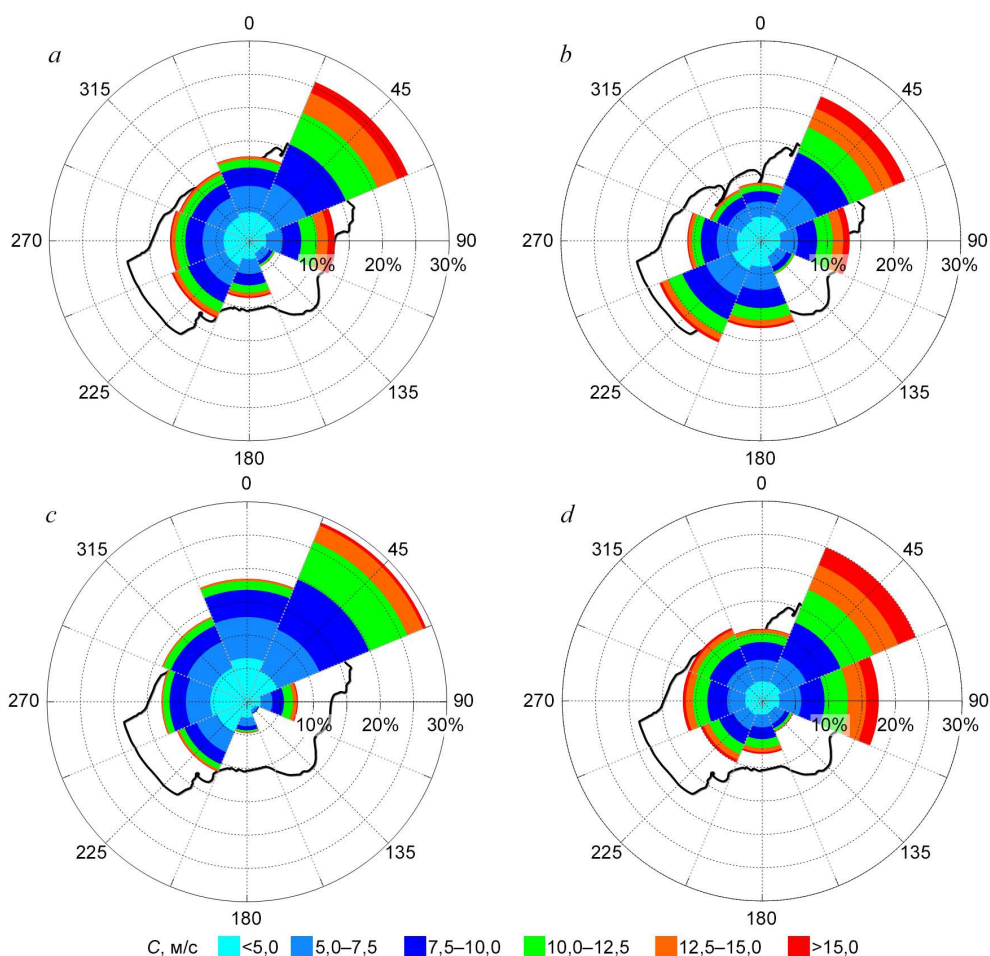
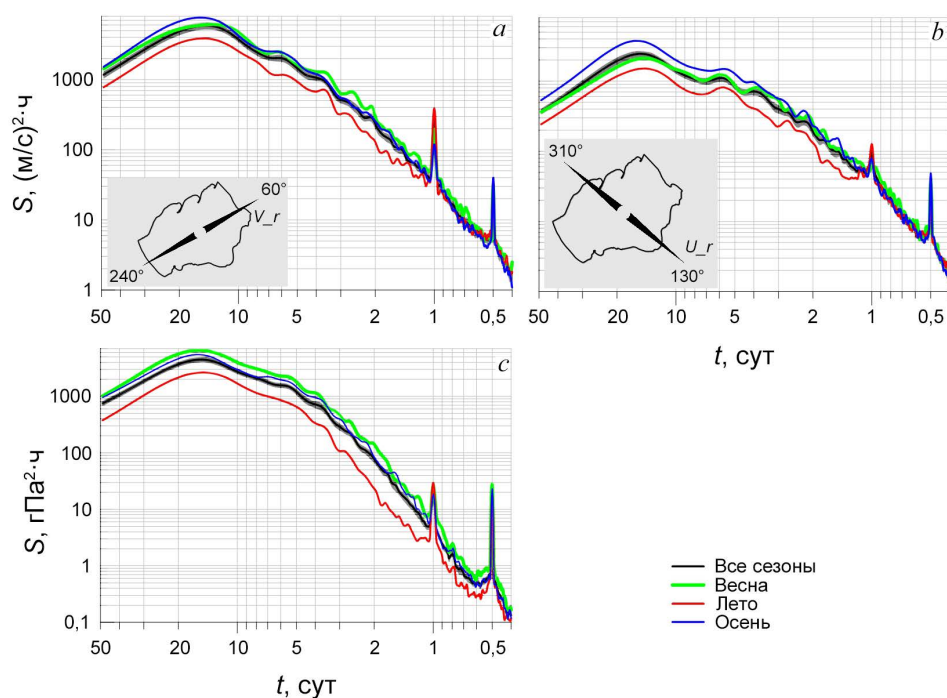


Рис. 5. Климатические розы ветров для центральной части моря: *a* – весь период; *b* – весна; *c* – лето; *d* – осень

Fig. 5. Climatic wind roses for the central sea: *a* – the whole period; *b* – spring; *c* – summer; *d* – fall

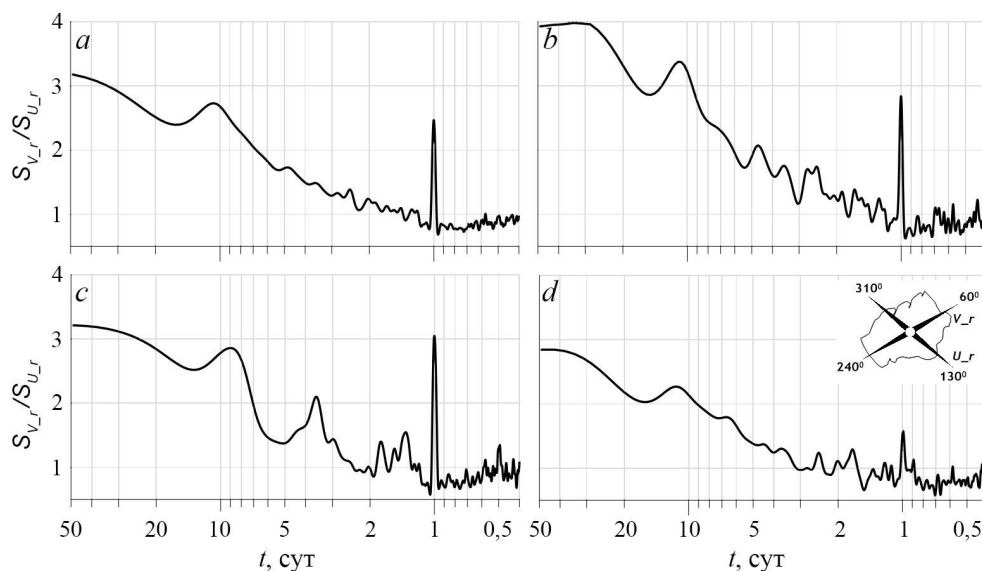
Таким образом, основное ветровое воздействие на акваторию Азовского моря осуществляется по направлениям СВ–ЮЗ и СЗ–ЮВ. С учетом полученных карт распределения энергии колебаний уровня (см. рис. 4, *c*) построим осредненные частотные спектры двух проекций скорости ветра, а также – в качестве дополнения – спектр колебаний приземного давления в центре моря (рис. 6).

Как показывают данные рис. 6, в спектрах скоростей ветра и давления присутствуют все выявленные ранее периоды колебаний, включая суточный и полусуточный циклы, при этом мощность колебаний атмосферного давления на периодах в 1 и 0,5 сут сопоставима. Отметим, что суточная и полусуточная гармоники отчетливо проявляются и в спектрах скоростей ветра южного побережья Крыма [35]. Сопоставление энергии колебаний в направлениях 60–240° и 310–130° представлено на рис. 7, на котором приведены отношения среднегодовых спектральных мощностей колебаний проекций ветра V_r и U_r .



Р и с. 6. Среднегодовые частотные спектры колебаний компонент скорости ветра: проекций на ось 60–240° (V_r) (a) и 310–130° (U_r) (b), а также атмосферного давления (c). Серая область – 95%-ный доверительный интервал

F i g. 6. Annual average frequency spectra of fluctuations of wind speed components: projections onto the axes 60–240° (V_r) (a) and 310–130° (U_r) (b), as well as atmospheric pressure (c). Gray shading shows 95% confidence intervals



Р и с. 7. Отношение амплитуд колебаний компонент скорости ветра: a – весь период; b – весна; c – лето; d – осень

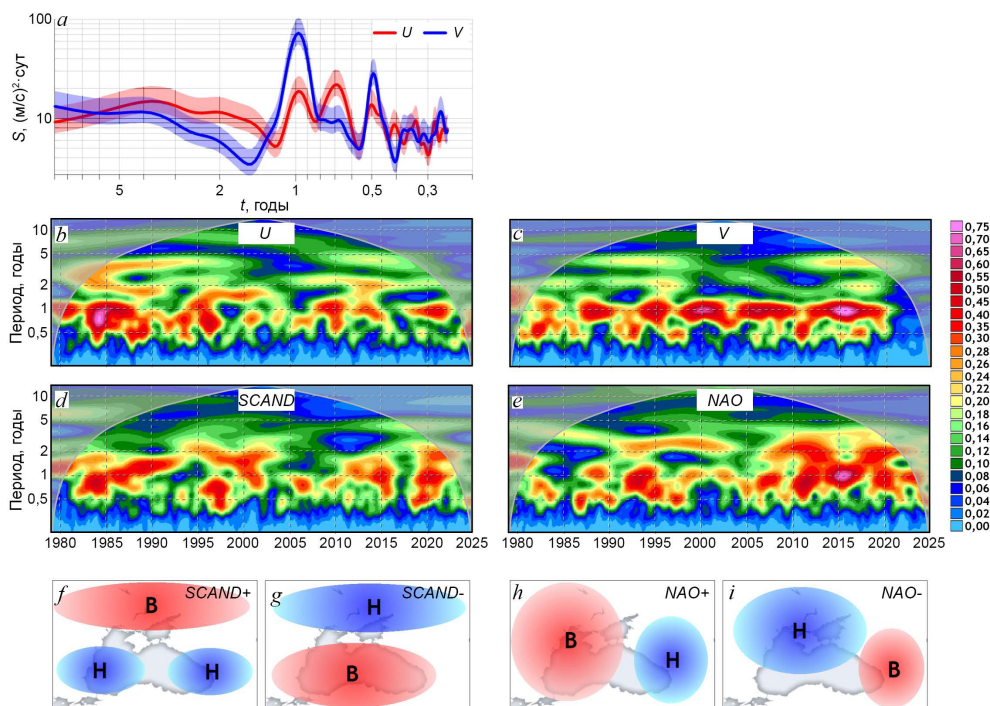
F i g. 7. Ratio of the amplitudes of wind speed component fluctuations: a – the whole period; b – spring; c – summer; d – fall

Как следует из рис. 7, на масштабе синоптических колебаний (периоды больше 2–3 сут) существенно преобладает мощность ветровых потоков по направлению 60–240°, от косы Долгой на северо-востоке моря до Арабатской Стрелки на юго-западе. На периодах, меньших 2 сут, энергия колебаний по направлениям 60–240° и 310–130° соизмерима за исключением суточного цикла. Весной и летом суточные колебания почти полностью определяются потоками с СВ на ЮЗ (рис. 7, *b, c*), осенью это доминирование менее заметно (рис. 7, *d*). Вклад ветров, ориентированных вдоль оси СЗ–ЮВ (310–130°), в полусуточные гармоники превалирует как за весь безледный период, с марта по ноябрь (рис. 7, *a*), так и отдельно весной и осенью (рис. 7, *b, d*); летом доля этих ветров несколько уменьшается. Таким образом, можно заключить, что особенности колебаний скоростей ветра в частотном диапазоне могут служить основой для интерпретации пространственных карт энергий спектральных колебаний уровня (см. рис. 4, *c*) и скоростей течений (см. рис. 4, *a, b*). В целом нужно иметь в виду, что речь идет о гидродинамическом отклике на внешнее возмущение, определяемом не только атмосферными условиями, но и конфигурацией береговой линии и локальной батиметрией.

Накопленный массив расчетных гидродинамических параметров Азовского моря за продолжительный промежуток времени позволяет произвести оценку внутри- и межгодовой изменчивости скоростей течений. Для этого возьмем точку в центре моря и сформируем для нее ряд среднесуточных компонент (восточной и северной) скорости поверхностных течений за 1970–2024 гг. Как уже было сказано, доля суровых зим с ледяным покровом разной интенсивности в центральной части акватории моря не так уж велика. Суточное осреднение и процедура заполнения пропусков авторегрессией позволяет (с долей условности, конечно) получить непрерывные ряды скоростей. Некоторая грубость подхода вполне компенсируется, на наш взгляд, возможностью более широкого взгляда на климатическую изменчивость течений. Представляет также интерес дополнить исследование анализом частотно-временной изменчивости некоторых характеристик глобальной атмосферной циркуляции. Поскольку эти характеристики описывают состояние одного и того же объекта (атмосферы), то они оказываются зачастую взаимосвязанными. В связи с этим выделим два индекса глобальной циркуляции атмосферы в Северном полушарии: Североатлантического (*NAO*) и Скандинавского (*SCAND*) колебаний, ежесуточные значения которых доступны на сайте *NOAA Climate prediction center* (URL: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov>). Выбор индексов определяется тем обстоятельством, что они дают представление о преобладающих меридиональных (*NAO*) и зональных (*SCAND*) потоках воздушных масс над Азовским морем.

На рис. 8 представлены частотные спектры *U*-, *V*-компонент скорости, вейвлет-спектры (скейлограммы) составляющих скорости и индексов, а также в иллюстративной форме положение зон высокого (*B*) и низкого (*H*) атмосферного давления в положительные и отрицательные фазы глобальных колебаний. Несколько комментариев к рисунку: 1) высокая степень нестационарности временных рядов индексов приводит к тому, что обычные частотные спектры их колебаний крайне чувствительны к настроечным параметрам спектров (длинам сегментов, проценту перекрытия окон и пр.), другими словами, частотные спектры колебаний индексов совершенно не показательны, поэтому

не приводятся; 2) скейлограммы отображают значения непрерывного вейвлет-сигнала, при этом цветовая палитра соответствует его мощности; 3) серая область на рис. 8, *b* – *e* – так называемый конус влияния – область краевых эффектов преобразования, результаты для которой могут быть некорректными.



Р и с. 8. Частотные спектры колебаний компонент скорости течений в центре моря (полупрозрачные цветные области соответствуют 95%-ным доверительным интервалам) (*a*), вейвлет-спектры U - (*b*) и V -компонент (*c*) скорости течений, а также индексов атмосферной циркуляции $SCAND$ (*d*), NAO (*e*); схематичное изображение положительных (*f*, *h*) и отрицательных (*g*, *i*) фаз $SCAND$ (*f*, *g*) и NAO (*h*, *i*). Буквами «В» и «Н» обозначены области высокого и низкого значения соответственно

F i g. 8. Frequency spectra of fluctuations of current velocity components in the center of the sea (translucent colored areas correspond to the 95% confidence intervals) (*a*), wavelet spectra of U - (*b*) and V -components (*c*) of current velocity and atmospheric circulation indices $SCAND$ (*d*) and NAO (*e*); schematic representation of the positive (*f*, *h*) and negative (*g*, *i*) phases of $SCAND$ (*f*, *g*) and NAO (*h*, *i*). Letters “B” and “H” indicate the areas of high and low values, respectively

Как следует из рис. 8, в спектре северной (меридиональной) компоненты скорости хорошо выделяются два пика: годовой (доминирующий) и полугодовой. В спектре колебаний восточной (зональной) компоненты присутствуют три максимума с сопоставимой энергией колебаний: к годовому и полугодовому периоду добавляется период в 0,7 лет (~ 260 сут). Более низкочастотные колебания (~ 2 и 4 года) на частотных спектрах проявляются слабо, но при этом выражены на вейвлет-спектрах в отдельные годы, например для U -компоненты в 1982–1992 гг. (рис. 8, *b*), для V - в 2015–2020 гг. (рис. 8, *c*).

Глобальные перестройки в атмосфере – явления слишком сложные, чтобы ожидать высокой степени взаимосвязи между колебаниями скорости течений отдельной сравнительно небольшой водной акватории и индексами атмосферной циркуляции. Например, в работе [39] коэффициент корреляции 0,4 между максимальными высотами волн в Черном море и некоторыми индексами считается вполне приемлемым. Тем не менее в нашем случае индекс *NAO* обнаруживает довольно устойчивый годовой цикл (рис. 8, *e*), отражающийся на годовой гармонике меридиональной компоненты скорости течений (рис. 8, *c*), особенно в десятилетие с 2010 по 2020 г. Напомним: колебания индекса *NAO* для Азовского моря связаны с переносом воздушных масс с севера на юг в положительную фазу и в обратном направлении – в отрицательную (это обобщенная картина, речь не идет о строгой закономерности). В случае выраженного зонального переноса, относительным показателем которого служат флуктуации индекса *SCAND*, усиливаются колебания восточной компоненты скорости – как, например, в периоды 1983–1987 или 2017–2023 гг. (рис. 8, *b, d*). Таким образом, существование годовой ритмики скоростей морских течений Азовского моря, несмотря на все вынужденные допущения, может быть признано вполне вероятным.

Выводы

Из гидродинамических характеристик морей Мирового океана с точки зрения климата наиболее изученными являются уровень моря (благодаря широкой сети натурных наблюдений) и ветровое волнение (в силу относительной простоты его численного моделирования). Морские течения формируются под воздействием комплекса факторов, и их изучение (экспериментальное и численное) сталкивается со множеством трудностей. В связи с этим полузамкнутое мелководное Азовское море представляет собой удобный объект исследований. Используемая в настоящей работе объединенная гидродинамическая модель позволила рассчитать параметры течений за весьма продолжительный период – с 1979 по 2024 г. Нам не известны подобные результаты, полученные для других морей. Отметим важное обстоятельство: модель не гарантирует абсолютного соответствия, например, мгновенных значений скорости течения в конкретной точке измеренным величинам. Речь идет о статистическом (обобщенном) сходстве. Как показали предыдущие исследования, даже в условиях неопределенностей (неучет речного стока, например, и ошибки входных данных о концентрации льда) полученные результаты достаточно хорошо интерпретируются с физической точки зрения.

Основной целью работы был анализ периодов колебаний скоростей течений и возвышений уровня в мезомасштабном и синоптическом диапазонах изменчивостей, а также оценка возможных внутригодовых колебаний скорости в центре моря.

Основные результаты:

1. Мезомасштабная и синоптическая изменчивость характеризуется основными пиками колебаний скоростей течений и возвышений уровня на периодах 0,5; 1; 3,6–4,2; 5,6–7,1 и 13,6–14,8 сут.

2. Энергия колебаний значительно растет с увеличением периода. Наиболее интенсивны двухнедельные колебания, наиболее слабо выражены – полусуточные.

3. Мощность флуктуаций скоростей течений в поверхностном слое в 2–3 раза превышает аналогичные колебания в придонном.

4. На периодах, превышающих 1 сут, колебания скоростей поверхностных и придонных течений незначительно преобладают в весенний период.

5. На периодах 5,6–7,1 и 13,6–14,8 сут колебания уровня наиболее развиты осенью, 3,6–4,2 сут – весной.

6. Суточные колебания как скоростей течений, так и возвышений уровня максимальны летом, полусуточные – осенью.

7. Максимальные колебания скоростей течений на периодах в сутки и более наблюдаются вдоль северного и южного побережий, а также в полосе средних течений, проходящей через центр моря и соответствующей западной (для поверхностных течений) и восточной (для придонных) периферии обширного циклона – ключевой структуры климатической циркуляции вод Азовского моря.

8. Пространственные распределения колебаний уровня обнаруживают четкую зональность. Наибольшие амплитуды отмечаются в противоположных частях моря: на периодах синоптической изменчивости (больше 3 сут) – на северо-востоке и юго-западе моря, на суточных периодах колебаний – на востоке и западе, полусуточных – юго-востоке и северо-западе.

9. В центре моря в спектре меридиональной компоненты скорости выделяются два пика: годовой (доминирующий) и полугодовой; в зональной компоненте присутствуют три максимума с сопоставимой энергией колебаний: к годовому и полугодовому периоду добавляется период 0,7 года (~ 260 сут). Низкочастотные колебания (~ 2 и 4 года) на частотных спектрах выражены слабо.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование длинных волн в Азовском море, вызываемых прохождением циклонов / В. Н. Еремеев [и др.] // *Океанология*. 2000. Т. 40, № 5. С. 658–665.
2. Филиппов Ю. Г. Свободные колебания уровня Азовского моря // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 2. С. 78–82. EDN OPLEGT.
3. 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. EDN VBFRPZ.
4. Иванов В. А., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я. Исследование свободных колебаний уровня Азовского моря, возникающих после прекращения длительного действия ветра // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 2. С. 15–25. EDN VDVDCJ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2015-2-15-25>
5. Матишов Г. Г., Бердников С. В. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г. // *Известия РАН. Серия географическая*. 2015. № 1. С. 111–118. EDN TNXQHV.
6. Черкесов Л. В., Шульга Т. Я. Исследование влияния параметров барических образований на свободные и вынужденные колебания уровня и течения в Азовском море // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 4. с. 13–26. EDN WINRBD. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2016-4-13-26>

7. Черкесов Л. В., Шульга Т. Я. Волны, течения, сгонно-нагонные процессы и трансформация загрязнений в Азовском море. Севастополь, 2017. 228 с. EDN ХТААТР.
8. Лемешко Е. Е., Полозок А. А. Экстремальные значения уровня Азовского моря по данным береговых измерений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 3. С. 13–21. EDN YLLQGD. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-3-13-21>
9. Попов С. К., Лобов А. Л. Краткосрочные прогнозы колебаний уровня Азовского моря в безледный период 2017 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 104–118. EDN VMYBYW.
10. Иванов В. А., Шульга Т. Я. Влияние атмосферных фронтов на свободные и вынужденные колебания уровня Азовского моря // Доклады Академии наук. 2019. Т. 486, № 6. С. 737–741. EDN DQEWMM. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524866737-741>
11. Опасные штормовые нагоны и разрушение берегов Азовского моря / Л. А. Беспалова [и др.] // Наука Юга России. 2019. Т. 15, № 2. С. 29–38. EDN JRLJAH. <https://doi.org/10.7868/S25000640190204>
12. Корженовская А. И., Медведев И. П., Архипкин В. С. Приливные колебания уровня Азовского моря // Океанология. 2022. Т. 62, № 5. С. 677–689. EDN AOZVNN. <https://doi.org/10.31857/S0030157422050094>
13. Фомин В. В. Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ. 2002. Вып. 249. С. 246–255.
14. Ветро-волновой режим Азовского моря / Н. Н. Дьяков [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2010. № 22. С. 228–239. EDN ULYPBJ.
15. Экологический атлас Азовского моря / гл. ред. Г. Г. Матишов ; отв. ред. Н. И. Голубева, В. В. Сорокина. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2011. 325 с.
16. Атлас волнения, течений и уровня Азовского моря / под редакцией В. В. Фомина. Киев, 2012. 238 с.
17. Ветро-волновые условия прибрежной зоны Азово-Черноморского региона / В. П. Евстигнеев [и др.]. Севастополь : ИПТС, 2017. 320 с.
18. Яицкая Н. А. Математическое моделирование ветрового волнения Азовского моря // Труды Южного научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 8. С. 86–96. EDN EHMFWL. <https://doi.org/10.23885/1993-6621-2020-8-86-96>
19. Фомин В. В., Полозок А. А., Фомина И. Н. Моделирование циркуляции вод Азовского моря с учетом речного стока // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 1. С. 16–28. EDN VBUSOP. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2015-1-16-28>
20. Численное исследование сгонно-нагонных процессов и течений Азовского моря в период экстремальных ветров / Л. В. Черкесов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 5. С. 3–20. EDN ZQKYXV. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-5-3-20>
21. Матишов Г. Г., Григоренко К. С. Течения Азовского моря в период маловодья Дона // Океанология. 2021. Т. 61, № 2. С. 198–208. EDN ХХАИHM. <https://doi.org/10.31857/S0030157421020131>
22. Матишов Г. Г., Григоренко К. С. Динамика и термохалинная структура вод контактных зон Азовского моря // Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 502, № 2. С. 107–114. EDN PTQMST. <https://doi.org/10.31857/S2686739722020116>
23. Матишов Г. Г., Григоренко К. С. Сейшевые течения Азовского моря по данным натурных наблюдений // Океанология. 2023. Т. 63, № 1. С. 32–40. EDN AGOHMU. <https://doi.org/10.31857/S0030157423010094>
24. Григоренко К. С. Течения Азовского моря по данным измерений и спектрального анализа // Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле. 2025. Т. 523, № 1. С. 169–177. EDN ХNKJKR. <https://doi.org/10.31857/S2686739725070197>
25. Дивинский Б. В. Пространственная структура течений Азовского моря по данным численного моделирования // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 6. С. 843–854. EDN QIUMIK.

26. Дивинский Б. В., Косьян Р. Д., Фомин В. В. Климатические поля морских течений и ветрового волнения Азовского моря // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 501, № 1. С. 94–107. EDN ANVNAF. <https://doi.org/10.31857/S2686739721090085>
27. Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013). Регион 1. Моря Восточной Арктики. Регион 2. Черное, Азовское и Каспийское моря / Г. Г. Матишов [и др.]. Ростов на Дону : Издательство ЮНЦ РАН, 2014. 256 с. EDN PPFNUU.
28. Атлас льдов Черного и Азовского морей / Н. Н. Дьяков [и др.]. Севастополь, 2015. 219 с. EDN PPFNUU.
29. Яицкая Н. А., Магаева А. А. Динамика ледового режима Азовского моря в XX–XXI вв. // Лед и снег. 2018. Т. 58, № 3. С. 373–386. EDN VPYVNM. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-373-386>
30. Пузина О. С., Мизюк А. И. Исследование ледовых условий Азовского моря по спутниковым данным и по результатам численного моделирования // CITES '2019: Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде. Томск : Издательство Томского ЦНТИ, 2019. С. 158–162. EDN INUZRS.
31. Дашкевич Л. В., Немцева Л. Д., Бердников С. В. Моделирование многолетнего ледового режима Азовского моря // Труды Южного научного центра Российской Академии наук. 2020. Т. 8. С. 50–60. EDN WNDUQR. <https://doi.org/10.23885/1993-6621-2020-8-50-60>
32. Медведев И. П. О формировании спектра колебаний уровня Балтийского моря // Доклады академии наук. 2015. Т. 463, № 3. С. 347–352. EDN TZMFEJ. <https://doi.org/10.7868/S0869565215210185>
33. Медведев И. П. Дисперсия короткопериодных колебаний уровня Черного моря: сезонные и межгодовые изменения // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 1. С. 65–77. EDN HQFDGA.
34. Parameters of sea currents on the Northeastern Black Sea shelf based on experimental data / B. V. Divinsky [et al.] // Oceanology. 2025. Vol. 65, iss. 6. P. 831–843. EDN GBUCJG. <https://doi.org/10.1134/S000143702570050X>
35. Кузнецов А. С. Особенности межсезонной изменчивости вдольбереговой циркуляции ветра и прибрежного течения у Южного берега Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 1. С. 31–44. EDN EBWSKZ.
36. Кузнецов А. С., Иващенко И. К. Среднемноголетние спектральные характеристики долгопериодных колебаний прибрежного течения у Южного берега Крыма // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 1. С. 36–49. EDN KKOLDF.
37. Fine-scale hydrodynamic modeling of Lake Ontario: Has climate change affected circulation patterns? / B. Hlevca [et al.] // Environmental Modeling & Assessment. 2025. Vol. 30. P. 219–239. EDN DJFDMZ. <https://doi.org/10.1007/s10666-024-10003-z>
38. Jamshidi S. Flow measurement in the southern coast of the Caspian Sea // Frontiers in Marine Science. 2024. Vol. 10. 1219658. EDN ZPKIIL. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1219658>
39. Influence of wave climate on intra and inter-annual nearshore bar dynamics for a sandy beach / N. Andreeva [et al.] // Geosciences. 2021. Vol. 11, iss. 5. 206. EDN OJJJSB. <https://doi.org/10.3390/geosciences11050206>

Об авторах:

Дивинский Борис Васильевич, ведущий научный сотрудник, лаборатория геологии и литодинамики, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2452-1922**, **ResearcherID: C-7262-2014**, **SPIN-код: 2027-8359**, divin@ocean.ru

Куклев Сергей Борисович, заведующий лабораторией гидрофизики и моделирования, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4494-9878**, **ResearcherID: G-5656-2017**, **SPIN-код: 7717-9703**, kuklev@ocean.ru