

Волновой климат Каспийского моря по данным моделирования

С. А. Мысленков*, **, ***, В. С. Архипкин*,
А. В. Павлова*, С. А. Добролюбов*

Описываются результаты численного моделирования ветрового волнения в Каспийском море с 1979 по 2017 г. Используются волновая модель WaveWatch3 и данные о ветре из реанализа NCEP/CFSR. Моделирование производилось на нерегулярной вычислительной сетке, описывающей прибрежную зону с шагом до 1 км. Приведены средние и экстремальные значения высоты волн, длины и периода. Показано, что максимальная высота волн 3%-ной обеспеченности составляет 11,7 м. Проведен анализ межгодовой изменчивости характеристик волнения. Однозначный тренд на увеличение или уменьшение штормовой активности за период моделирования не установлен.

Ключевые слова: Каспийское море, ветровое волнение, моделирование волнения, модель WaveWatch3, волновой климат.

Введение

Изучение особенностей ветрового волнения в океанах и морях является важной и актуальной задачей. Данные о режимных и экстремальных характеристиках волнения необходимы для судоходства, проведения морских работ, строительства морских и прибрежных объектов, при разведке и добыче полезных ископаемых, проведении берегозащитных мероприятий и т. д. В настоящее время основной метод изучения параметров волнения в морях и океанах — математическое моделирование. Это обусловлено тем, что инструментальные данные наблюдений с высокой пространственной детализацией и достаточно длинными рядами чаще всего отсутствуют.

Каспийское море — полностью замкнутый внутриконтинентальный водоем с максимальной глубиной до 1000 м. Северная часть Каспийского моря является мелководной (не более 20 м), вследствие этого развитие волн ограничено. В средней и южной частях моря, имеющих большую глубину, значительную роль в развитии волнения играет меридиональная вытянутость бассейна, поэтому при западном и восточном направлениях ветра развитие волн ограничено коротким разгоном [6]. В ряде работ представлены результаты исследования ветрового волнения в Каспийском

* Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова; e-mail: stasocan@gmail.com.

** Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации.

*** Институт океанологии им. П. П. Шишова Российской академии наук.

море [2, 3, 14, 16, 19]. Однако его волновой климат изучен пока недостаточно. Среди работ, посвященных анализу длительных рядов моделирования волнения, необходимо отметить данные работы [14], где на основе модели WaveWatch3 и данных реанализа NCEP/NCAR представлены подробные таблицы повторяемости волн разной обеспеченности с разбивкой по направлению ветра и сезонам года. Шаг расчетной сетки в данном случае соответствовал входным данным о ветре (около $1,8^\circ$). Автор работы [16], где показаны изменения в волновом климате во второй половине XX в. — начале XXI в., для воспроизведения волнового климата также использовал реанализ NCEP/NCAR с разрешением $2,5^\circ$ и волновую модель SWAN. Для моделирования волнения авторы работы [20] использовали модель MIKE 21 SW и реанализ ERA-40 с шагом $\sim 1,25^\circ$. Авторы этой работы на основе результатов сравнения моделирования с данными наблюдений изменили коэффициенты забурунивания (whitecapping) и обрушения волн, что позволило уменьшить ошибки моделирования для конкретных точек и для определенного промежутка времени.

Известно, что результаты анализа и прогноза волнения кардинальным образом зависят от качества входных данных о поле ветра. К сожалению, ошибки поля ветра из реанализа неоднородно распределены в пространстве и времени, что не позволяет использовать фиксированные коэффициенты для повышения точности результата воспроизведения волн [26].

Данные реанализа NCEP/NCAR существенно занижают скорость ветра, о чем свидетельствуют результаты, приведенные в работах [4, 8, 26]. Низкий коэффициент корреляции (0,7) при оценке качества воспроизведения волнения при использовании данных этого реанализа подтвержден и для Каспийского моря [16]. В нескольких работах было показано [9, 10, 26], что при использовании данных реанализа нового поколения (например, NCEP/CFSR или ERA-Interim) качество воспроизведения волнения существенно повышается. Таким образом, ранее полученные данные о волновом климате Каспийского моря с использованием результатов реанализа низкого пространственного разрешения необходимо уточнить. Наиболее современный анализ волнения в Каспийском море представлен в работе [17], авторы которой использовали комплекс моделей (ROMS, WRF, SWAN). Однако авторами данной работы был выполнен ретроспективный анализ волнения только за три года, такой продолжительности ряда недостаточно для анализа режимных и экстремальных характеристик.

Имеется ряд публикаций, посвященных ретроспективному анализу и климатическому прогнозу повторяемости синоптических ситуаций, вызывающих опасные гидрометеорологические явления, в том числе и штормовое волнение [7, 24]. Однако в этих работах также используются данные о ветре из реанализа NCEP/NCAR. Необходимо отметить работы, где описаны системы оперативного анализа и прогноза волнения в Каспийском море [5, 15, 27]. В этих работах приводятся оценки качества моделирования, однако анализ режимных характеристик волнения за продолжительный период времени отсутствует.

Основной целью авторов настоящей статьи было определить режимные и экстремальные характеристики ветрового волнения в Каспийском море. Расчеты были выполнены с использованием спектральной модели WaveWatch3 и данных нового реанализа NCEP/CFSR за период с 1979 по 2017 г.

Данные и методы

Для расчета параметров ветрового волнения в Каспийском море была использована спектральная волновая модель третьего поколения WaveWatch III (WW3) версии 4.18 [25]. Как известно, приток энергии к волнам осуществляется за счет энергии ветра, а ее диссипация — из-за обрушения волновых гребней вследствие донного трения и обрушения волн на критической глубине.

В основе модели лежит численное решение уравнения спектрального баланса волновой энергии

$$\frac{E(\omega, \theta, \vec{x}, t)}{t} + \vec{V}(\omega, \theta) \cdot \nabla E(\omega, \theta, \vec{x}, t) = S(\omega, \theta, \vec{x}, t),$$

где ω и θ — частота и направление распространения спектральной составляющей волновой энергии; $E(\omega, \theta, \vec{x}, t)$ — двухмерный спектр энергии в точке с векторной координатой $\vec{x}$ в момент времени t ; $\vec{V}(\omega, \theta)$ — групповая скорость спектральных составляющих; $S(\omega, \theta, \vec{x}, t)$ — функция, описывающая источники и стоки энергии волн. Уравнение баланса энергии интегрируется с помощью конечно-разностных схем по географической сетке и спектру волновых характеристик. Авторы данной статьи для генерации волн использовали схему ST1. Расчет нелинейных взаимодействий был произведен по параметрической схеме DIA (Discrete Interaction Approximation), которая является стандартным приближением для расчета нелинейных взаимодействий во всех современных волновых моделях [13]. Для учета влияния льда на развитие волнения была использована схема IC0, в которой при сплоченности льда более 0,25 (в рассматриваемом случае сплоченность изменяется от 0 до 1) узел сетки считается покрытым льдом, при этом добавляется экспоненциальное затухание волновой энергии с поправкой на сплоченность льда в данном узле [25]. В мелководной прибрежной зоне, помимо обрушения волн из-за длительного воздействия ветра на морскую поверхность (учитываемого в схеме ST1), учитывается также увеличение высоты волн при приближении к берегу и связанное с этим обрушение волны после достижения критического значения крутизны. Для учета влияния придонного трения используется стандартная схема JONSWAP. Спектральное разрешение модели составляет 36 направлений ($\Delta\theta = 10^\circ$), частотный диапазон включает 36 интервалов (от 0,03 до 1,1 Гц).

Вычисления проводились на оригинальной неструктурной сетке, созданной по данным подробных навигационных карт УНИО (<https://navysoft.ru/>). Глубина на картах была представлена относительно уровня моря –28 м. Вычислительная сетка состояла из 15 792 узлов, пространственное разрешение варьировали от 10 км в открытом море до 1 км в прибрежной зоне (рис. 1). Подобные сетки, использованные для моделирования волнения других морей Российской Федерации, показали свою эффективность [9, 11]. Общий шаг по времени для интегрирования полного уравнения волнового действия составляет 30 мин, шаг по времени для интегрирования функций источников и стоков волновой энергии — 30 с, шаги по времени для передачи энергии по спектру и удовлетворения условия Куранта — Фридрихса — Леви — 900 с. В качестве вынуждающей

силы были использованы данные о ветре на высоте 10 м из реанализа NCEP/CFSR [22] для периода с 1979 по 2010 г. с шагом по пространству $\sim 0,3^\circ$. Для периода с 2011 по 2017 г. использовали данные реанализа NCEP/CFSv2 [23] с разрешением $\sim 0,2^\circ$ и шагом по времени 1 ч. Данные о ежесуточных полях сплоченности льда с шагом 12,5 км были взяты из базы спутниковых данных OSI-450 [18]. Сплоченность льда была представлена в долях от нуля до единицы. Данные интерполировались на регулярную сетку $0,2^\circ$ для последующего использования в волновой модели.

За последние 40 лет уровень Каспийского моря существенно изменялся [12] — ежегодно на 5—20 см. Поэтому для корректности вычислений в модели для каждого года задавали разный уровень. Для определения текущего уровня Каспийского моря данные нескольких уровней постов (Махачкала, о. Тюлений, о. Пешной, Баку), взятые с сайта <http://www.caspcom.com/>, осредняли за каждый год. Похожая реализация модели WaveWatch3 успешно применялась авторами для исследования параметров волнения в Баренцевом море [11, 21]. В результате проведенных расчетов для каждого узла вычислительной сетки были получены характеристики ветрового волнения за каждые 3 ч за период с 1979 по 2017 г. (всего за 39 лет): высота значительных волн H_s (13%-ная обеспеченность), средний период волн, средняя длина волны. На основе этих данных были рассчитаны максимальные и среднемноголетние значения, а также экстремальные характеристики.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе исследования проводилась оценка качества результатов модели (из-за отсутствия в цифровом виде данных прямых измерений для сравнения использовали данные наблюдений из работы [1]). Результаты сравнения данных модели и измерений волн 3%-ной обеспеченности для точки, расположенной в Среднем Каспии, приведены на рис. 2а. Визуально качество моделирования можно оценить как удовлетворительное. Модель хорошо воспроизводит фазу наступления штормов; воспроизведе-

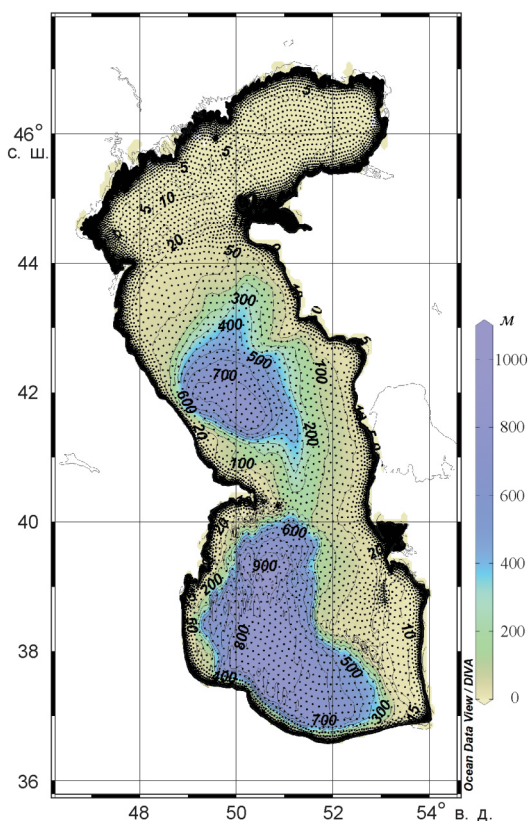


Рис. 1. Расчетная сетка и карта глубины Каспийского моря.

ние моделью пиков штормов не очень точно, однако систематического занижения или завышения высоты волн не наблюдается. Также было проведено сравнение результатов моделирования с данными альтиметра AltiKa (rads.tudelft.nl). Использована высота волн в 34 990 точках за период с 2013 по 2016 г. (рис. 2б). Коэффициент корреляции составил 0,91, а среднеквадратическая ошибка — 0,29 м. Такое качество воспроизведения в целом соответствует современным реализациям волновых моделей [13, 21].

В Северном Каспии наблюдаются сильные нагоны и сгоны, при которых уровень моря за несколько дней может изменяться на 0,5—1,5 м [12]. Изменение глубины должно отражаться на параметрах волн. Для оценки влияния сильных нагонов на воспроизведение волн в Северном Каспии был выполнен специальный численный эксперимент. Для октября 1984 г., когда был зафиксирован сильный нагон, выполнялось моделирование волнения по данным среднесноголетнего уровня и уровня, увеличенного на 1,5 м. Анализ полученных данных показал, что в той части Северного Каспия, где глубина более 7 м и наблюдаются волны максимальной высоты (более 2 м), увеличение глубины не влияет на высоту волн. По-видимому, основным фактором, лимитирующим рост волн в этом районе Каспийского моря, является короткий разгон. В районах, где глубина моря менее 2—3 м, ее увеличение привело к росту высоты волн на 5—10%. Поэтому

влияние нагонов на режимные и экстремальные характеристики волн в данной статье не учитывалось.

Результаты модельных расчетов за период с 1979 по 2017 г. были статистически обработаны. На рис. 3а представлена средняя многолетняя высота значительных волн (13%-ной обеспеченности) за весь период моделирования. В Среднем Каспии среднесноголетняя высота волн достигает 1,1 м. На рис. 3а обозначены точки (Т1, Т2, Т3), которые расположены в разных по волновому климату районах Каспийского моря и в дальнейшем используются для анализа межгодовой изменчивости параметров волн. На рис. 3б—г представлены карты распределения максимальных значений по всей выборке высоты волн 3%-ной обеспеченности, среднего периода и средней длины волн. Максимальное

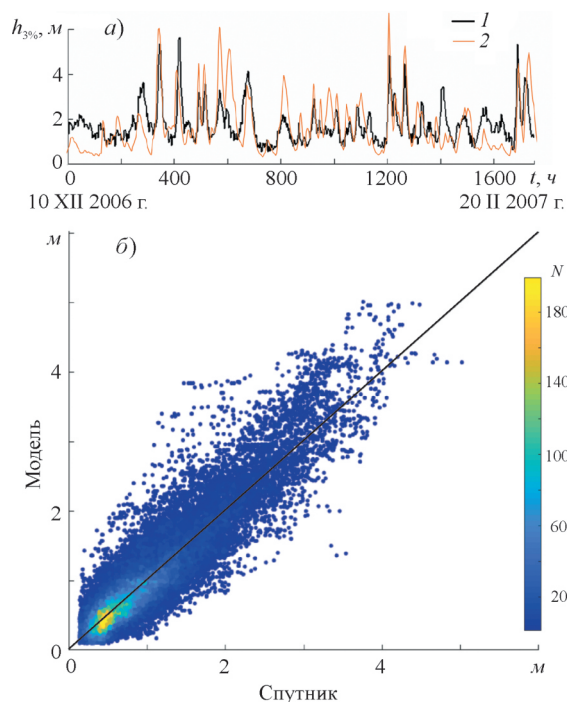


Рис. 2. Высота волн 3%-ной обеспеченности по данным измерений в точке 42 45,7 с. ш., 49 41,6 в. д. [1] (1) и результаты моделирования в этой точке (2), а также сопоставление высоты значительных волн по спутниковым данным и по результатам моделирования (б).

N — число точек на квадрат 0,05 × 0,05 м.

значение высоты волн составляет 11,7 м и наблюдается в Среднем Каспии. Область, где максимальная высота волн превышает 10 м, достаточно обширна и также расположена в Среднем Каспии. В Южном Каспии можно выделить локальный максимум высоты волн, равный 9,5 м, а также максимум у берегов Ирана, достигающий 10,4 м. Согласно данным справочника [14], максимальная высота волн 3%-ной обеспеченности, возможная в Каспийском море раз в 50 лет, составляет 7 м. Вероятно, использование авторами работы [14] данных реанализа ветра NCEP/NCAR при расчетах существенно занизило высоту волн. В Северном Каспии из-за короткого разгона, небольшой глубины и наличия льда в зимний период развитие волн существенно ограничено, поэтому максимальная высота волн составляет 3,5 м. Максимальные значения среднего периода волн для Среднего Каспия составляют 7,6 с, для Южного — 7,1 с, для Северного — 4 с. Максимальные значения средней длины волн характерны для Среднего Каспия и составляют 163 м.

На втором этапе исследования были проанализированы максимальные значения высоты волн для разных сезонов года. Для этого из всего ряда данных о высоте волн 13%-ной обеспеченности (наиболее часто используемой для описания режимных характеристик волнения) были отобраны максимальные значения для зимы (декабрь — февраль), весны (март — май), лета (июнь — август) и осени (сентябрь — ноябрь) (рис. 4). Максимальное волнение наблюдается в зимний период в Среднем Каспии ближе к Апшеронскому п-ову, и высота волн составляет 8,9 м. Аналогичная ситуация примерно в том же районе характерна для осеннего периода, высота волн составляет 7,7 м. Летом высота волн этой обеспеченности не более 6,1 м.

Для анализа межгодовой изменчивости режимных характеристик волнения в Каспийском море были выбраны три точки в Северном, Среднем и Южном Каспии, которые отмечены на рис. 3а. Для каждой из точек были рассчитаны среднемесячная и максимальная за этот месяц высота волн 13%-ной обеспеченности, а также среднемесячный перенос волновой энергии (киловатт на метр фронта волны). Об изменении этих характеристик за период с 1979 по 2017 г. свидетельствуют данные на рис. 5. Для точки Т1 в зимний период высота волн часто равна нулю, так как здесь образуется лед. Видно, что начиная с 2000 г. ледовые условия стали мягче, так как периодически даже в зимние месяцы лед не образуется и может развиваться волнение. Среднемесячная высота волн в Северном Каспии составляет около 0,7 м и, как правило, не превышает 1 м. Максимальные месячные значения составляют 1,5—2 м. В мае 1990 г. за весь анализируемый период наблюдался максимум 2,5 м. Перенос волновой энергии равен 1—2 кВт/м.

Для точки Т2 в Среднем Каспии среднемесячная высота волн осенью и зимой составляет 1,6—1,8 м, а летом снижается до 0,5—0,7 м. Для данной точки абсолютный максимум, равный 8,1 м, был зафиксирован в декабре 1995 г. Максимальные значения наблюдались также в 1980 и 1992 гг., высота волн в эти годы превысила 7 м. Следует отметить, что максимальные значения высоты волн в зимние месяцы обычно лежат в узком диапазоне — 5,5—6,2 м. Это, с одной стороны, свидетельствует о небольшой межгодовой изменчивости, с другой стороны, указывает на тот факт, что один

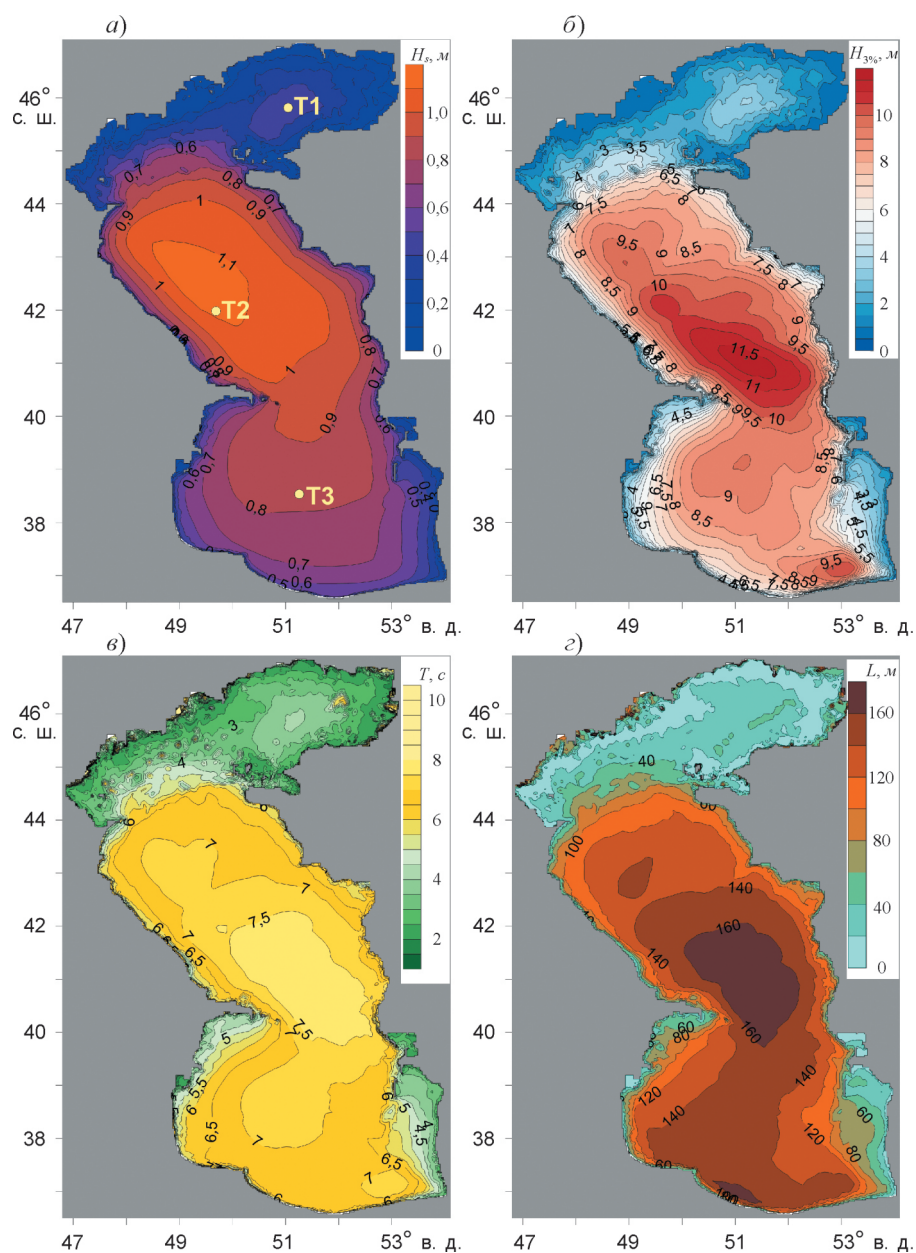


Рис. 3. Средняя многолетняя высота значительных волн (а), максимальная высота волн 3%-ной обеспеченности (б), максимальный период (в), максимальная длина волн (г) за весь период с 1979 по 2017 г.

раз в 10—20 лет высота волн может в 1,5 раза превышать среднемноголетние максимальные значения. Перенос волновой энергии в Среднем Каспии на порядок выше, чем в Северном, и летом составляет около 2 кВт/м , зимой — $8—12 \text{ кВт/м}$. Максимальный среднемесячный перенос волновой энергии наблюдался в феврале 2010 г. и превышал 20 кВт/м . Для этой точки хорошо выражен сезонный ход высоты волн и переноса энергии.

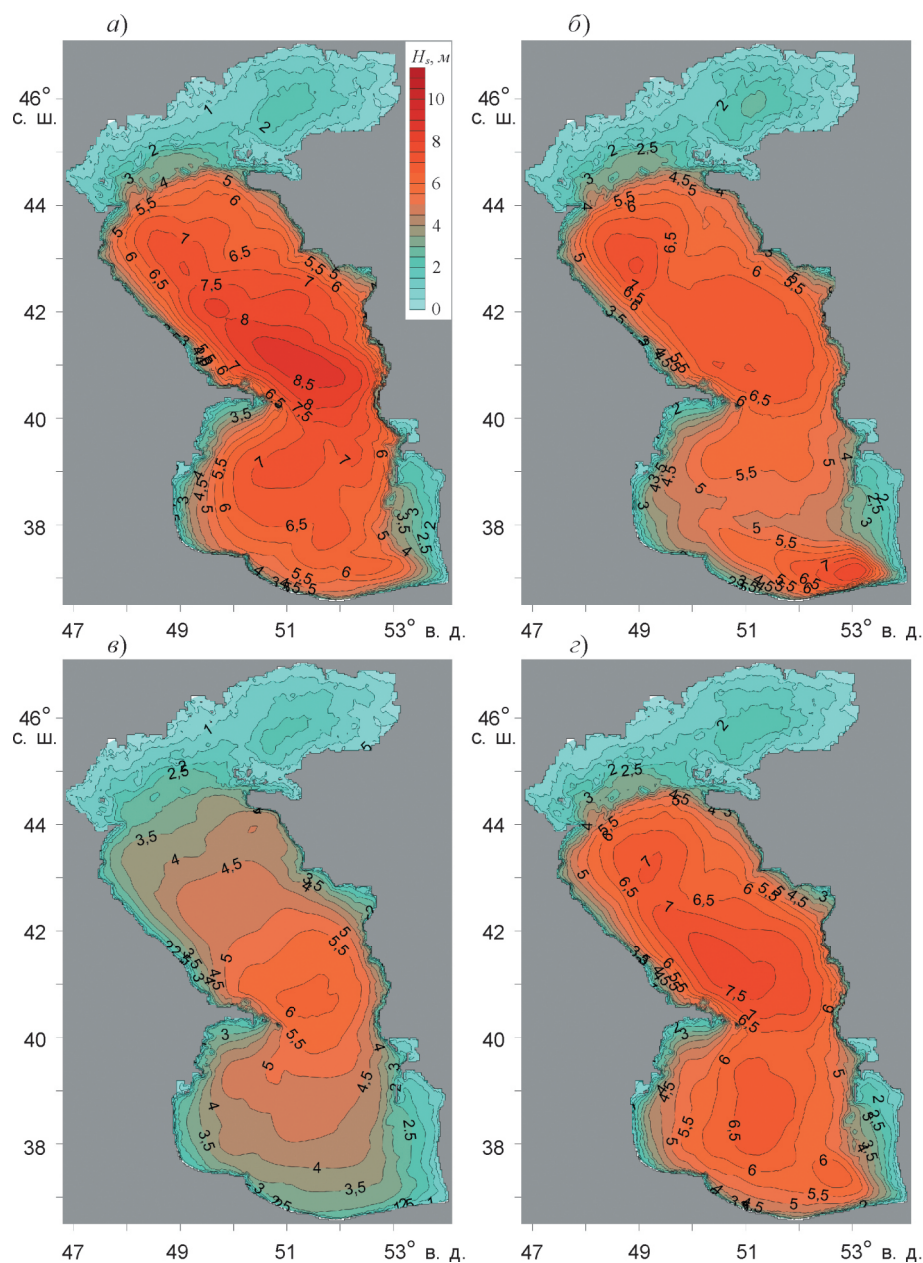


Рис. 4. Максимальная высота волн 13%-ной обеспеченности для разных сезонов года: декабрь — февраль (а), март — май (б), июнь — август (в), сентябрь — ноябрь (г).

Для точки ТЗ в Южном Каспии сезонный ход среднемесячной высоты волн практически отсутствует, что свидетельствует о несколько ином ветровом режиме, чем в Северном и Среднем Каспии. Средняя высота волн здесь составляет 0,7—1 м. Максимальное значение высоты волн 6,9 м было зафиксировано в декабре 1983 г. и ноябре 1996 г. В другие годы максимумы высоты волн обычно не превышали 5,5—6 м; перенос волновой

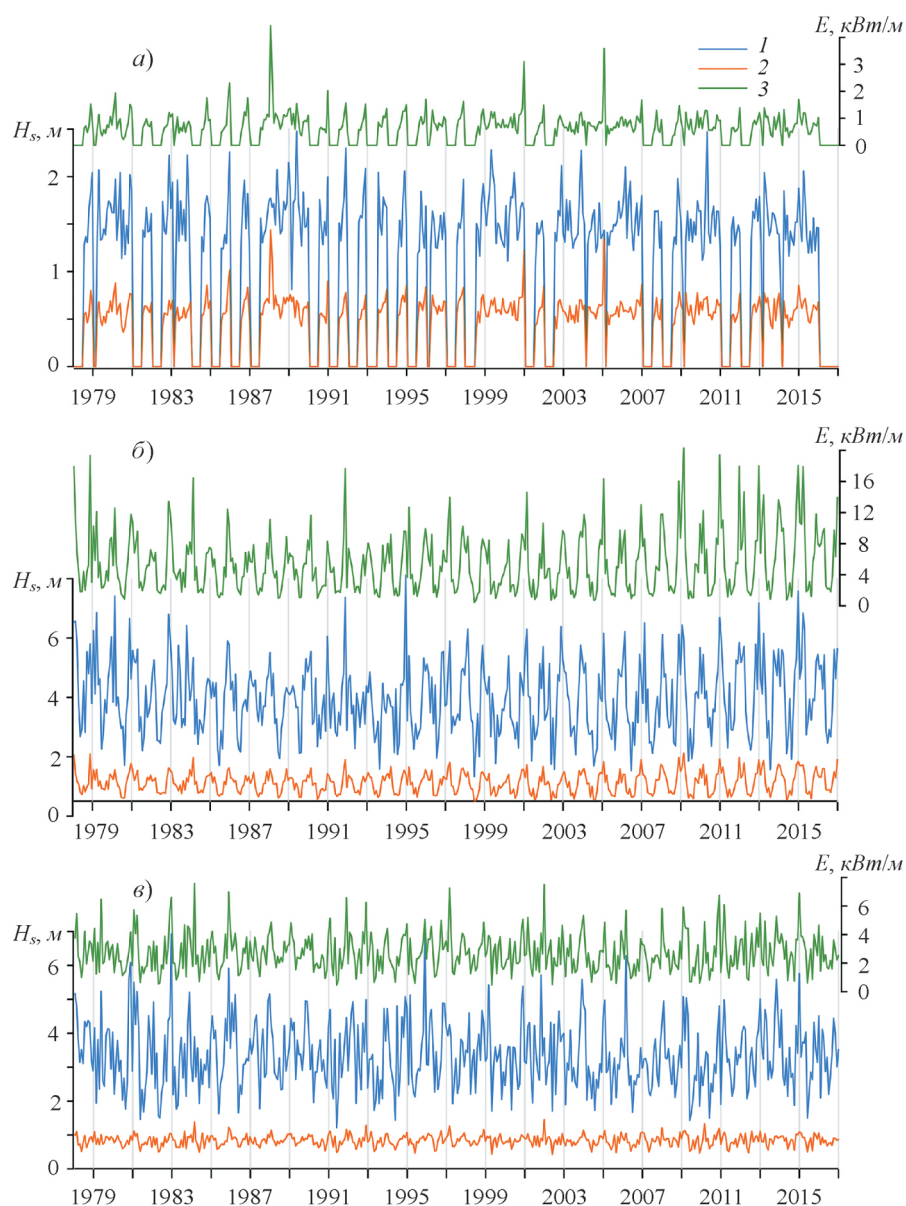


Рис. 5. Максимальное (1) и среднее (2) значения высоты волн H_s для каждого месяца, а также среднемесячный перенос волновой энергии (3) E в точках Т1 (а), Т2 (б), Т3 (в) за период с 1979 по 2017 г.

энергии составлял 2—6 кВт/м, а максимальное среднемесячное значение — 7,6 кВт/м.

Однозначного тренда для всех районов Каспийского моря по данным среднемесячной или максимальной высоты волн определить не удалось. В начале 1980-х годов и в середине 1990-х годов во всех районах Каспийского моря наблюдалось увеличение штормовой активности, а 2009—2017 гг. можно характеризовать как период увеличения в Среднем Каспии переноса волновой энергии.

Заключение

С использованием модели WaveWatch3 и данных реанализа NCEP/CFSR рассчитаны характеристики ветрового волнения за каждые три часа за период с 1979 по 2017 г. Полученный массив данных был использован для расчета режимных и экстремальных характеристик ветрового волнения, а также для оценки межгодовой динамики штормовой активности. Полученные авторами статьи результаты существенно дополняют имевшиеся ранее оценки режимных и экстремальных характеристик волнения в Каспийском море.

Моделирование волнения выполнено В. С. Архипкиным и А. В. Павловой при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-80088. Визуализация параметров волнения выполнена С. А. Мысленковым при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-05-41153.

Литература

1. Амбросимов А. К., Амбросимов С. А. Характеристики волнения в глубоководной части среднего Каспия по данным наблюдений в различные сезоны 2005 г. с использованием волнографов-мареографов. — Экологические системы и приборы, 2008, № 8, с. 45—50.
2. Амбросимов А. К., Амбросимов С. А. Экспериментальные исследования ветрового волнения в центральной части Каспийского моря. — Экологические системы и приборы, 2008, № 10, с. 55—62.
3. Гиппиус Ф. Н., Архипкин В. С., Фролов А. В. Сезонный ход испарения с поверхности Каспия с учетом влияния волнения и глубины моря. — Вестник Московского университета. Серия: География, 2016, № 5, с. 86—92.
4. Ефимов В. В., Комаровская О. И., Наумова В. А. Статистическая оценка ветровых данных реанализа по данным срочных измерений ветра на метеостанциях северного побережья Черного моря. /В сб.: Системы контроля окружающей среды. — Севастополь, МГИ, 2004, с. 214—216.
5. Ивкина Н. И., Галаева А. В. Прогнозирование ветрового волнения на Каспийском море с помощью модели SWAN. — Гидрометеорология и экология, 2017, № 2 (85), с. 36—45.
6. Каспийское море: Гидрология и гидрохимия. /Под ред. С. С. Байдина, А. Н. Косарева. — М., Наука, 1986.
7. Кислов А. В., Суркова Г. В., Архипкин В. С. Повторяемость штормовых ситуаций в Балтийском, Черном и Каспийском морях в изменяющихся климатических условиях. — Метеорология и гидрология, 2016, № 2, с. 67—77.
8. Медведева А. Ю., Архипкин В. С., Мысленков С. А., Зилитинкевич С. С. Волновой климат Балтийского моря на основе результатов, полученных с помощью спектральной модели SWAN. — Вестник Московского университета. Серия 5: География, 2015, № 1, с. 12—22.
9. Медведева А. Ю., Мысленков С. А., Медведев И. П., Архипкин В. С., Кречик В. А., Добролюбов С. А. Моделирование ветрового волнения в Балтийском море на прямоугольной и неструктурной сетках на основе реанализа NCEP/CFSR. — Труды Гидрометцентра России, 2016, № 362, с. 37—54.
10. Мысленков С. А., Платонов В. С., Торопов П. А., Шестакова А. А. Моделирование штормового волнения в Баренцевом море. — Вестник Московского университета. Серия 5: География, 2015, № 6, с. 65—75.
11. Мысленков С. А., Столярова Е. В., Маркина М. Ю., Киселева С. В., Архипкин В. С., Горлов А. А., Умнов П. М. Сезонная и межгодовая изменчивость потока волновой энергии в Баренцевом море. — Альтернативная энергетика и экология, 2017, № 19—21 (231—233), с. 36—48.

12. **Нестеров Е. С.** Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. — М., Триада лтд, 2016, 378 с.
13. **Режим**, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях. /Научно-методическое пособие. Под ред. Е. С. Нестерова. — М., Социальные науки, 2013, 295 с.
14. **Справочные** данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей. — СПб, Российский морской регистр судоходства, 2003, 213 с.
15. **Струков Б. С., Зеленко А. А., Реснянский Ю. Д., Мартынов С. Л.** Система прогнозирования ветрового волнения и результаты ее испытаний для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей. /В сб.: Информационный сборник. Новые технологии, модели и методы гидродинамических прогнозов и результаты их оперативных испытаний, 2013, № 40, с. 64—79.
16. **Яицкая Н. А.** Ретроспективный анализ ветрового волнения в Каспийском море во второй половине XX — начале XXI вв. и связь с региональными проявлениями изменения климата. — Географический вестник, 2017, № 2 (41), с. 57—70.
17. **Bruneau N. and Toumi R.** A fully-coupled atmosphere–ocean–wave model of the Caspian Sea. — *Ocean Modelling*, 2016, No. 107, pp. 97—111.
18. **EUMETSAT** Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility. Global Sea Ice Concentration Climate Data Record 1979—2015 (v2.0, 2017). — Norwegian and Danish Meteorological Institutes; doi: 10.15770/EUM_SAF_OSI_0008.
19. **Gholamreza A., Bahareh K., and Somayeh M.** Wind and wave energy potential in southern Caspian Sea using uncertainty analysis. — *Energy*, Volume, 2017, No. 120, pp. 332—345.
20. **Golshani A. A., Nakhaei A., Taebi S., and Chegini V.** AV Jandaghi Wave hindcast study of the Caspian Sea. — *J. Marine Eng.*, 2005, vol. 1, No. 2, pp. 19—25.
21. **Myslenkov S., Medvedeva A., Arkhipkin V., Markina M., Surkova G., Krylov A., Dobrolyubov S., Zilitinkevich S., and Koltermann P.** Long-term statistics of storms in the Baltic, Barents and White seas and their future climate projections. — *Geogr. Env. Sustainability*, 2018, vol. 11, No. 1, pp. 93—112.
22. **Saha S.** The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. — *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2010, vol. 91, No. 8, pp. 1015—1057.
23. **Saha S.** The NCEP Climate Forecast System Version 2. — *J. Climate*, 2014, vol. 27, pp. 2185—2208; doi: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.
24. **Surkova G. V., Arkhipkin V. S., and Kislov A. V.** Atmospheric circulation and storm events in the Black Sea and Caspian Sea. — *Central European J. Geosciences*, 2013, vol. 5, No. 4, pp. 548—559.
25. **Tolman H. L.** User Manual and System Documentation of WAVEWATCH-III Version 4.18. — NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note, 2014, 282 p.
26. **Van Vledder G. Ph. and Adem A.** Wave model predictions in the Black Sea: Sensitivity to wind fields. — *Appl. Ocean Res.*, 2015, No. 53, pp. 161—178.
27. **Zamani A., Azimian A., Heemink A., and Solomatine D.** Wave height prediction at the Caspian Sea using a data-driven model and ensemble-based data assimilation methods. — *J. Hydroinformatics*, 2009, No. 11 (2), pp. 154—164.