

**Please cite this article in English as:**

*Naumenko M.A., Sevastianov D.V., Dudakova D.S., Dudakov M.O., Rodionova N.V., Protopopova E.V.*  
Bolshoe Vygozero lake: first landscape-limnological studies on the Onega Peninsula of the White Sea  
// Geographical bulletin. 2017. № 2(41). P. 43–57. doi 10.17072/2079-7877-2017-2-43-57

УДК 551.466.31(262.81)

**Н.А. Яицкая**

**РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В КАСПИЙСКОМ МОРЕ  
ВО ВТОРОЙ ПОЛОВИНЕ XX – НАЧАЛЕ XXI ВВ. И СВЯЗЬ С РЕГИОНАЛЬНЫМИ  
ПРОЯВЛЕНИЯМИ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА\***

*Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону;  
Филиал «Институт природно-технических систем», г. Сочи*

В настоящем исследовании представлены результаты ретроспективного анализа ветрового волнения в Каспийском море во второй половине XX – начале XXI вв. по результатам гидродинамического моделирования. Разработана трехуровневая схема расчетов ветро-волновых параметров с последовательностью вложенных сеток для детализации отдельных районов; учтены положение кромки льда, динамика береговой линии и морфометрии в зависимости от уровня моря. Выполнено обобщение полученных значений ветрового волнения и их межгодовой динамики. Показана согласованность внутривековых вариаций волнового климата с элементами водного баланса, гидрологическим режимом Каспия, метеорологической обстановкой в регионе. За более чем полвека произошли существенные изменения: увеличилась амплитуда параметров волнения при движении с севера на юг; связи, наблюдавшиеся между отдельными районами моря в середине XX в., нарушились; для мелководных областей больший вклад в формирование поля волнения стала вносить глубина. Рассчитанные элементы волнового климата подтвердили ранее сделанные выводы о наличии ряда характерных периодов во внутривековом режиме моря.

**Ключевые слова:** Каспийское море, ветровое волнение, многолетние изменения, математическое моделирование, ретроспективный анализ.

**N.A. Yaitskaya**

**RETROSPECTIVE ANALYSIS OF WIND WAVES IN THE CASPIAN SEA IN THE SECOND  
HALF OF THE XX – BEGINNING OF THE XXI CENTURY AND ITS CONNECTION  
WITH THE REGIONAL CLIMATE CHANGES**

*Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don  
Branch of the Institute of Natural and Technical Systems, Sochi*

The results of a retrospective analysis of wind waves in the Caspian Sea in the second half of the 20<sup>th</sup> – early 21<sup>st</sup> century based on the results of hydrodynamic modeling are presented in the paper. A three-level scheme for calculating wind-wave parameters with a sequence of nested grids for presenting in detail separate regions has been developed; the position of the ice edge and dynamics of the shoreline and the morphometry depending on the sea level were taken into account. The generalization of the obtained values of wind waves and their interannual dynamics has been performed. The coherence of the intrasecular variations of the wave climate with elements of the water balance, the hydrological regime of the sea, and the meteorological situation in the region is shown. For more than half a century, significant changes have taken place: the amplitude of the wave parameters when moving from the northern to southern parts of the sea has increased; the relations that were observed between separate areas of the sea in the middle of the 20<sup>th</sup> century have been disturbed; for shallow-water areas, a greater contribution to the formation of the wave field is

---

© Яицкая Н.А., 2017

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-35-60046 мол\_а\_дк.

being made by the depth now. The calculated elements of the wave climate confirmed earlier conclusions about the existence of a number of characteristic periods in the intrasecular regime of the sea.

**Keywords:** Caspian Sea, wind wave, long-term variability, mathematical modeling, retrospective analysis.

doi 10.17072/2079-7877-2017-2-57-70

### Введение

Ветровое волнение в морях и океанах проявляется как в виде безобидных волн зыби, так и в разрушительных штормовых волнах и волнах цунами. Последствия от сильных и штормовых волн в морях часто бывают катастрофическими – крушение морских судов и гибель людей, разрушение океанотехнических установок и прибрежной инфраструктуры. Такие события влекут за собой порой колоссальные расходы в финансовом эквиваленте и непоправимый ущерб природе.

В настоящее время большое внимание уделяется прогнозированию экстремальных природных явлений. Но для понимания климата будущего необходимо опираться на знания об изменениях, которые уже произошли, анализировать многолетнюю динамику важных природных феноменов, таких как ветровые волны, восполнять пробелы в натуральных наблюдениях с помощью математических моделей. Особенно это важно для периодически замерзающего Каспийского моря, на побережье которого расположено пять государств и развивается активная морехозяйственная деятельность.

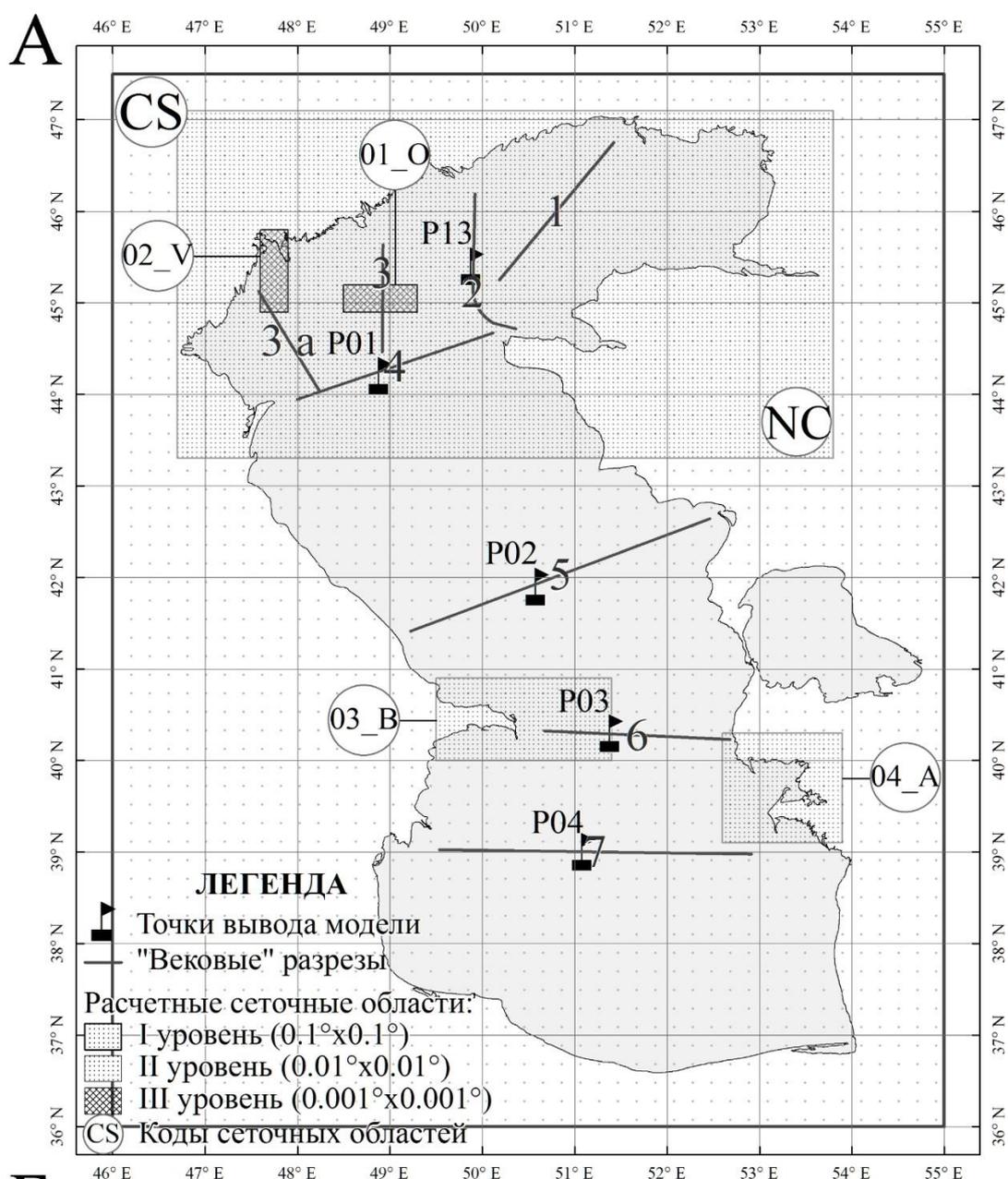
Несмотря на большое количество публикаций внутривековой волновой климат Каспийского моря изучен недостаточно. Некоторые результаты опубликованы в статьях и атласах [2; 8]. Но до сих пор в открытых источниках представлено скудное количество данных натуральных наблюдений, позволяющих выявить закономерности и особенности ветрового волнения на протяжении XX–XXI вв., определить связи с региональным и глобальным климатом. Инструменты математического моделирования, откалиброванные по данным наблюдений, дают возможность восполнить этот пробел путем ретроспективного анализа (hindcast).

### Материалы и методы исследования

Исходные данные для расчета ветрового волнения состоят из двух групп: данные об абсолютных глубинах и положении береговой линии моря; информация о скорости и направлении ветра в виде серий данных меридиональной и зональной компонент. Дополнительно при расчетах учитывались положение кромки льда и динамика береговой линии в зависимости от положения уровня Каспийского моря.

Точность расчетных значений параметров волнения, особенно на мелководных участках, отчасти зависит от качества и пространственной детализации расчетной сетки батиметрии. Специально для этой цели на основе векторизованных данных глубин гидрографических карт морей [11], составленных Управлением навигации и океанографии Министерства обороны РФ, была разработана высокоточная цифровая модель рельефа дна Каспийского моря с пространственным разрешением 100x100 м [10; 19]. Все карты опубликованы в 1992–2009 гг. и соответствуют среднему положению уровня моря минус 27 м. На основе полученной цифровой модели были построены регулярные расчетные сетки для моря в целом и отдельных регионов с разным пространственным разрешением (рис. 1А). В целях оптимизации расчетов и хранения результатов каждой сетке присвоен уникальный код (рис. 1Б). Заранее был определен ряд дополнительных «ключевых точек» модели (рис. 1А), соответствующих центральным районам «вековых» разрезов (точка P13 – разрез 2, точка P01 – разрез 4, точка P02 – разрез 5, точка P03 – разрез 6, точка P04 – разрез 7). Для них рассчитывались основные статистические характеристики, выполнялось сравнение с данными наблюдений. На основе созданной цифровой модели рельефа дна для среднего положения уровня моря был создан ряд сеточных областей для разных положений уровня Каспийского моря. Поскольку основные изменения с динамикой уровня моря происходили в морфометрических характеристиках Северного Каспия, в ходе расчетов изменялась только эта часть акватории. Все работы с батиметрическими данными выполнялись с использованием программного продукта ArcGIS (ESRI, США).

Таким образом, для ретроспективного анализа ветрового волнения Каспийского моря и описания волнового климата разработана трехуровневая схема расчетов с последовательностью вложенных сеток (рис. 1).



Код	Название области	Уровень	Размер ячейки (град)	Размер сеточной области		Координаты левого нижнего угла (град)	
				столбцы	строки	X	Y
CS	Каспийское море	I	0,1	91	116	46,0	36,0
NC	Северный Каспий	II	0,01	711	381	46,7	43,3
01_O	Месторождения В.Филановского и Ю.Корчагина	III	0,001	801	301	48,5	44,9
02_V	Дельта р.Волги-Каспийский канал	III	0,001	301	901	47,6	44,9
03_B	Апшеронский п-ов-г.Баку	II	0,01	191	91	49,5	40,0
04_A	г.Туркменбаши-г.Аваза	II	0,01	131	121	52,6	39,1

Рис. 1. Трехуровневая схема расчетных сеток в Каспийском море: А – положение сеточных областей, «вековых» разрезов и отдельных точек расчетов. Б – характеристики расчетных сеточных областей

Информация о непрерывном ветровом воздействии при расчете параметров волнения, представленная в виде наборов меридиональной (U) и зональной компонент (V) на высоте 10 м над уровнем моря, была выбрана из ре-анализа NCEP/NCAR [16]. Этот ре-анализ содержит ретроспективные значения различных метеорологических параметров начиная с 1948 г. Временное разрешение данных составляет 6 ч., пространственное –  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  по долготе и широте. Чтобы избежать накопления ошибок, интерполяция ре-анализа в узлы регулярных расчетных сеток не выполнялась – в модель задавались оригинальные значения ре-анализа. Итоговые наборы данных в виде текстовых файлов были использованы в качестве входной информации в модель SWAN.

Исходными данными о пространственном распределении льда в Каспийском море стала геоинформационная система (ГИС) «Ледовый режим южных морей России» [12; 13; 19]. ГИС «Ледовый режим южных морей России» включает историческую картографическую (шейп-файлы с атрибутивными сведениями, растровые объекты – картосхемы и спутниковые снимки) и численную (непространственные таблицы) информацию о положении кромки льда, сроках замерзания и разрушения ледового покрова, продолжительности ледового периода для Азовского, Черного и Каспийского морей. Источниками данных являются космические снимки (собственные данные ЮНЦ РАН, ААНИИ, НИЦ «Планета»), картосхемы облетов (Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек и Морские гидрометеорологические ежегодники). Численная информация собрана по данным сборников «Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек» и Морские гидрометеорологические ежегодники. Период исследований – с 1804 по 2015 г. ГИС непрерывно пополняется новыми данными. Отдельные обобщенные данные опубликованы в [5; 6]. По Каспийскому морю в ГИС накоплены численная информация с 1810 г. по настоящее время на пяти прибрежных метеопунктах, картографическая информация с 1950 по 2016 г., 531 картосхема.

Пробелы в данных имеются в период Второй Мировой войны с 1941 по 1945 г. и с 1990 по 1999 г. Для этих лет использовалось среднемноголетнее положение кромки льда в ноябре, декабре, январе, феврале, марте из [2].

Учет динамики береговой линии, морфометрии и ледового покрова при расчетах выполнялся с помощью специального программного модуля – конструктора сценариев. Модуль в автоматическом режиме считывает информацию из ГИС «Ледовый режим южных морей России» и ГИС «Каспийское море» для заданного расчетного периода. После наступления очередного ледового периода модуль последовательно проверяет ГИС «Ледовый режим» на наличие ледового покрова. При обнаружении ледовой поверхности модуль ограничивает расчетную сеточную область по кромке льда, последовательно заменяя одну ледовую поверхность другой до полного таяния льда. Аналогичная процедура применяется и при изменении уровня моря: при запуске расчета на, например, 1977 г. модуль автоматически проверит в файле параметров модуля какая батиметрия соответствует этому году в ГИС «Каспийское море» и ограничит расчетную область. Модуль одновременно может учитывать и лед, и динамику уровня моря. Для тестирования модуля выполнялся ряд расчетов по модели SWAN: 1) расчет без учета льда и динамики уровня, 2) расчет с ограничением «вручную» по ледовым поверхностям и морфометрии, 3) расчет с привлечением модуля.

#### **Описание, адаптация и верификация математической модели**

Для исследования волнового климата Каспийского моря использована спектральная модель SWAN (Simulating WAVes Nearshore Model), версия 41.01A. Это волновая модель третьего поколения для получения реалистичных параметров в прибрежных регионах, озерах и эстуариях при заданном ветре, батиметрии и текущих условиях. Модель разработана на факультете Гражданского строительства и наук о Земле Делфтского технического университета, Нидерланды [14; 22].

Адаптация и валидация модели к условиям Каспийского моря выполнялись в соответствии с ранее предложенным подходом, разработанным для Азовского моря [18; 20; 21].

Запуск модели в режиме адаптации осуществлялся для ряда контрольных временных интервалов, выбор которых обусловлен наличием данных наблюдений ветрового волнения на прибрежных метеостанциях в Единой системе информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) ([www.esimo.ru/](http://www.esimo.ru/)) и информации, опубликованной в работах [1; 8]. После подготовки всех исходных данных модель SWAN запускалась с параметрами «по умолчанию». Отдельно проверялся каждый физический процесс, предусмотренный моделью, и подбирались необходимые коэффициенты и параметры. Наибольшую вариативность расчетных значений ветрового волнения вносит параметр

«whitcapping» («забурунивание»), включение или отключение которого существенно занижает или завышает расчетные значения соответственно. Результаты экспериментов приведены на рис. 2.

Видно, что наилучший результат (в случае с месторождением Ракушечная коэффициент детерминации составляет  $R^2=0.7$ ) достигается при включенном параметре «whitcapping». При высоте волны более 1 м модель занижает расчетные значения в среднем на 20 см, но при этом хорошо воспроизводятся качественные характеристики. Систематическое занижение высоты волны по расчетам в сравнении с данными наблюдений отсутствует. Отчасти причиной существующих отличий между наблюдаемыми и расчетными значениями может быть разница в глубинах и погрешность между данными наблюдений за направлением и скоростью ветра и ре-анализом.

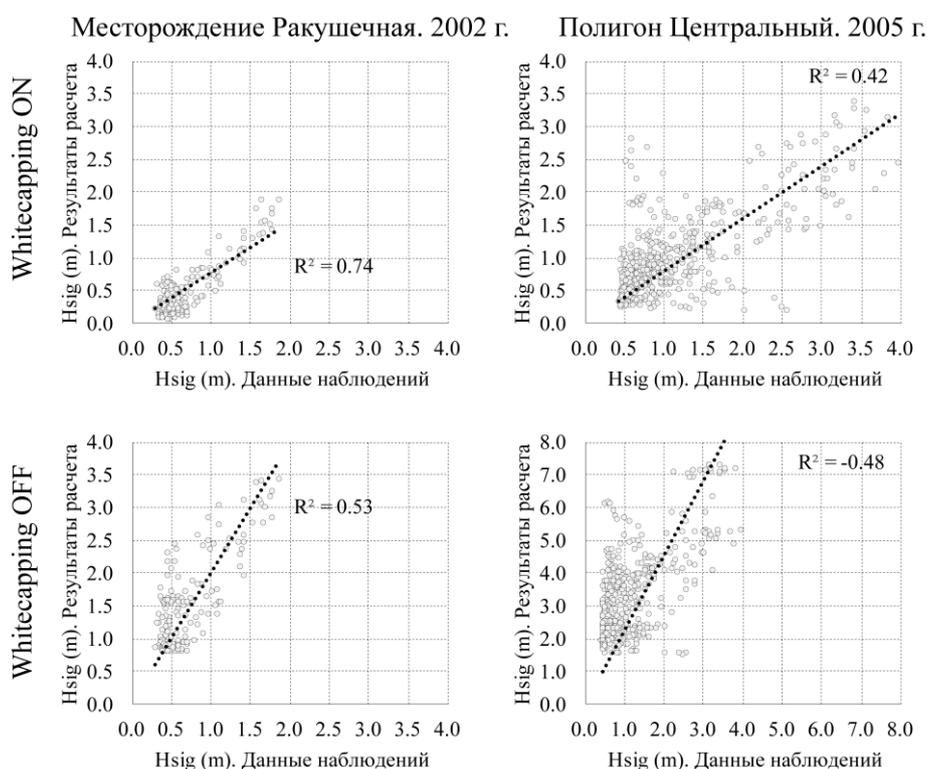


Рис. 2. Сопоставление данных наблюдений ADCP (полигон Центральный и месторождение Ракушечная) и результатов расчетов Hsig (м) по модели SWAN. Whitcapping ON – расчет с учетом забурунивания. Whitcapping OFF - расчет без учета забурунивания. Источник метеоданных: [1; 8]

Отдельный контроль качества выполнялся для штормовых ситуаций со скоростью ветра более 15 м/с, информация о которых опубликована в [2; 3]. Модель хорошо воспроизводит штормовые условия. На рис. 3 представлены примеры пространственного распределения высоты значительных волн во время штормовых ситуаций.

На основе проведенных вычислительных экспериментов определен ряд процессов и коэффициентов, которые были включены в итоговые расчеты: линейный рост волны в соответствии с [17]; диссипация из-за «забурунивания» (whitcapping); опрокидывание волн на мелководье, вызванное изменением глубины; придонное трение, параметризованное константой спектра JONSWAP [15]; трех- и четырех-волновое взаимодействие волн друг с другом (Quadruplets, Triads). Расчеты проводились непрерывно в течение каждого года. Предварительно формировались исполняемые файлы с входной информацией и необходимыми параметрами. Далее подготавливались исходные наборы данных. Дискретизация расчетов по времени составляет 1 сутки с 1948 по 2015 г. На каждом временном шаге значения искоемых параметров (значительные высоты волн, средний период, высота и направление волны и др.) рассчитывались в каждой ячейке сетки. Результаты – рассчитанные значения ветро-волновых характеристик для моря в целом и выделенных регионов записывались в выходные файлы для сеточных областей и отдельно для выбранных точек каждые сутки (рис. 1). Для обеспечения непрерывности расчетов создавались т.н. «хот-файлы», содержащие значения рассчитанных волновых параметров за последние сутки года, которые, в свою очередь, включались в качестве стартовых на следующем этапе расчетов.

Для контроля корректности модельных результатов на всех этапах привлекались данные наблюдений ветрового волнения на прибрежных метеостанциях из ЕСИМО. Полученные расчетные значения согласуются со сведениями, опубликованными в литературе [2].

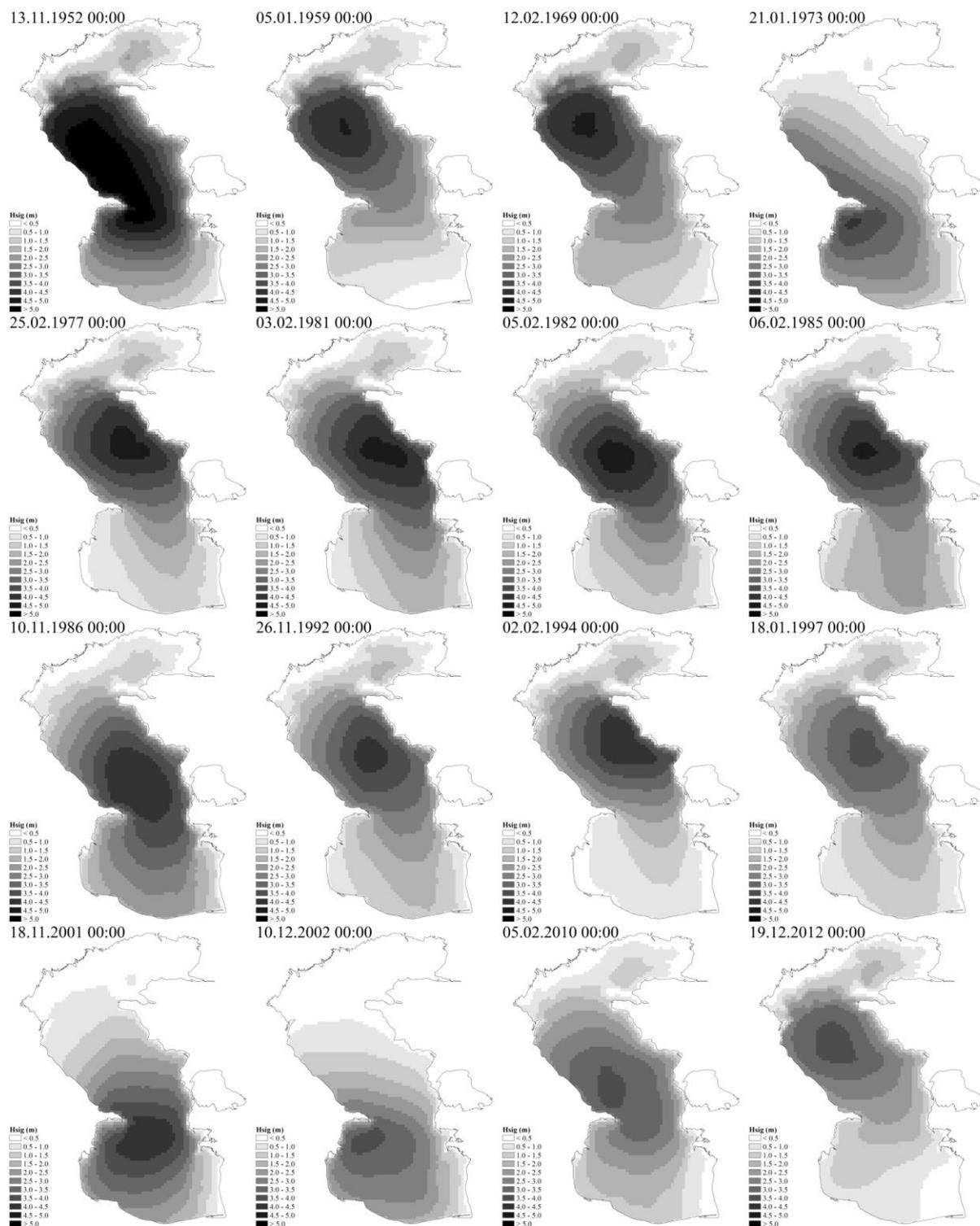


Рис. 3. Штормовые ситуации в Каспийском море по результатам расчетов (высота значительных волн, м). Картограммы приведены на 00:00 ч. Скорость ветра более 20 м/с

### Результаты и их обсуждение

В XX – начале XXI вв. климатические условия и водобалансовый режим Каспийского моря претерпели значительные изменения. Характерна значительная пространственно-временная неоднородность, на фоне которой прослеживается некоторая цикличность. При этом в отдельных районах межгодовые изменения являются синхронными, но не всегда однонаправленными.

В некотором роде эталонным периодом, до активного антропогенного вмешательства в экосистему водоема, можно считать период с 1900 по 1940 г. Наблюдения, проводившиеся на судах и прибрежных метеопунктах, позволяют сделать ряд выводов. В начале XX в. в Каспийском море была хорошо выражена сезонная динамика гидрометеорологических параметров. Волга – главный источник пресных вод – имела естественный (не зарегулированный) сток. Максимальный расход воды приходился на июнь и составлял от 14 000 до 29 000 м<sup>3</sup>/с. В среднем за год объем стока колебался от 175 до 308 км<sup>3</sup>/год (рис. 4А). Уровень Каспийского моря с 1900 г. постепенно снижался. И если в 1900 г. среднегодовые значения составляли минус 25,6 м (ГМС Махачкала), то уже к 1933 г. – минус 26,1 м, а менее чем через десять лет в 1941 г. стабилизировался возле отметок минус 27,7 м.

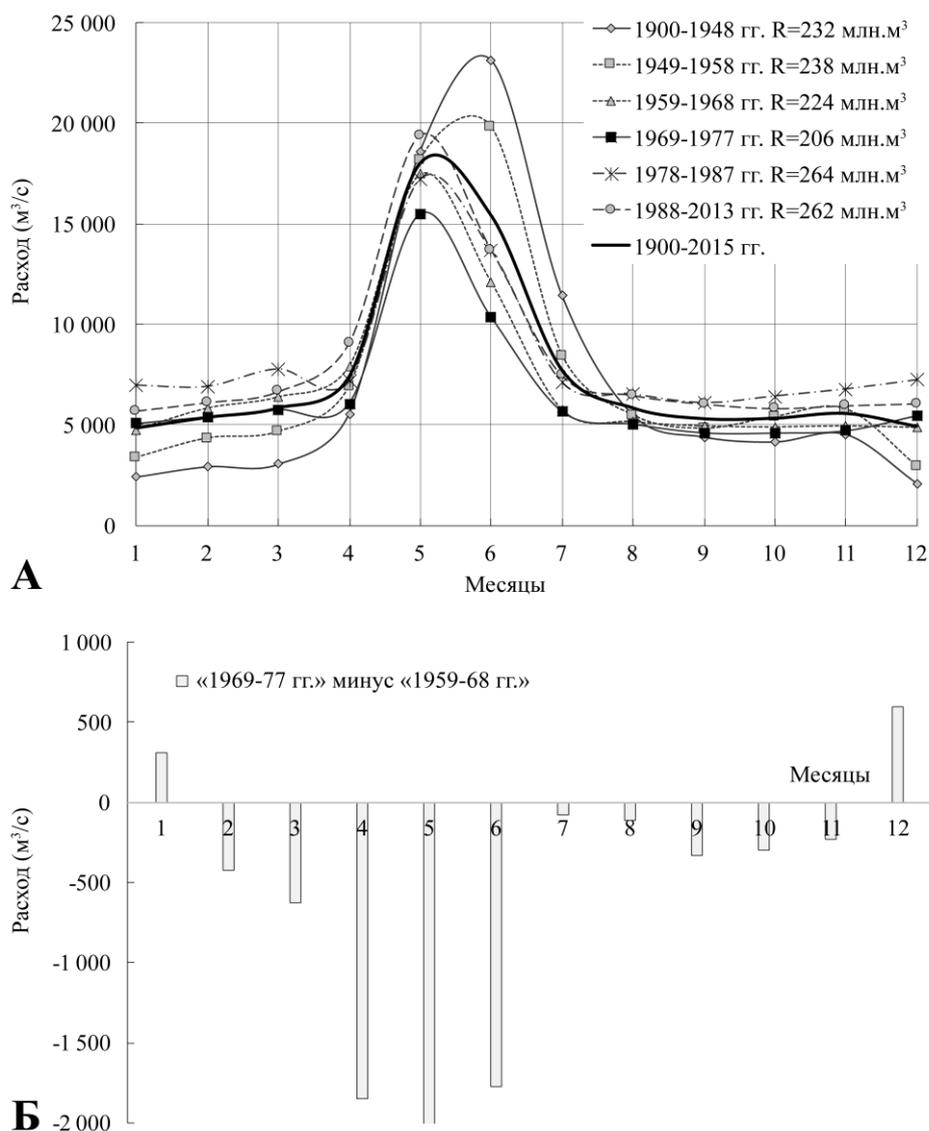


Рис. 4. Среднегодовой внутригодовой расход и объем стока р. Волги по периодам (А) и разница между двумя периодами (Б)

С 1950-х гг. и до 1970 были построены и запущены в эксплуатацию основные водохранилища на р. Волге, что привело к перераспределению объема стока по месяцам и постепенному смещению пика половодья с июня на май. При этом в среднем за год объем стока не уменьшился (232 км<sup>3</sup>/год), но пик стал существенно ниже (рис. 4А). За два десятилетия уровень моря продолжал снижаться с минус 28,0 м в 1950 г. до минус 28,3 м в 1970 г. Для всего западного побережья моря характерно преобладание ветров 2–4 м/с западного и северо-западного направлений, для восточного побережья – юго-западного и южного. Лишь в «поясе ветров» в районе Апшеронского полуострова в отдельные годы скорость возрастает до 6–7 м/с.

В это время для Каспийского моря характерно наличие интенсивного конвективного перемешивания, при котором за пределами шельфа сформировалась однородная вертикальная структура солености вод моря (в Среднем и Южном Каспии около 12,8‰ и 12,9‰) с увеличением значений к югу и юго-востоку до 13,1‰ по мере удаления от основного источника опреснения (рис. 6). Влияние волжских вод заметно лишь в узкой полосе вдоль западного побережья Среднего Каспия.

Для восточной части Северного Каспия и района Кулалинского порога наблюдаются пониженные значения солености по сравнению со среднеклиматической нормой на 1‰. Минимальные значения солености в восточном районе отмечаются в мае, когда практически весь район занят водами с соленостью <3,5‰. Северная область Кулалинского порога с мая по июль занята водами с соленостью до 3,5‰. Воды с соленостью более 12‰ севернее о. Кулалы не отмечаются.

Рассчитанные параметры волнения показали, что на мелководных участках высоты волн характеризуются значительной амплитудой. Высоты волн в большей степени зависят от глубины места, о чем свидетельствует увеличение минимальной высоты волны в Среднем и Южном Каспии по сравнению с Северным (рис. 5).

Наиболее существенные изменения произошли между **1970 и 1996 гг.** К 1970 г. уровень моря достиг отметок минус 28,3 м (по данным ГМС Махачкала) и, продолжая снижаться, в 1977 г. достиг отметок минус 29,0 м. Средний годовой объем стока р. Волги к 1970 г. составил 213,6 км<sup>3</sup>/год (рис. 6).

Падение уровня моря до отметок минус 28,9 м после 1970 г. привело к обмелению обширных участков акватории в Северном Каспии, особенно на востоке. Это отчасти сказалось на затруднении водообмена между Средним и Северным Каспием возле п-ова Мангышлак и усилении стока р. Волги вдоль западного побережья моря. Таким образом, несмотря на снижение объемов стока р. Волги до рекордно низких отметок (167,0 км<sup>3</sup>/год в 1975 г.) его влияние на соленость западного шельфа Северного и Среднего Каспия резко возросло, и средняя для моря соленость не изменилась (рис. 6). Большшему развитию стокового течения препятствовало изменение направления ветра с преобладающего западного на южное и юго-восточное в Северном и Среднем Каспии и с юго-западного на южное в Южном Каспии на фоне ветровой депрессии, проявившейся в разной степени для всего каспийского региона (рис. 6). Примечательно, что уменьшение объемов стока в основном произошло за счет весеннего стока (апрель-июнь), тогда как в декабре и январе он увеличился (рис. 4Б). В восточной части Северного Каспия наблюдается обратная тенденция. Увеличение компенсационного потока из Среднего Каспия и его проникновение вплоть до северной части Кулалинского порога способствовали осолонению на 2,5–3,0‰. Соленость восточной и западной частей практически выровнялась (9,2 и 10,6‰ соответственно).

В Среднем и Южном Каспии происходят опреснение поверхностного слоя вод моря и осолонение нижележащих, восстанавливается устойчивая стратификация. В промежуточном слое и придонных горизонтах значения солености возросли на 0,5–1,1‰, выше 50 м наоборот соленость снизилась на 0,2–0,3‰ (максимум в июне 0,4‰) по сравнению с предыдущим периодом. Соленость в центральной части уменьшается со средним темпом 0,02‰ в год. У восточного шельфа отмечается некоторое увеличение солености. На границе с Южным Каспием сформировались водные массы с соленостью до 12,7‰ до горизонта 50 м, что отмечалось ранее только в начале XX в. [4]. В Южном Каспии ниже 400 м соленость достигает 13,4‰.

Из-за ветровой депрессии уменьшилась общая высота волн (рис. 5, 6). Исключение составляет центральная часть Среднего Каспия, где максимальные высоты волн выросли. Поля параметров волнения стали более однородными по пространству, особенно южнее Апшеронского полуострова.

**В 1980-х гг.** и последующие пятнадцать лет на фоне подъема уровня моря (в 1995 г. – минус 26,49 м) длительного воздействия преобладающих ветров южной составляющей и роста объемов речного стока (в 1980 г. 249,5 км<sup>3</sup>/год, а в 1994 г. 335,0 км<sup>3</sup>/год) происходит распреснение Каспийского моря и окончательно складывается устойчивая соленостная стратификация. Характерной особенностью в многолетнем ходе для восточного района Северного Каспия является резкое снижение солености на всех горизонтах после 1982 г. в апреле, июне и октябре и увеличение разности значений между поверхностным и придонным горизонтами. На западе Северного Каспия пресные воды растекаются в поверхностном слое моря, а не как обычно вдоль берега. Южнее свала глубин воды стратифицированы весь год. Ранее [7] это явление отмечалось только в летние месяцы в юго-западном районе. Такая смена вертикальной стратификации и увеличение зоны поверхностного опреснения на границе Северного и Среднего Каспия может быть следствием возросшего объема речного стока, а также постепенной смены направления ветра и усилением его скорости. Заток

среднекаспийских вод происходит в придонной части разреза «4», далее распространяясь в восточную область через о. Кулалы.

В котловинах Среднего и Южного Каспия соленость уменьшилась и не превышала 12,8‰. Усилилась вертикальная стратификация вод; уменьшилась разница между восточным и западным побережьем. Формирование соленых вод с последующим их стеканием по склону восточного побережья не прослеживается. На границе с Южным Каспием сформировались водные массы с соленостью до 12,7‰ до горизонта 50 м, что отмечалось ранее только в начале XX в. [4].

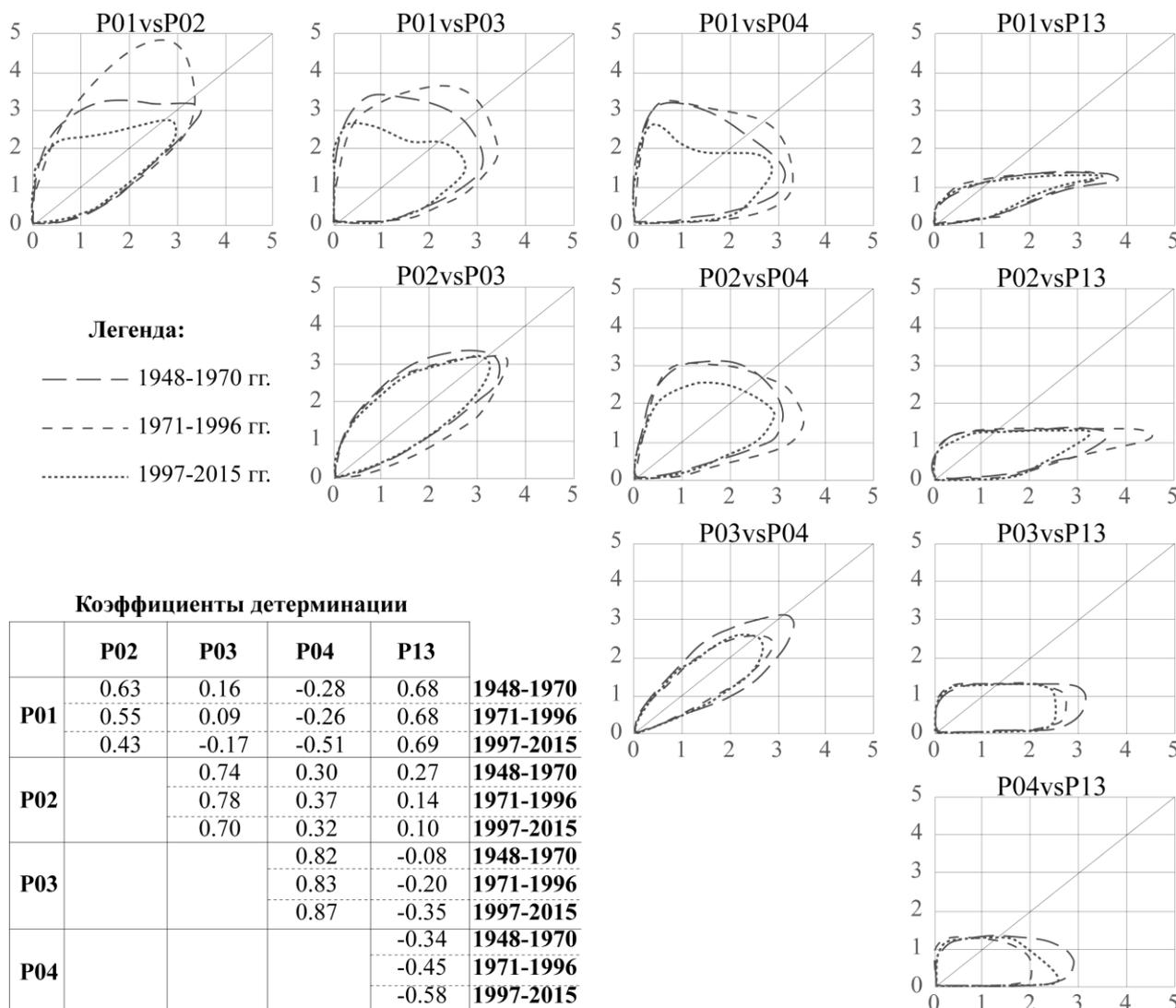


Рис. 5. Парные линейные регрессии высоты значительных волн ( $H_{sig}$ , м) для отдельных районов Каспийского моря по периодам

При этом усиливается контрастность полей волнения для разных районов моря – наблюдается неоднородность значений параметров волнения по пространству, средние и минимальные высоты волн увеличиваются. Коэффициенты детерминации парных линейных регрессий (рис. 5), рассчитанные для отдельных районов моря, уменьшаются. Наибольшие различия в параметрах волнения отмечаются между Северным Каспием и остальной акваторией.

**Период после 1997 г.** и до настоящего времени можно условно назвать «стабилизацией». На всех прибрежных метеопунктах постепенно изменяется направление ветра на преобладающее до 1970 г.: с южного и юго-восточного на западное и северо-западное в Северном и Среднем Каспии и с южного на юго-западное – в Южном. Но только после 2000–2004 гг. во всем прикаспийском регионе усиливается скорость ветра (рис. 6). Уровень моря колеблется возле отметок минус 27,1 м. Среднегодовой объем речного стока составляет 257,8 км<sup>3</sup>/год. Для солености характерно наличие устойчивой стратификации. Современный режим и значения солености (наличие выраженной вертикальной устойчивой стратификации и некоторое снижение по сравнению с 1960–1970 гг.)

соответствуют режиму и значениям солености начала XX в. И после более чем 30-летнего увеличения и смены типа TS-стратификации вод режим солености практически вернулся к состоянию начала XX в.

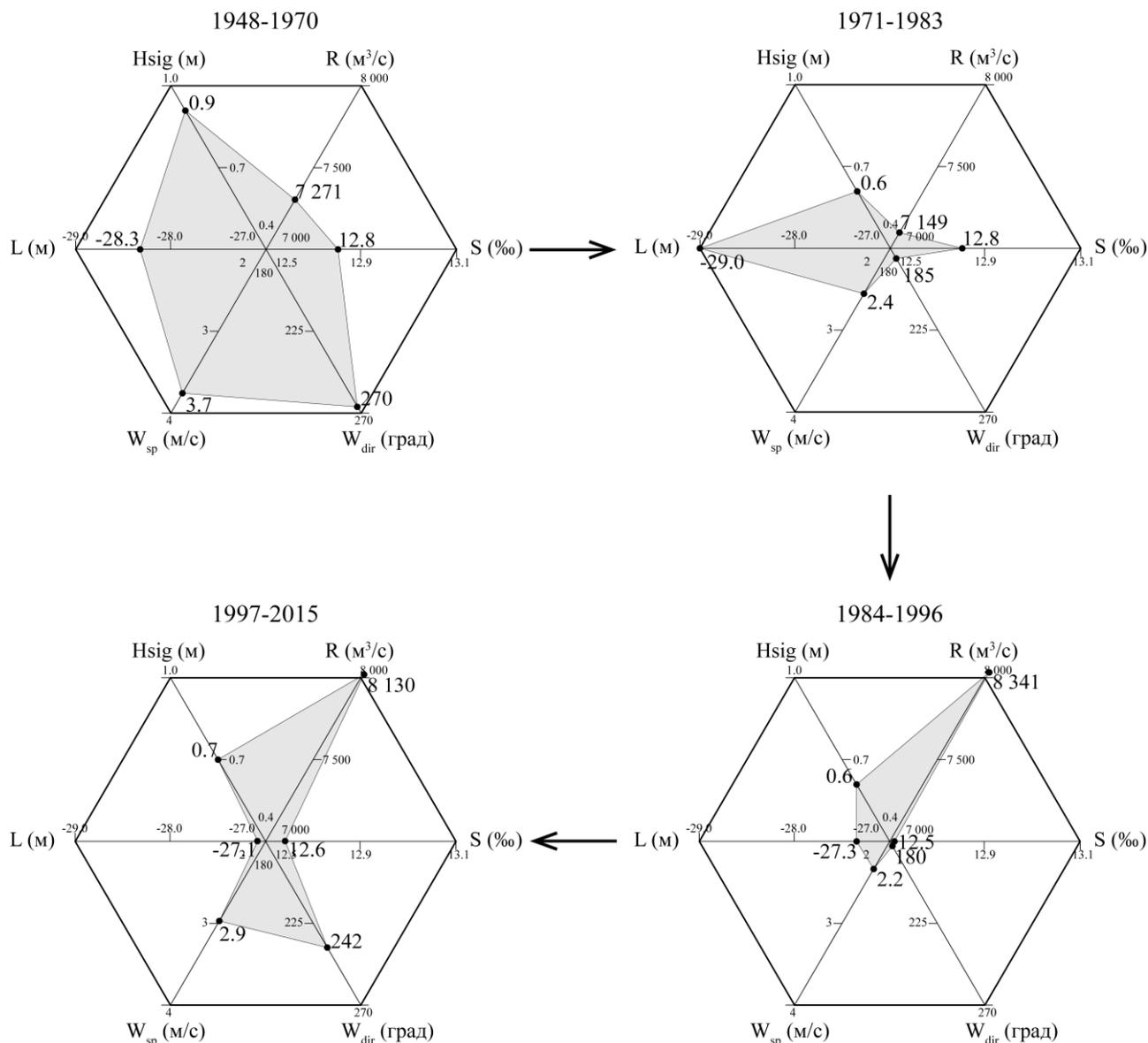


Рис. 6. Внутривековые флуктуации (для характерных периодов) элементов водного баланса, гидрологического режима, метеорологической обстановки в регионе Каспийского моря: Hsig – высота значительных волн; R – расход р. Волги; S – соленость вод моря; Wdir – направление ветра; Wsp – скорость ветра; L – уровень моря (Махачкала)

### Заключение

К условиям Каспийского моря адаптирована спектральная ветро-волновая модель SWAN: подготовлена высокоточная батиметрия моря в целом и отдельных ключевых районов; отрегулированы физические параметры модели; подготовлены исходные многолетние ряды UV-компонент ветра ре-анализа NCEP/NCAR. Для детализации ключевых районов моря применена схема расчетов ветро-волновых параметров с использованием трехуровневой системы вложенных сеток. Дополнительно при расчетах учитывались сезонная динамика положения кромки льда, межгодовые изменения морфометрических параметров и береговой линии в зависимости от колебаний уровня моря.

Выполнены непрерывные серии расчетов среднесуточных ветро-волновых параметров Каспийского моря – значительная высота волны, направление волнения, период волнения и др. – с 1948 по 2015 гг. Для контроля корректности результатов моделирования на всех этапах привлекались

данные наблюдений за ветро-волновыми параметрами на прибрежных метеостанциях из ЕСИМО. Полученные расчетные значения согласуются со сведениями, опубликованными в литературе [2]. Таким образом, была создана основа для идентификации основных особенностей волнового климата в Каспийском море.

Анализ долговременных статистических характеристик волновых параметров показал, что в режиме волнения, как и других параметров, за более чем полвека произошли существенные изменения: увеличилась амплитуда поля волнения при движении с севера на юг, при этом южнее Апшеронского п-ова наблюдается однородность. Поле волнения стало более рассогласованным, нарушились связи между отдельными районами моря. Это стало следствием неоднородности поля ветра во всем каспийском регионе, смены направления и нестабильности скорости. Большой вклад в формирование волнения стала вносить глубина района. Рассчитанные элементы волнового климата подтвердили ранее сделанные выводы о наличии ряда характерных периодов во внутривековом режиме моря.

### Библиографический список

1. Амбросимов С.А., Амбросимов Е.С. Экспериментальные исследования ветрового волнения в центральной части Каспийского моря // Инженерная физика. 2007. № 6. С. 41–47.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. VI. Каспийское море / под ред. Ф.С. Терзиева. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 360 с.
3. Каспийское море. Гидрология и гидрохимия / под ред. А.Д. Добровольского. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1969. 264 с.
4. Книпович Н.М. Труды Каспийской экспедиции 1914–1915 гг. Гидрологические исследования в Каспийском море в 1914–1915 гг. Т.1. Петроград: Гос. изд-во, 1921. 943 с.
5. Матишов Г.Г., Яицкая Н.А., Бердников С.В. Особенности внутривекового режима солёности Каспийского моря // Доклады академии наук. 2012. Т. 444. № 5. С. 549–553.
6. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Жичкин А.П., Макаревич П.Р., Дженюк С.Л., Кулыгин В.В. и др. Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013). Регион 1. Моря Восточной Арктики. Регион 2. Черное, Азовское и Каспийское моря. Ростов н/Д: Из-во ЮНЦ РАН, 2014. 256 с.
7. Пахомова А.С., Затучная Б.М. Гидрохимия Каспийского моря. Л.: Гидрометеоздат, 1966. 343 с.
8. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей / под ред. Л.И. Лопатухина и др. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2003. 213 с.
9. Яицкая Н.А. Термохалинный режим Каспийского моря при изменении уровня: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Мурманск, 2012. 28 с.
10. Яицкая Н.А. Изучение экстремальных проявлений гидрологического режима Каспийского моря: ре-анализ и прогноз // Устойчивое развитие особо охраняемых природных территорий. Т.2. Сочи: ГБУ КК «Природный орнитологический парк в Имеретинской низменности»; Дониздат, 2015. С. 358–365.
11. Яицкая Н.А. Цифровая модель рельефа дна Каспийского моря // Экология. Экономика. Информатика. Т.2: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. Вып. 2. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2016. С. 187–196.
12. Яицкая Н.А., Глущенко В.В. Исследование ледовой обстановки Северного Каспия с помощью данных спутникового мониторинга // III конференция «Геоинформационные технологии и космический мониторинг». Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2010. С. 140–146.
13. Berdnikov S., Yaitskaya N., Lychagina Yu. The study of ice conditions of the Caspian Sea using satellite monitoring data (2008–2011) // Proceedings of the Fourth International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE 2013) and SECOTOX Conference. Grafima Publications, 2013. P. 855–859.
14. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation // Journal of Geophysical Research. 1999. 104. P. 7649–7666.
15. Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E., Carlson H., Cartwright D.E., Enke K., Ewing J.A., Gienapp H., Hasselmann D.E., Kruseman P., Meerburg A., Müller P., Olbers D.J., Richter K., Sell W., Walden H. Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Hamburg: Deutsches Hydrographisches Institut, 1973. 95 p.
16. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J.,

Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bulletin of the American Meteorological Society. 1996. 77. P. 437–470.

17. Komen G.J., Hasselmann K., Hasselmann K. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum // Journal of physical oceanography. 1984. 14(8). P. 1271–1285.

18. Tretyakova I.A., Yaitskaya N.A. Methods for assessing dangerous storm and surge phenomena in the basin and coastal zone of the Sea of Azov // Geographic information technologies and prediction of extreme events. Rostov-on-Don: Publishing house SSC RAS, 2015. P. 101–122.

19. Yaitskaya N., Lychagina Y., Berdnikov S. The ice conditions study of the Caspian Sea during the winter periods 2008–2010 using satellite monitoring data and geographical information system // Fresenius Environmental Bulletin. 2014. 23(11). P. 2771–2777.

20. Yaitskaya N.A., Tretyakova I.A. The study of hazardous natural phenomena in the Sea of Azov basin by mathematical modeling and GIS technologies // Geoinformation Sciences and Environmental Development: New Approaches, Methods, Technologies. Rostov-on-Don: Publishing house SSC RAS, 2014. P. 152–165.

21. Yaitskaya N.A., Tretyakova I.A. Mathematical modeling of dangerous storm and surge phenomena in the basin of the Sea of Azov (March 24, 2013) // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016, Conference Proceedings, Book 3. Vol. 1. P. 481–488. DOI: 10.5593/SGEM2016/B31/S12.063.

22. Young I.R. Wind generated ocean waves. Eds. R. Bhattacharyya and M.E. McCormick. Ocean Engineering Series. Amsterdam: Elsevier, 1999. 288 p.

### References

1. Ambrosimov, S.A. and Ambrosimov, E.S. (2007), “Experimental studies of wind waves in the central part of the Caspian Sea”, *Inzhenernaya fizika*, no. 6, pp. 41–47.

2. Terziev, F.S. (ed.) (1992), *Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Vol. VI. Caspian Sea*, Hydrometeoizdat, Saint-Petersburg, Russia.

3. Dobrovolsky, A.D. (ed.) (1969), *Caspian Sea: hydrology and hydrochemistry*, Moscow State University Publishing House, Moscow, USSR.

4. Knipovich, N.M. (1921), *Trudy Kaspiyskoy ehkspeditsii 1914-1915 gg. Gidrologicheskie issledovaniya v Kaspiyskom more v 1914-1915 gg. T.1.* [Proceedings of the Caspian expedition of 1914–1915. Hydrological studies in the Caspian Sea in 1914–1915. T.1.], State Publishing, Petrograd, USSR.

5. Matishov, G.G., Yaitskaya, N.A., Berdnikov, S.V. (2012), “Peculiarities of the Centennial Salinity Regime of the Caspian Sea”, *Doklady Earth Sciences*, vol. 444, no. 2, pp. 747–751.

6. Matishov, G.G., Berdnikov, S.V., Zhichkin, A.P., Makarevich, P.R., Dzhenyuk, S.L., Kulygin, V.V., Yaitskaya, N.A., Povazhnyi, V.V., Sheverdyayev, I.V., Kumpan, S.V., Tretyakova, I.A. and Tsygankova, A.E. (2014), *Atlas klimaticheskikh izmeneniy v bolshih morskikh ehkositemah Severnogo polushariya (1878-2013). Region 1. Morya Vostochnoy Arktiki. Region 2. Chernoe, Azovskoe i Kaspiyskoe morya* [Atlas of climatic changes in the large marine ecosystems of the northern hemisphere (1878–2013). Region 1. East Arctic Seas. Region 2. Black, Azov and Caspian Seas], SSC RAS Publishing House, Rostov-on-Don, Russia.

7. Pakhomova, A.S. and Zatuchnaya, B.M. (1966), *Gidrohimiya Kaspiyskogo morya* [Hydrochemistry of the Caspian Sea], Hydrometeoizdat, Leningrad, USSR.

8. Lopatoukhin, L.I. (ed.) (2003), *Spravochnye dannye po rezhimu vetra i volneniya Barentseva Ohotskogo i Kaspiyskogo morey* [Reference data on the regime of wind and waves of the Barents, Okhotsk Sea and Caspian Sea], Russian Maritime Register of Shipping, Saint-Petersburg, Russia.

9. Yaitskaya, N.A. (2012), *Termohalinnyy rezhim Kaspiyskogo morya pri izmenenii urovnya: avtoreferat dissertatsii kandidata geographicheskikh nauk 25.00.28* [Termohaline regime of the Caspian Sea during the level changes: Abstract of the thesis PhD of Geography 25.00.28], Murmansk, Russia.

10. Yaitskaya, N.A. (2015), “Study of extreme manifestations of the hydrological regime of the Caspian Sea: re-analysis and forecast”, in Shagarov, L.M. (ed.), *Ustoychivoe razvitie osobo ohranyaemykh prirodnykh territoriy. Tom 2* [Sustainable development of specially protected natural areas. Volume 2], Donizdat, Sochi, Russia.

11. Yaitskaya, N.A. (2016), “Digital elevation model of the Caspian Sea”, in Arkhipova, O.E. (ed.), *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Sbornik statey v 2-h t. T. 2: Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskii monitoring. Vypusk 2* [Ecology. Economy. Computer science. Collection of articles: in 2

volumes vol. 2: Geoinformation technologies and space monitoring. Issue 2]. SSC RAS Publishing House, Rostov-on-Don, Russia.

12. Yaitskaya, N.A. and Glushchenko, V.V. (2010) "Investigation of the ice situation in the Northern Caspian using satellite monitoring data", *III konferentsiya "Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskii monitoring"* [III conference "Geoinformation technologies and space monitoring"], Rostov-n-Don, Russia, 3-7 September, pp. 140-146.

13. Berdnikov S., Yaitskaya N., Lychagina Yu. (2013), The study of ice conditions of the Caspian Sea using satellite monitoring data (2008–2011), Proceedings of the Fourth International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE 2013) and SECOTOX Conference, Grafima Publications, pp. 855–859.

14. Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H. (1999), "A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation", *Journal of Geophysical Research*, vol. 104, pp. 7649–7666.

15. Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W. and Walden, H. (1973), *Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*, vol. 8, no. 12, Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg, Germany.

16. Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R. and Joseph, D. (1996), "The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project", *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 77, pp. 437–470.

17. Komen, G. J., Hasselmann, K., Hasselmann, K. (1984), "On the existence of a fully developed wind-sea spectrum", *Journal of physical oceanography*, vol. 14, no. 8, pp. 1271-1285.

18. Tretyakova, I.A. and Yaitskaya, N.A. (2015), "Methods for assessing dangerous storm and surge phenomena in the basin and coastal zone of the Sea of Azov", in Berdnikov, S.V., Yaitskaya, N.A. (ed.), *Geographic information technologies and prediction of extreme events*, Publishing house SSC RAS, Rostov-on-Don, Russia.

19. Yaitskaya, N., Lychagina, Y. and Berdnikov, S. (2014), "The ice conditions study of the Caspian Sea during the winter periods 2008–2010 using satellite monitoring data and geographical information system", *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 23, no. 11, pp. 2771–2777.

20. Yaitskaya, N.A. and Tretyakova, I.A. (2014), "The study of hazardous natural phenomena in the Sea of Azov basin by mathematical modeling and GIS technologies", in Berdnikov, S.V., Arkhipova, O.E., Yaitskaya, N.A. (ed.), *Geoinformation Sciences and Environmental Development: New Approaches, Methods, Technologies*, Publishing house SSC RAS, Rostov-on-Don, Russia.

21. Yaitskaya, N.A. and Tretyakova, I.A. (2016), "Mathematical modeling of dangerous storm and surge phenomena in the basin of the Sea of Azov (March 24, 2013)", *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016, Conference Proceedings*, Book 3, vol. 1, pp. 481–488.

22. *Young I.R.* Wind generated ocean waves. Eds. R. Bhattacharyya and M.E. McCormick. Ocean Engineering Series. Amsterdam: Elsevier, 1999. 288 p.

Поступила в редакцию: 28.03.2017

## Сведения об авторе

### Яицкая Наталья Александровна

кандидат географических наук, старший научный сотрудник Южного научного центра Российской академии наук, 344006, Россия, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41; Филиал «Институт природно-технических систем»; 354000, Россия, Сочи, Курортный проспект, 99/18; e-mail: yaitskayan@gmail.com

## About the author

### Natalia A. Yaitskaya

Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher, Southern Scientific Centre of the RAS; 41, Chekhova st., Rostov-on-Don, 344006, Russia; Branch of the Institute of Natural and Technical Systems; 99/18, Kurortnyi prospekt, Sochi, 354000, Russia; e-mail: yaitskayan@gmail.com

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

*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 = Geographical bulletin. 2017. №2(41). С.57–70. doi 10.17072/2079-7877-2017-2-57-70

**Please cite this article in English as:**

*Yaitskaya N.A.* Retrospective analysis of wind waves in the Caspian Sea in the second half of the XX – beginning of the XXI century and its connection with the regional climate changes // Geographical bulletin. 2017. № 2(41). P. 57–70. doi 10.17072/2079-7877-2017-2-57-70