

УДК 551.466

ТЕНДЕНЦИИ В ДИНАМИКЕ ВОЛНОВОГО КЛИМАТА ОТКРЫТОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ ЗА ПЕРИОД С 1990 ПО 2014 гг.

© 2015 г. Б. В. Дивинский, Р. Д. Косьян

*Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Геленджик**e-mail: divin@ocean.ru, rkosyan@hotmail.com*

Поступила в редакцию 07.05.2015 г., после доработки 07.05.2015 г.

Основная цель работы – исследование штормовой активности на Черном море за последние 25 лет. Используемый метод – математическое моделирование. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что за период с 1990 по 2014 гг. среднегодовая мощность ветрового волнения выросла на 10–15%, причем, в основном, за счет усиления восточной составляющей атмосферной циркуляции.

DOI: 10.7868/S0030157415060040

ВВЕДЕНИЕ

Современное понимание экономического развития морских акваторий предполагает использование не только их навигационных или рекреационных возможностей, но и освоение энергетического потенциала поверхностного волнения. До недавних пор препятствиями к экономически выгодному извлечению энергии морских волн на Черном море считались небольшое среднегодовое значение мощности волн и недостаточные КПД волновых преобразователей. Однако совершенствование средств океанотехники в условиях меняющегося климата могут изменить положение дел. Исследования тенденций в динамике волнового климата необходимы при рассмотрении целесообразности и эффективности того или иного метода извлечения волновой энергии.

Проблематика волнового климата Черного моря находилась в фокусе внимания нескольких отечественных [2] и зарубежных [3, 4, 7, 9, 11] исследовательских групп. Однако в указанных работах нет ответа на, пожалуй, главный вопрос: существуют ли тренды в изменении волнового климата Черного моря за последнее время? Каковы тенденции перераспределения волновой энергии на акватории Черного моря?

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Математическое моделирование является современным и весьма продуктивным средством исследования параметров поверхностного волнения. В настоящее время значительное развитие получили спектральные модели ветрового волнения. В рамках регионального применения наибольшую известность получили такие реализации спектральных моделей, как SWAN Дельфтского

Технологического университета [5], MIKE 21 SW Датского Гидравлического института [8], STWAVE [12]. Первые два модуля могут использоваться как в стационарном, так и нестационарном режимах, STWAVE – только в стационарном. В отличие от коммерческого MIKE 21 SW, SWAN находится в свободном доступе и, в целом, обладает большим количеством настраиваемых параметров. По этой причине SWAN можно определить как исследовательскую модель, а MIKE 21 SW – как пользовательскую.

Выбор модели. На этапе выбора рабочей модели проведено сравнительное моделирование с использованием идентичных входных и настроечных параметров. Тестовые расчеты показали, что модели MIKE 21 SW и SWAN дают, в целом, аналогичные результаты (пример приведен на рис. 1).

В качестве инструмента исследований выбрана модель MIKE 21 SW. Немаловажным преимуществом модели является удобный пользовательский интерфейс, а также широкие возможности пре- и постпроцессинга.

Исходный ветер. Процедура определения исходных полей ветра, используемых при моделировании, следующая. Вначале из массива данных глобального атмосферного реанализа ERA-Interim, представленного Европейским центром среднесрочных прогнозов (<http://apps.ecmwf.int>), выбираются карты приземного атмосферного давления. Пространственное разрешение составляет 0.25 градуса, шаг по времени – 3 часа. По массивам приземного давления определяется градиентный ветер и далее путем коррекции рассчитываются горизонтальные компоненты стандартного ветра на высоте 10 м над уровнем моря (U_{10} , V_{10}). Таким образом, данные ERA-Interim позволяют

сформировать поля атмосферного давления и компонент скорости ветра над заданной акваторией с временным шагом 3 часа.

Верификация спектральной модели. Отправным пунктом перед непосредственным использованием любой модели является ее верификация с привлечением данных прямых экспериментальных наблюдений. Для Черного моря наиболее репрезентативными являются данные волнового эксперимента, проведенные в 1996–2003 годах на базе ЮО ИО РАН [10]. В рамках международной программы NATO TU-WAVES с целью изучения волнового климата Черного моря в прибрежной зоне г. Геленджик был установлен волноизмерительный буй “Directional Waverider Buoy”, изготовленный нидерландской фирмой Datawell. Координаты точки установки: 44°30'40" с.ш., 37°58'70" в.д., глубина места – 85 м. Кроме того, два аналогичных буй располагались у побережья Турции [14]: станция Нора с координатами 41°25'24" с.ш., 41°23'00" в.д., и станция Sinop с координатами 42°07'24" с.ш., 35°05'12" в.д. Глубина моря в местах постановки обоих буюв составляла 100 м. Дополнительно, для верификации математических моделей, использовались экспериментальные волновые данные, полученные с нефтяной платформы Gloria ([13], глубина 50 м), а также с помощью донной станции ADCP ([1], глубина 22 м). В дальнейшем качество волновой спектральной модели определяется соответствием экспериментальных и расчетных данных. При анализе результатов воспользуемся условным районированием Черного моря, предложенным в [2]. Отдельные районы моря, выделенные в справочнике, характеризуются квазиоднородными условиями волнообразования. Положение точек наблюдения за параметрами ветрового волнения, а также границы районов представлены на рис. 2. Отдельно выделен район, соответствующий Азовскому морю (точка А, на рис. 2).

Сравнение экспериментальных данных и результатов расчетов по спектральной волновой модели показывают, что использование полей приземного давления ERA-Interim в качестве ветрового форсинга спектральной модели вполне приемлемо (рис. 3, 4). Коэффициенты корреляции рассчитанных и наблюдаемых рядов высот волн составляют порядка 0.8–0.9. Модель хорошо работает как в глубоководной части, так и в прибрежных отмелях районах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Получен обширный массив данных, состоящий из полей рассчитанных параметров ветрового волнения Черного и Азовского морей с временным шагом 3 часа и охватывающий период в

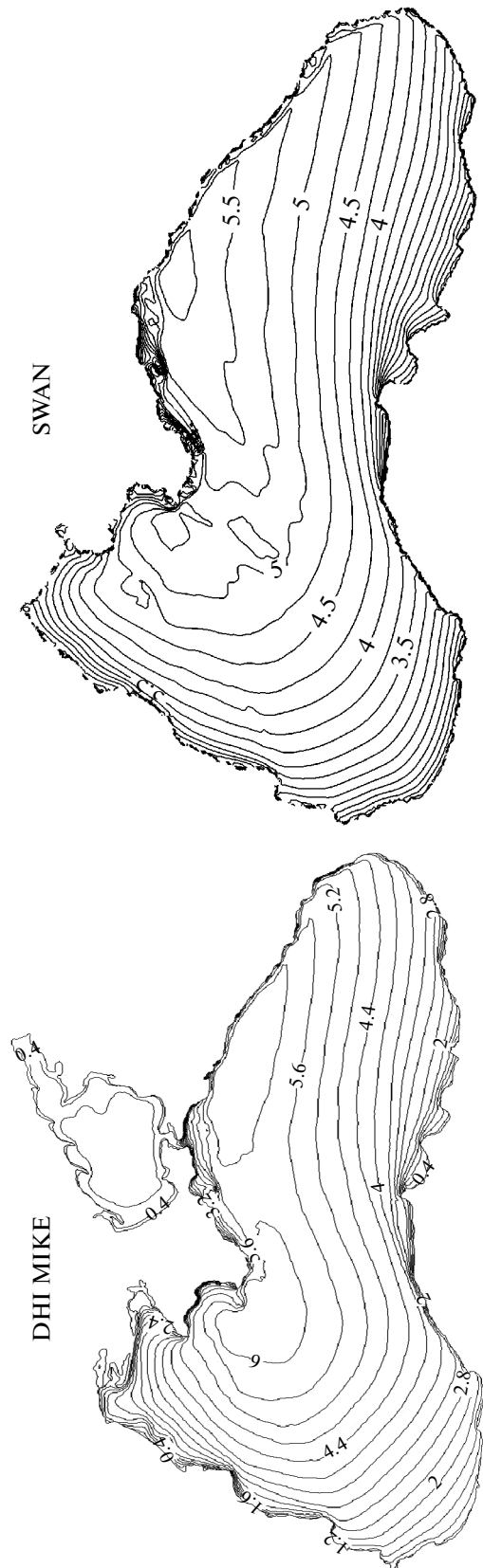


Рис. 1. Поля значительных высот волн (м) при шторме южного направления, возможном раз в 25 лет. Расчеты по моделям MIKE 21 SW и SWAN.

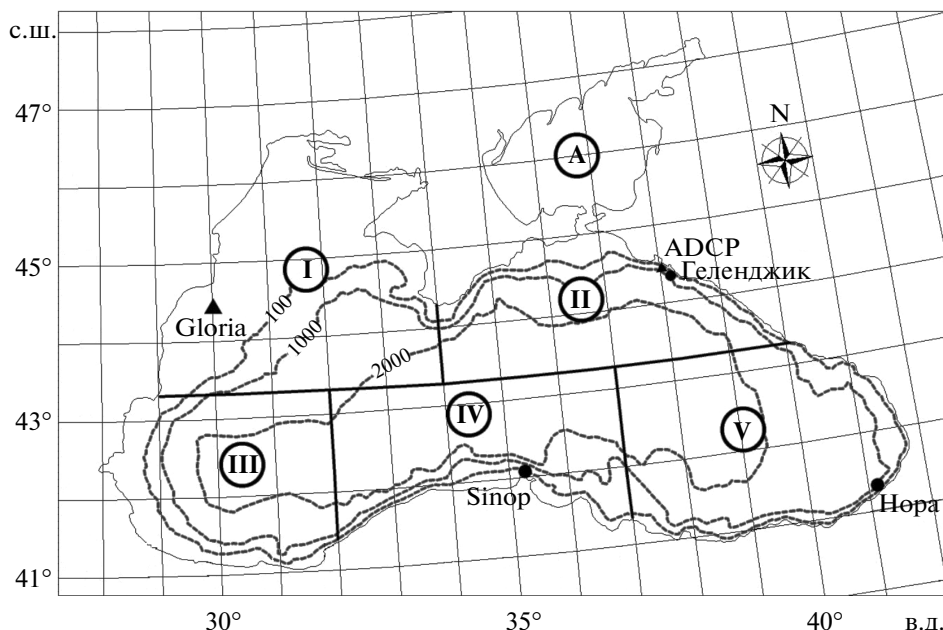


Рис. 2. Положение точек наблюдения за параметрами ветрового волнения, а также условное районирование Черного моря, согласно [2]. I, II, III, IV, V – районы Черного моря, А – Азовское море.

25 лет (с 1990 по 2014 гг.). Массив расчетных характеристик включает в себя:

- пространственные распределения значительных и максимальных высот волн, средних периодов, периодов максимума спектра, направления волнения;
- частотные и частотно-направленные спектры ветрового волнения;
- мощность ветрового волнения.

На глубокой воде мощность нерегулярного ветрового волнения оценивается выражением [6]:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} h_s^2 t_e \approx \left(0.5 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^3 \text{с}} \right) h_s^2 t_e,$$

где h_s – значительная высота волн, t_e – период волн, ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения. Энергетический период определяется как период простой монохроматической волны с мощностью, эквивалентной мощности данного нерегулярного волнения, и принимается равным $0.9t_p$ (t_p – период пика спектра). Если значительная высота волн представлена в метрах, период – в секундах, то мощность волнения будет выражаться в киловаттах на метр волнового фронта. Поскольку значительные высоты волн и периоды определяются через моменты энергетического спектра, оценка энергетической мощно-

сти ветрового волнения полностью зависит от корректности и адекватности спектральной модели при воспроизведении всех стадий развития волнения.

2. Для каждого района получены характеристики штормов (продолжительность, высоты волн, волновая энергия) по сезонам и направлениям распространения. Рис. 5 дает наглядное представление о наиболее волноопасных направлениях. Размер значков пропорционален рассчитанной мощности ветрового волнения. Во всех районах наиболее сильные шторма приурочены к северо-западным румбам, за исключением района III, для которого более развита северо-восточная составляющая.

Средние показатели волновой мощности составляют порядка 3–4 кВт/м. В отдельных экстремальных штормах мощность ветрового волнения может достигать 600 кВт/м.

3. Полученные данные позволили выявить общие тенденции в штормовой активности на Черном и Азовском морях. Главный вывод: за последние 25 лет среднегодовые показатели мощности ветрового волнения на Черном море выросли на 10–15 процентов. Азовское море в этом отношении, естественно, более консервативно, поскольку присущие ему малые глубины сами по себе являются лимитирующим фактором. Особенно заметно усиление штормовой активности для II и V районов. Отметим две немаловажные детали: 1) этот рост обеспечивается, в основном, увели-

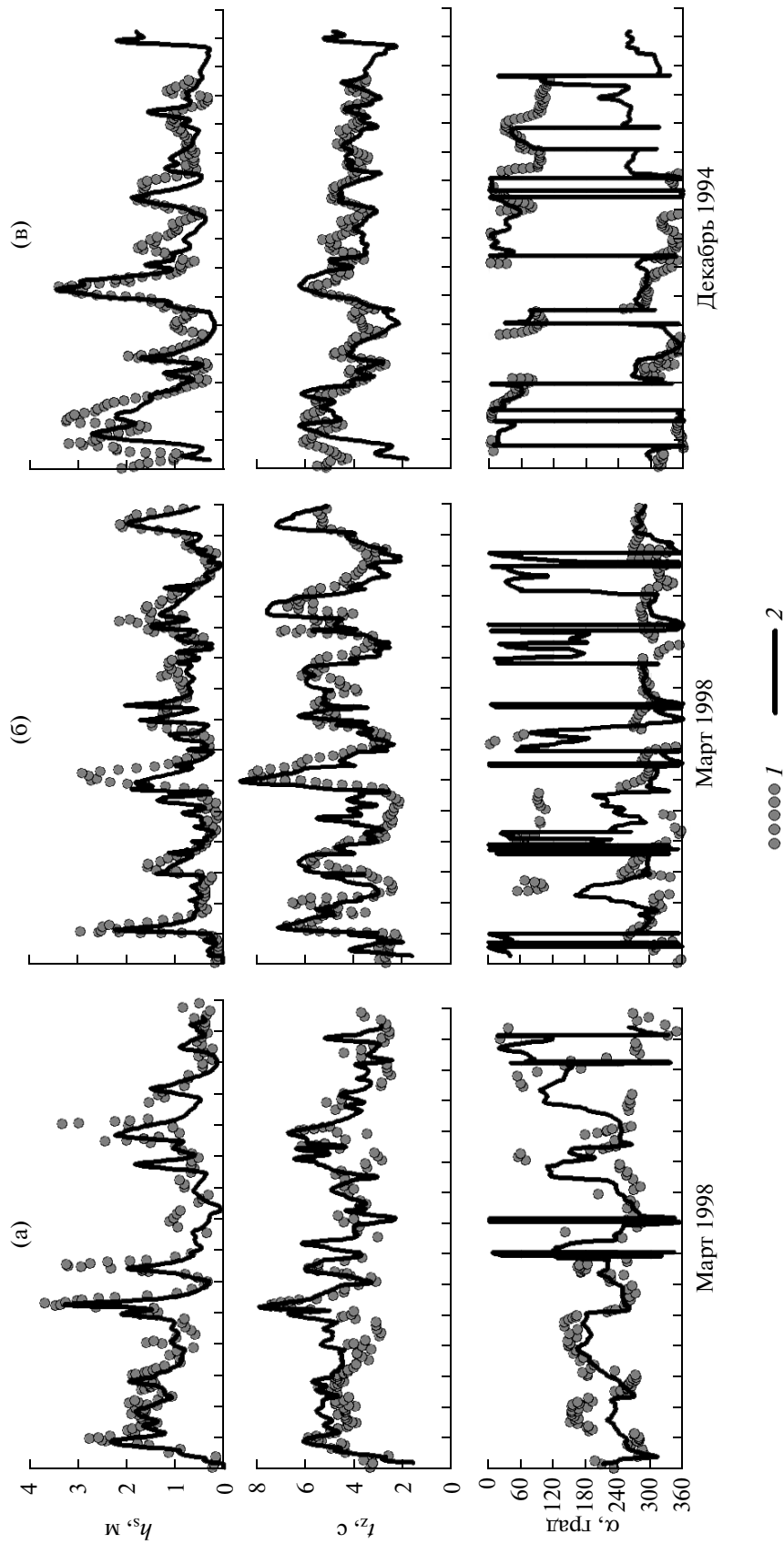


Рис. 3. Буйковые станции Datawell. Параметры ветрового волнения (значительные высоты волн h_s , средние периоды T_z и направления распространения α). 1 – экспериментальные данные, 2 – результаты моделирования.

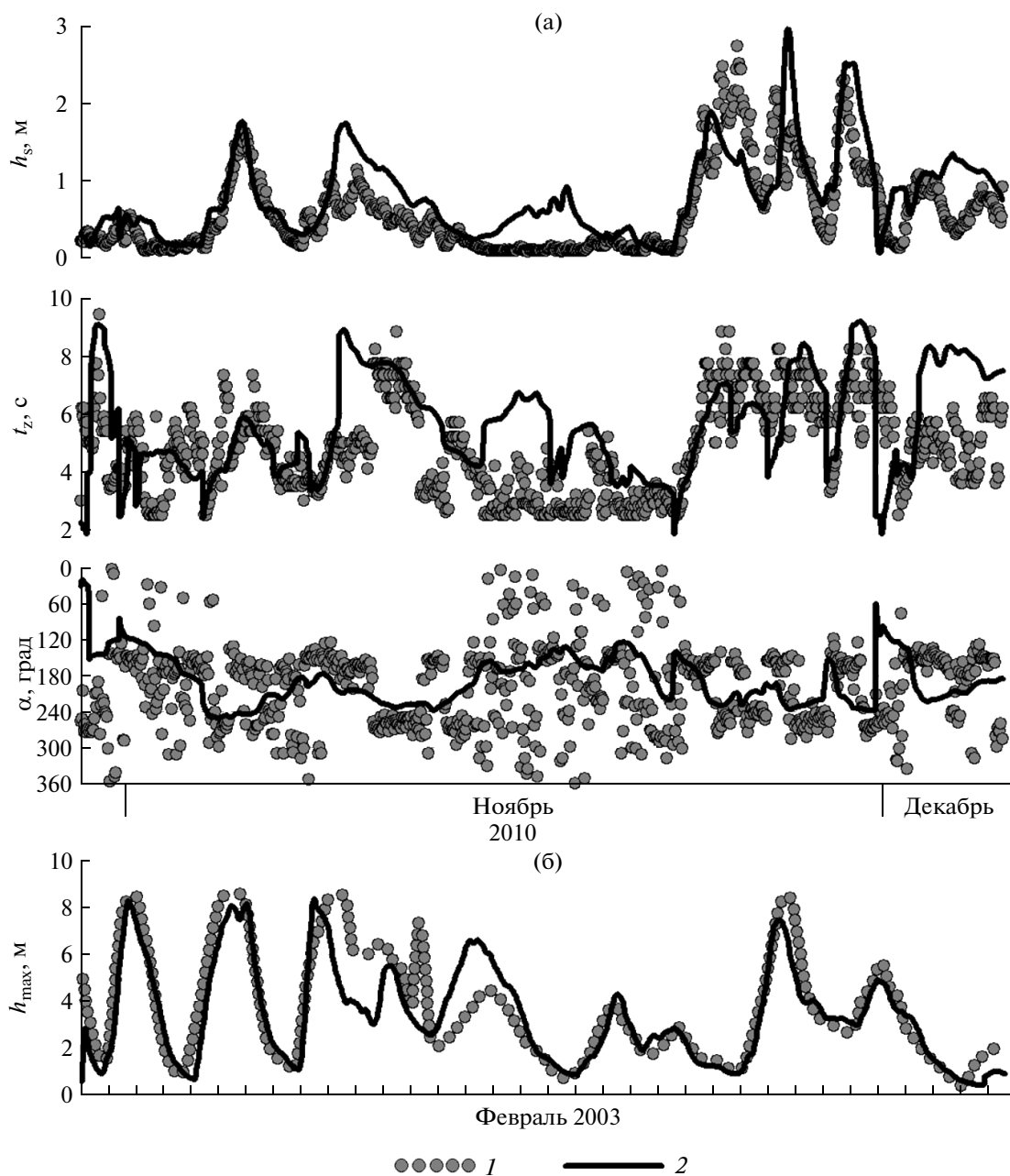


Рис. 4. Волноизмерители ADCP (а) и Gloria (б). Параметры ветрового волнения (значительные h_s и максимальные h_{max} высоты волн, периоды пика спектра t_p и направления распространения α). 1 – экспериментальные данные, 2 – результаты моделирования.

чением вклада со стороны, скажем так, рядовых (не экстремальных) штормов восточных направлений; 2) в западной части Черного моря наиболее существенен вклад зимних месяцев, в восточной части возрастает влияние летних месяцев.

Приведенные выводы касаются открытой, глубоководной части Черного моря. В планах ближайших исследований – анализ трендов в штормовой активности для прибрежных участ-

ков, наиболее перспективных с точки зрения возможной утилизации энергии морских волн.

Авторы благодарят Б. и И. Чубаренко из Атлантического отделения Института океанологии РАН за предоставленную возможность использования программного комплекса DHI MIKE.

Обработка экспериментальных данных проведена в рамках проекта РНФ № 14-17-00547. Проведение вычислительной части исследований

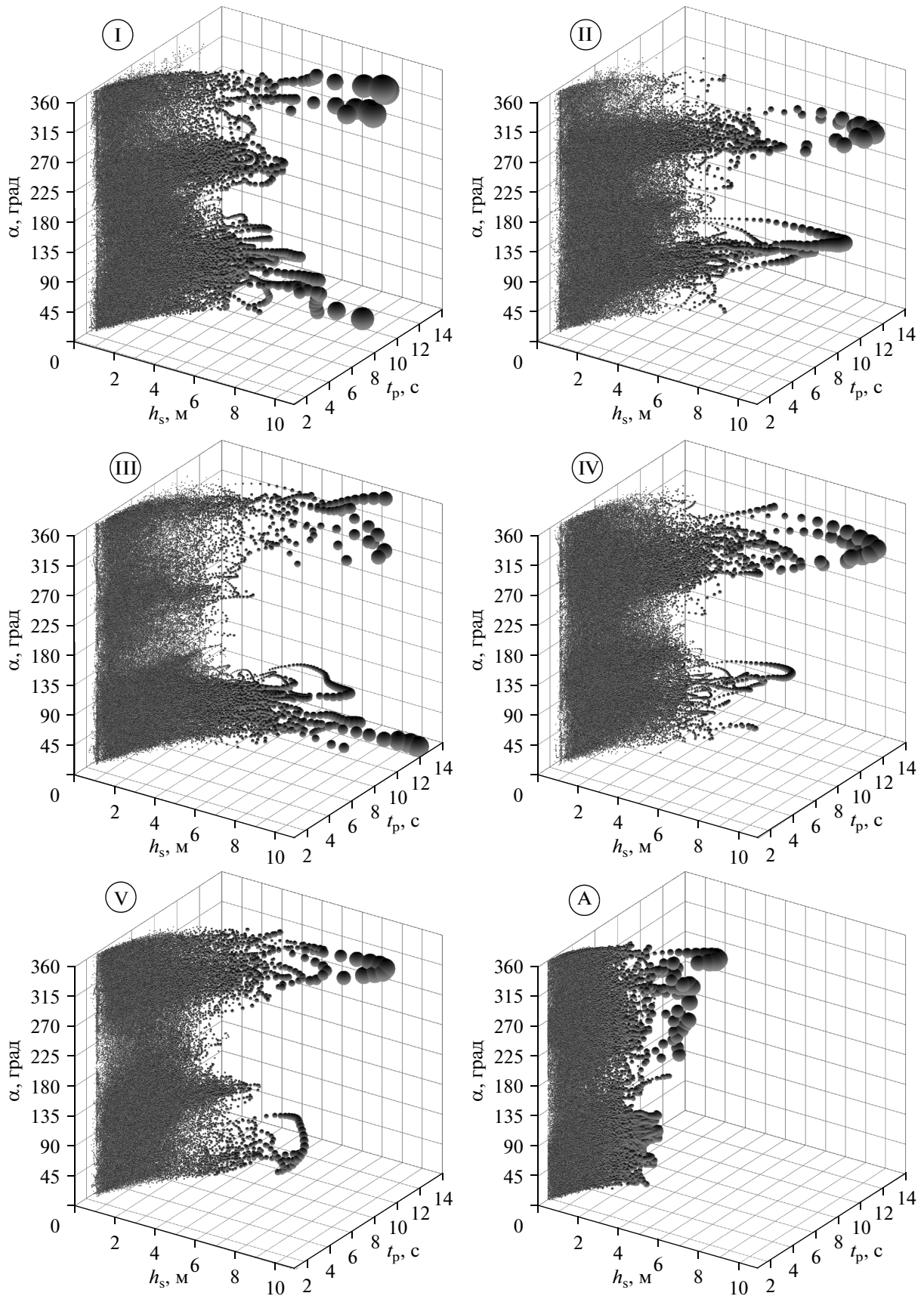


Рис. 5. Наиболее волноопасные направления для выделенных районов Черного и Азовского морей. Размер значков пропорционален рассчитанной мощности ветрового волнения.

(Дивинский Б.В.), а также анализ результатов (Косьян Р.Д.) выполнены при поддержке РФФ (проект № 14-50-00095).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зацепин А.Г., Пиотух В.Б., Корж А.О. и др.* Изменчивость поля течений в прибрежной зоне Черного моря по измерениям донной станции ADCP // *Океанология*. 2012. Т. 52. № 5. С. 629–642.
2. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей. Российский морской регистр судоходства. СПб., 2006. 451 с. ISBN 5-89331-071-3.
3. *Akpınar A., Ihsan Kömürçü M.* Assessment of wave energy resource of the Black Sea based on 15-year numerical hindcast data // *Applied Energy*. 2013. V. 101. P. 502–512.
4. *Aydoğan B., Ayat B., Yüksel Y.* Black Sea wave energy atlas from 13 years hindcasted wave data // *Renewable Energy*. 2013. V. 57. P. 436–447.
5. *Booij N., Ris R., Holthuijsen L.* A third-generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation // *J. Geophys. Res.* 1999. № 104. P. 7649–7666.
6. *Boyle G.* Renewable energy: power for a sustainable future. 2nd ed. Oxford University Press, 2004. 584 p.
7. *Cherneva Z., Andreeva N., Pilar P. et al.* Validation of the WAMC4 wave model for the Black Sea // *Coastal Engineering*. 2008. № 55. P. 881–893.
8. DHI Water & Environment. MIKE 21, Spectral Wave Module. 2007. 584 p.
9. *Galabov V.* On the Wave Energy Potential of the Bulgarian Black Sea // *SGEM 2013 conference proceedings*. Varna, Bulgaria. June 16–22, 2013. P. 831–838.
10. *Kos'yan R.D., Divinsky B.V., Pushkarev O.V.* Measurements of parameters of wave processes in the open sea near Gelendzhik // *The Eight Workshop of NATO TU-WAVES/Black Sea*, METU, Ankara, Turkey, 1998. P. 5–6.
11. *Rusu E.* Wave energy assessments in the Black Sea // *J. Mar. Sci. Technol.* 2009. № 14. P. 359–372. DOI 10.1007/s00773-009-0053-6.
12. *Smith J.M., Sherlock A.R., Resio D.T.* STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model, user's guide for STWAVE Version 3.0 // *ERDC/CHL SR-01-01*, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, 2001. 82 p.
13. *Trusca C.V.* Reliability of SWAN model simulations for the Black Sea Romanian coast // *Maritime transportation and exploitation of ocean and coastal resources – Guedes Soares, Garbatov & Fonseca (Eds)*. Taylor & Francis Group, London, ISBN 0 415 39036 2, 2005.
14. *Wave Climatology of the Turkish Coast: NATO TU-WAVES Project.* <http://www.medcoast.org.tr/tu-waves/introduction.htm>.

Observed Wave Climate Trends at the Open Part of the Black Sea during Period 1990–2014

B. V. Divinsky, R. D. Kos'yan

The main objective of the present study is the analysis of the stormy activity in the Black Sea during the last 25 years, using the method of mathematical modeling. Based on the obtained results, it is possible to conclude that the average annual storm activity on the Black Sea increased by 10–15% for the period from 1990 to 2014. The strengthening of the eastern part of the atmospheric circulation is mostly responsible for this tendency.