

Б.В. Дивинский, Р.Д. Косьян

Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Геленджик

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ТЕНДЕНЦИИ В ВОЛНОВОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ПОТЕНЦИАЛЕ ЧЕРНОГО И АЗОВСКОГО МОРЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Основная цель представленной работы – анализ штормовой активности и доступной волновой энергии в Черном море за последние 25 лет. Данная проблематика находилась в фокусе внимания нескольких исследовательских групп ([2], [3], [6], [8], [10]). Однако в указанных работах нет ответа на главный вопрос: существуют ли тренды в изменении волнового климата Черного моря за последнее время? Каковы тенденции перераспределения волновой энергии на акватории Черного моря?

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *волновой климат, Черное море, математическое моделирование.*

Ветровое волнение является одним из основных факторов, определяющих развитие морского транспорта, освоение шельфа, динамические процессы в береговой зоне моря и оказывающих влияние на береговую инфраструктуру, экологию и рекреационный потенциал.

Черное море, несмотря на замкнутость, является частью глобальной климатической системы. В настоящее время сам факт изменения климата никем не оспаривается. Вместе с тем, природа этих изменений и сам знак колебаний являются предметами острых дискуссий.

Основная цель представленной работы – анализ штормовой активности и доступной волновой энергии в Черном море за последние 25 лет. Данная проблематика находилась в фокусе внимания нескольких исследовательских групп [2, 3, 6, 8, 10]. Однако в указанных работах нет ответа на главный вопрос: существуют ли тренды в изменении волнового климата Черного моря за последнее время? Каковы тенденции перераспределения волновой энергии на акватории Черного моря?

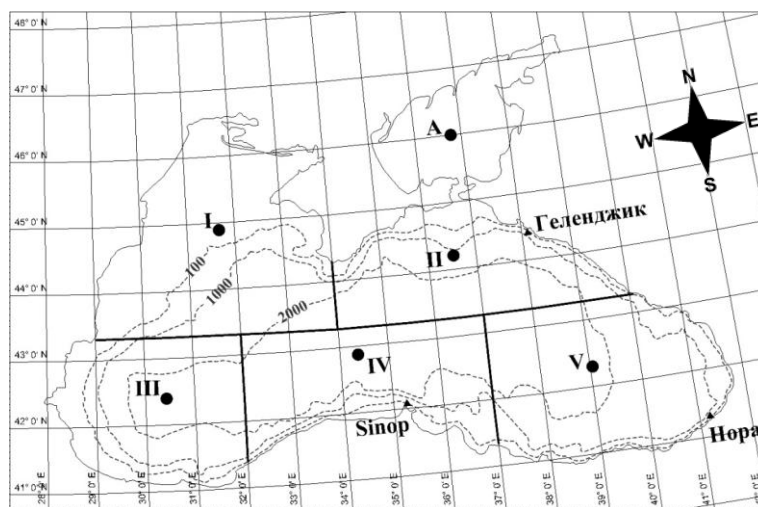
Методика исследований. Современным средством исследования параметров поверхностного волнения является математическое моделирование. В настоящее время значительное развитие получили спектральные модели ветрового волнения. В рамках, скажем так, регионального применения наибольшую известность получили такие реализации спектральных моделей, как *SWAN* Дельфтского Технологического университета [4], *MIKE 21 SW* Датского Гидравлического института [7], *STWAVE* [11]. Между указанными программами отсутствуют принципиальные концептуальные различия, поэтому выбор в качестве инструмента исследований модели *MIKE 21 SW* определяется, в немалой степени, удобным интерфейсом и предоставляемым мощным постпроцессингом.

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 гг. на базе Южного отделения Института океанологии РАН. В рамках международной программы *NATO TU-WAVES* с целью изучения волнового климата Черного моря в прибрежной зоне г.Геленджика был установлен волноизмерительный буй «*Directional Waverider Buoy*» [9], изготовленный нидерландской фирмой *Datawell*. Координаты точки установки: 44°30'40" с.ш., 37°58'70" в.д., глубина места 85 м, что для всех наблюдавшихся волн соответствует условиям глубокой воды. Два аналогичных буя располагались у побережья Турции [12]: 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. В дальнейшем качество волновой спектральной модели определяется соответствием экспериментальных и рассчитанных данных.

При анализе результатов будем опираться на условное районирование Черного моря, предложенное в [1]. Выделенные районы характеризуются квазиоднородными условиями волнообразования. Положение точек наблюдения за параметрами ветрового волнения, а также границы районов представлены на рис.1. Дополнительно проанализируем климатическую волновую статистику для Азовского моря (точка А, рис.1).

Качество спектральной волновой модели напрямую зависит от корректности задания исходных компонент скорости ветра. В настоящем исследовании использовались данные глобального атмосферного реанализа *ERA-Interim*, представленного Европейским центром среднесрочных прогнозов (<http://apps.ecmwf.int>). В распоряжении пользователя массивы карт приземного атмосферного давления и компонент скорости ветра с 1979 г. по настоящее время. Пространственное разрешение составляет 0,25°, шаг по времени 3 ч. Проведенный предварительный анализ показал, что использование компонент скорости ветра *ERA-Interim* существенно занижает расчетные высоты волн. Удовлетворительные результаты получаются при исполь-



Р и с . 1 . Положение волноизмерительных буюв *Datawell Waverider*, а также районирование Черного моря согласно [1].

зовании для компонент скорости ветра множителя в 1,3. По этой причине из анализа *ERA* использовались лишь карты приземного атмосферного давления. По массивам приземного давления определялся градиентный ветер и далее путем коррекции рассчитывались горизонтальные компоненты стандартного ветра на высоте 10 м над уровнем моря (U_{10} , V_{10}). Таким образом формировались поля атмосферного давления и компонент скорости ветра над заданной акваторией с временным шагом 3 ч.

Расчетными выходными параметрами спектральной волновой модели являются:

- пространственные распределения высот волн (значительных и максимальных), средних периодов, периодов максимума спектра, направления волнения;
- двумерные (частотно-направленные) спектры ветрового волнения;
- мощность ветрового волнения, выраженная в киловаттах на метр волнового фронта [5].

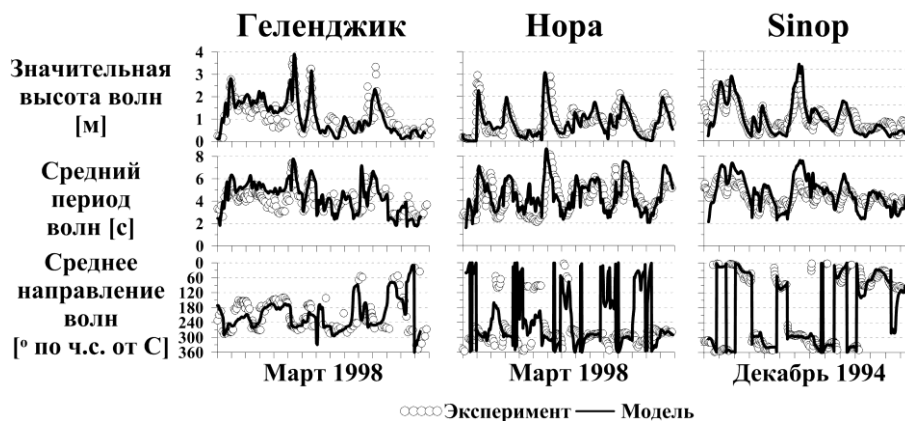
Поскольку значительные высоты волн и периоды определяются через моменты энергетического спектра, оценка энергетической мощности ветрового волнения полностью зависит от корректности и адекватности спектральной модели при воспроизведении всех стадий развития волнения. Корректность модели определяется на этапе ее верификации.

Верификация модели. 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.2).

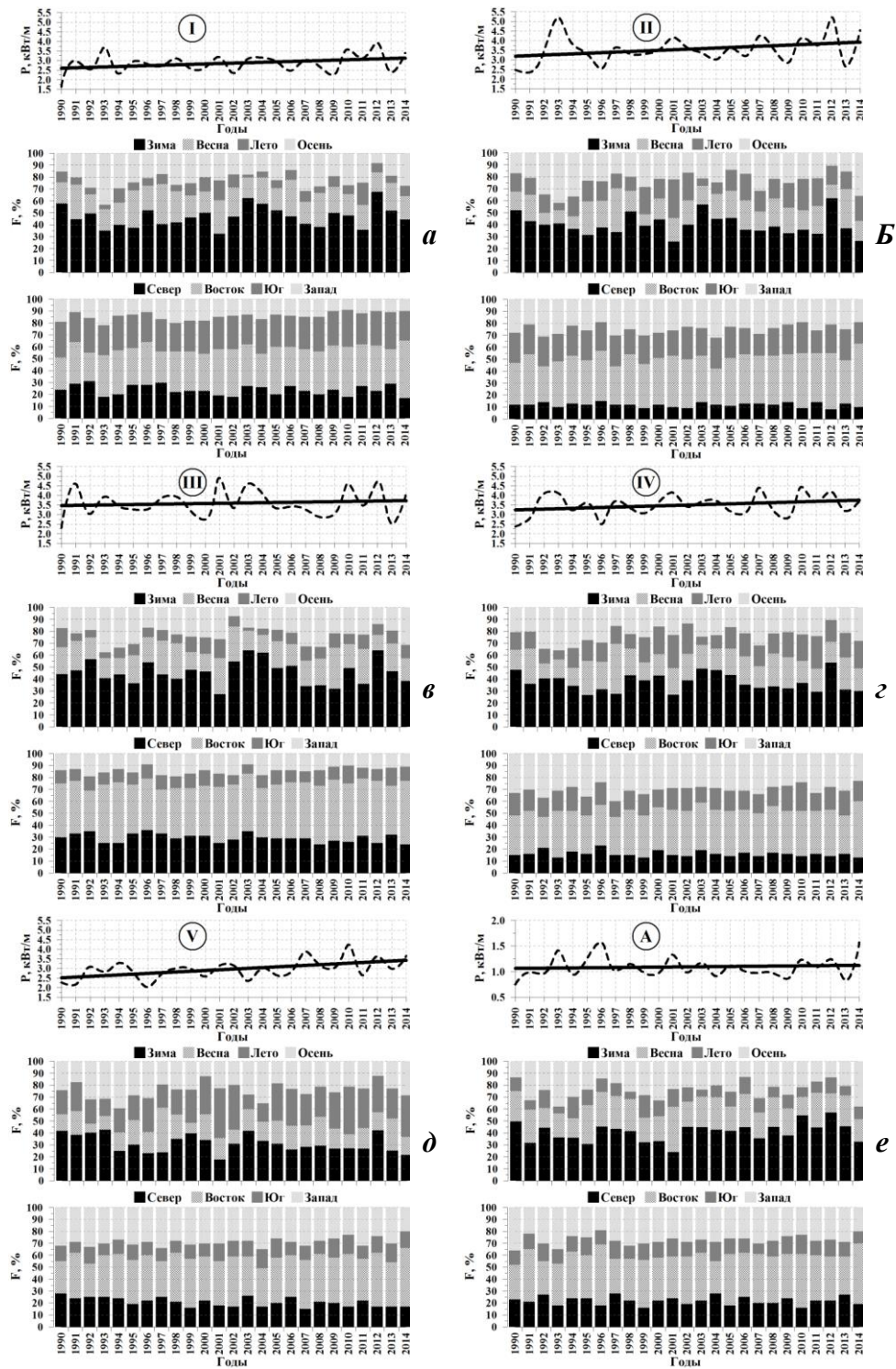
Коэффициенты корреляции рассчитанных и наблюдаемых рядов высот волн составляют порядка 0,8 – 0,9. Модель хорошо работает как в глубоководной части, так и в прибрежных отмелях районах.

Обсуждение результатов. В результате проведенной работы получен обширный массив данных, состоящий из полей рассчитанных параметров ветрового волнения Черного и Азовского морей с временным шагом 3 ч и охватывающий период в 25 лет (с 1990 по 2014 гг.).

В настоящей статье рассматриваются результаты, полученные для внутренних частей выделенных районов Черного моря, соответствующих услови-



Р и с . 2 . Экспериментальные и модельные параметры ветрового волнения.



Р и с. 3. Среднегодовые мощности ветрового волнения (пунктир), их линейные аппроксимации (сплошная линия) и повторяемости по сезонам и направлениям для районов I (а), II (б), III (в), IV (з), V (д) Черного моря и для Азовского моря (е).

ям глубокой воды. Прибрежные участки с повышенным уровнем диссипации волновой энергии составят предмет рассмотрения дальнейших исследований.

По сравнению с другими акваториями Мирового океана волновая активность Черного моря является довольно умеренной. Несмотря на то, что в отдельных штормах мощность ветрового волнения может достигать 600 кВт/м, средние показатели составляют порядка 3 – 4 кВт/м. На рис.3 для выделенных районов Черного и Азовского морей представлены кривые хода среднегодовой волновой мощности, их линейные аппроксимации, а также повторяемости по сезонам и направлениям.

Принятые градации для направлений волнения: север – 315 – 45°, восток – 45 – 135°, юг – 135 – 225°, запад – 225 – 315°. Сезоны принимаются в их календарном понятии, при этом «зима» включает в себя декабрь предыдущего года и январь – февраль текущего.

Как следует из рис.3, существуют тенденции усиления штормовой активности для всего Черного моря. Особенно они заметны для II и V районов. Азовское море с его практически нулевым трендом в этом плане более консервативно. Можно уверенно утверждать, что волновая активность на Черном море за последние 25 лет возросла на 10 – 15 %. Вклад зимних сезонов наиболее существенен для западных районов (I и III районы), в восточной части Черного моря в рамках годового цикла возрастает влияние летних месяцев. При рассмотрении направлений распространения наиболее заметной особенностью является ощутимое усиление восточной составляющей при одновременном ослаблении западной. Увеличение вклада волнения восточных румбов за последние 25 лет составляет порядка 10 %, причем это касается всего моря. Повторяемость волнения южных и северных

направлений за рассматриваемый период практически не менялась. Другими словами, для Черного моря наиболее существенные изменения произошли в масштабах зональной циркуляции.

На рис.4 представлены показатели приращения – убывания среднемесячных значений волновой энергии за последние 25 лет по месяцам.

Как видно из рис.4, за период с 1990 по 2014 гг. для всех районов характерно уменьшение волновой активности в мае, ноябре и декабре. Наибольший спад наблюдается в III районе и составляет для декабря 12 %. Несмотря на некоторую условность подобного календарного

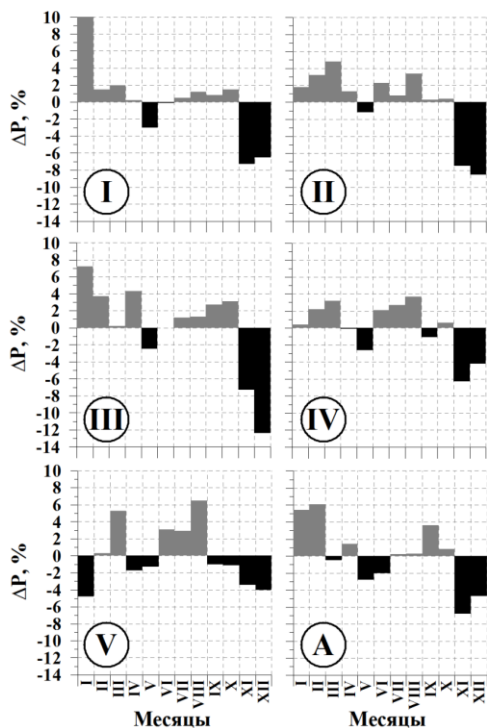
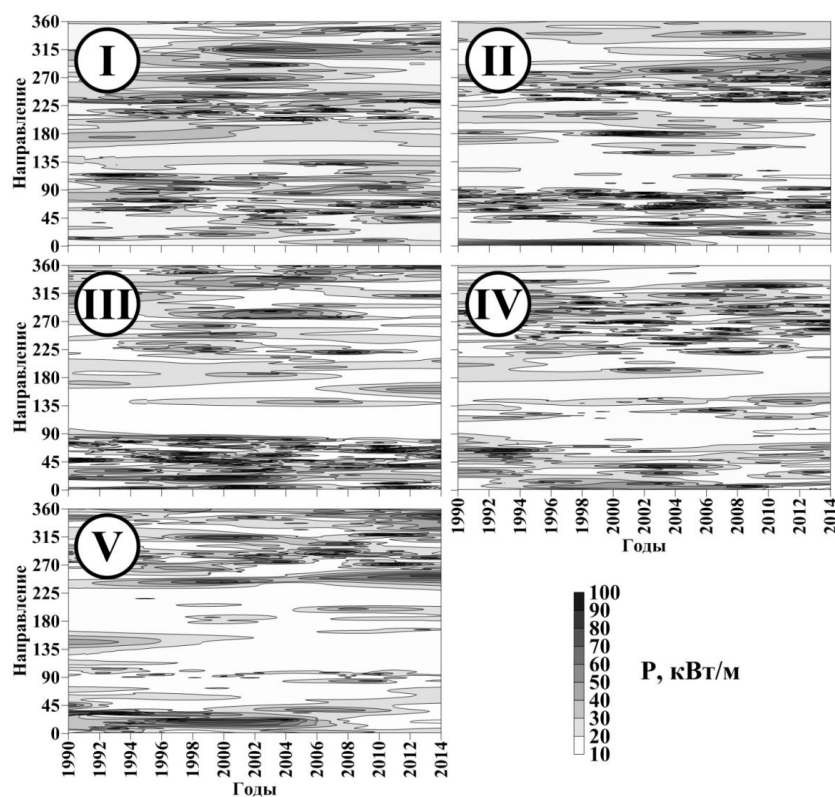


Рис. 4. Изменение вклада среднемесячных значений волновой энергии в выделенных районах (в %) за последние 25 лет.

подхода, можно заключить, что общее усиление волновой активности на Черном море вызвано увеличением вклада штормов восточных направлений в весенне-летний период. Основной вклад в это усиление принадлежит фоновому волнению с энергетической мощностью менее 10 кВт/м. На рис.5 представлена временная развертка энергетической мощности умеренных и сильных штормов по годам и направлениям распространения.

Умеренные и сильные шторма, лежащие в пределах 10 – 100 кВт/м, наиболее ярко проявляли себя в конце 90-х и начале 2000-х гг. Какие-либо заметные тренды в частоте появления сильных штормов практически отсутствуют. Наиболее суровым является III район, превышающий остальные районы по числу сильных штормов в два раза (район V – в четыре раза). Отметим также, что сильным штормам свойственно группироваться. К примеру, в III районе в 2001, 2010 и 2012 гг. экстремальные шторма шли парами с двухнедельным промежутком между штормами. Для Азовского моря максимальная мощность волнения за период с 1990 по 2014 гг. составила порядка 70 кВт/м, что для небольшого по размерам водоема является довольно значительной величиной.

Заключение. Таким образом, в результате проведенных исследований получены оценки климатических колебаний доступной волновой энергии на акватории Черного и Азовского морей и проанализированы тренды в штормовой активности.



Р и с . 5 . Мощность умеренных и сильных штормов по годам и направлениям распространения для выделенных районов Черного моря.

Главный вывод: за последние 25 лет среднегодовая штормовая активность на Черном море выросла на 10 – 15 %. Этот рост обеспечивается, в основном, увеличением вклада со стороны умеренных (не экстремальных) штормов восточных направлений. В свете непрекращающихся дискуссий об изменении климата о какой-либо катастрофичности в тенденциях говорить пока не приходится, тем не менее, подобные выводы требуют пристального внимания и дальнейших исследований.

Отметим важную деталь. Как хорошо видно из рис.3, осредненные по годам показатели волновой энергии испытывают межгодовые вариации с периодами в несколько лет. Величина 10 – 15 % является оценкой линейной трендовой составляющей и говорит о том, что на это значение выросли средние многолетние показатели за последние 25 лет. При этом наибольшие изменения касаются восточных секторов моря (районы II и V). Напомним, что речь идет об открытой части Черного моря. Однако подобные тенденции с неизбежностью сказываются на энергетике прибрежных участков, для которых возможны проекты утилизации волнового потенциала. Подробный анализ климатических трендов доступной волновой энергии для прибрежных участков Черного моря составит предмет ближайших исследований.

Особо отметим данные по Азовскому морю. К сожалению, полученные результаты не вполне корректны, поскольку Азовское море является замерзающим. Современные волновые модели позволяют в параметрической форме учитывать реальные ледовые условия, однако верификация моделей сталкивается с проблемой недостатка экспериментальных данных по измерению параметров волнения в условиях битого льда или неустойчивого ледового покрова.

БЛАГОДАРНОСТИ. Проведенные исследования явились результатом взаимодействия многочисленных научных групп и организаций. Особая благодарность Борису и Ирине Чубаренко из Западного отделения Института океанологии РАН за предоставленную возможность использования программного комплекса *DHI MIKE*. Обработка экспериментальных данных проведена в рамках проекта РНФ 14-17-00547. Вычислительная часть исследований поддержана грантом РНФ 14-50-00095.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей.* Российский морской регистр судоходства.– СПб, 2006.– 451 с.
2. *Akpinar A., Ihsan Kömürcü M.* Assessment of wave energy resource of the Black Sea based on 15-year numerical hindcast data // *Applied Energy.*– 2013.– 101.– P.502-512.
3. *Aydogan B., Ayat B., Yüksel Y.* Black Sea wave energy atlas from 13 years hindcasted wave data // *Renewable Energy.*– 2013.– 57.– P.436-447.
4. *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.
5. *Boyle G.* Renewable energy: power for a sustainable future. 2nd ed.– Oxford University Press, 2004.

6. *Cherneva Z., Andreeva N., Pilar P., Valchev N., Petrova P., Guedes Soares C.* Validation of the WAMC4 wave model for the Black Sea // Coastal Engineering.– 2008.– 55.– P.881-893.
7. *DHI Water & Environment.* MIKE 21, Spectral Wave Module, 2007.
8. *Galabov V.* On the Wave Energy Potential of the Bulgarian Black Sea // SGEM 2013 conference proceedings.– Varna, Bulgaria, 2013,
9. *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.
10. *Rusu E.* Wave energy assessments in the Black Sea // J. Mar. Sci. Technol.– 2009.– 14:359-372. doi 10.1007/s00773-009-0053-6.
11. *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.
12. *Wave Climatology of the Turkish Coast: NATO TU-WAVES Project.* <http://www.medcoast.org.tr/tu-waves/introduction.htm>

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

THE BLACK SEA AND SEA OF AZOV WAVE REGIME: RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION

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