

УДК:620.91

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ВОЛНОВОЙ ЭНЕРГИИ ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ ПОЛУОСТРОВА КРЫМ

*В.С. Архипкин¹, А.Г. Васьков², С.В. Киселева¹, С.А. Мысленков¹,
С.А. Темеев³, А.А. Темеев³, П.М. Умнов¹*

¹Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
РФ 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1

тел.: (495) 939-42-57; e-mail: k_sophia_v@mail.ru

²ФГБ ОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

РФ 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

тел.: (495)362-72-51; e-mail: VaskovAG@mpei.ru

³ООО «Компания «Прикладные технологии»

РФ 117292, Москва, ул. Профсоюзная, 16/10-301

тел./факс: +7(499)125-22-25; e-mail: atecom@atecom.ru; web: www.atecom.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.20.003

Заключение совета рецензентов: 04.09.15 Заключение совета экспертов: 11.09.15 Принято к публикации: 18.09.15

В работе сделан краткий обзор использованных ранее методик оценки волновой энергии и представлены результаты этих оценок для окраинных морей РФ. В настоящее время в зарубежной практике для оценки волновых энергетических ресурсов активно применяются методы, основанные на обработке данных реанализа (скорость ветра) и математическом моделировании (характеристики волнения). Этот подход позволяет проводить детальный анализ волновых энергетических характеристик как для значительных акваторий, так и для отдельных точек или локальных областей. Для выделенной точки акватории Черного моря авторами были проведены оценки энергетических характеристик волнения с использованием спектральной модели ветрового волнения третьего поколения SWAN (Simulating Waves Nearshore). При расчетах учитывались поля ветра на высоте 10 м, полученные из реанализа NCEP/NCAR, с шагом по времени 6 часов и пространственным разрешением 1,875° по долготе и 1,9046° по широте за период с 1948 по 2010 гг. Для конкретной даты построена карта высот значительных волн и транспорта энергии на акватории Черного моря. Набор таких карт или карты распределения среднесезонного потока энергии, созданные на основе современных методов оценки, могут быть использованы для выявления акваторий, наиболее перспективных для размещения волновых энергетических установок.

Ключевые слова: волновая энергия, методы оценки ресурсов, статистический и спектральный подходы, реанализ, математическое моделирование, спектральная волновая модель SWAN, акватория Черного моря, карты.

ASSESSING THE POTENTIAL OF WAVE ENERGY IN COASTAL WATERS OF CRIMEA PENINSULA

V. Arhipkin¹, A. Vas'kov², S. Kiseleva¹, S. Myslenkov¹, S. Temeev³, A. Temeev³, P. Umnov¹

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography
1 Leninskiye Gory, Moscow, 119991 Russian Federation

ph.: (495) 939-42-57; e-mail: k_sophia_v@mail.ru

²National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

14 Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250 Russian Federation

ph.: (495)362-72-51; e-mail: VaskovAG@mpei.ru

³Applied Technologies Company Ltd.

16/10-301 Profsoyuznaya str., Moscow, 117292 Russian Federation

ph.: (499) 125-2225 e-mail: atecom@atecom.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.20.003

Referred 4 September 2015 Received in revised form 11 September 2015 Accepted 18 September 2015

The present study reviews the previously used methods of wave energy evaluation and the results of these evaluations for the marginal seas of the Russian Federation. Currently in the international practice the methods based on the processing of data reanalysis (wind speed) and the mathematical modeling (characteristics of the waves) are widely used for the wave energy evaluation. This approach allows scientists carrying out a detailed analysis of the wave energy for large water areas, individual points or local areas. For a selected point of the Black Sea the authors have conducted assessment of the wave energy using the third generation spectral model for the wind waves SWAN (Simulating Waves Nearshore). The calculations used the wind field at a height of 10 m, derived from reanalysis NCEP / NCAR, with a time step of 6 hours, and the spatial resolution of 1,875 ° (in longitude) and 1,9046 ° (latitude) for the period from 1948 to 2010. For a specific date the map of significant wave heights and transport of energy in the Black Sea was created. A set of such maps or maps of the average annual energy flow based on modern methods of evaluation can be used for identifying water area that are most relevant to accommodate the wave power plants.

Keywords: wave energy, resource assessment methods, statistical and spectral approaches, reanalysis, mathematical modeling, spectral wave model SWAN, the water area of the Black Sea, maps.



Архипкин Виктор Семенович
Victor S. Arhipkin

Сведения об авторе: канд. географ. наук, доцент кафедры океанологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Образование: географический факультет МГУ.

Область научных интересов: физические свойства морской воды, прибрежная океанография, гидрология внутренних морей, моделирование ветрового волнения и прибрежной циркуляции вод.

Публикации: более 150, среди них 9 монографий и учебных пособий, два государственных патента на базы данных по волнению.

Information about the author: PhD (geography), assistant professor at the Oceanology department, Geography faculty, MSU.

Education: Geography faculty, MSU.

Research area: physical properties of seawater, coastal oceanography, hydrology of inland seas, wind waves modeling, coastal currents modeling.

Publications: more than 150, including 9 monographs, 2 state wave data bases patent.



Васьков Алексей Геннадиевич
Alexey G. Vas'kov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Образование: НИУ Московский энергетический институт (2010).

Область научных интересов: управление режимами работы энергокомплексов на основе ВИЭ.

Публикации: более 20 работ, 1 авторское свидетельство.

Information about the author: PhD (engineering), associate professor at the Hydropower and Renewable Energy department.

Education: National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (2010).

Research area: mode control of power complexes based on renewable energy

Publications: over 20, 1 copyright certificate



Киселева Софья Валентиновна
Sofia V. Kiseleva

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Образование: физический факультет МГУ (1987) и аспирантура того же факультета (1990).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, оценка ресурсов ВИЭ, лабораторное моделирование динамических процессов в океане.

Публикации: более 80, в том числе патентов на изобретения.

Information about the author: PhD (physics and mathematics), senior researcher of the Renewable Energy Sources Laboratory (Lomonosov Moscow State University, Geography faculty).

Education: Physics faculty of Lomonosov Moscow State University.

Research area: renewable energy sources: resource evaluation, ecology-geographical aspects of renewable energy; laboratory modeling of ocean and atmosphere's dynamical process.

Publications: over 80, including patents.





Мысленков Станислав
Александрович
Stanislav A. Myslenkov

Сведения об авторе: старший научный сотрудник кафедры океанологии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Образование: географический факультет МГУ (2007).

Область научных интересов: морское волнение, морские течения, экспериментальная океанография.

Публикации: 18 научных работ, два государственных патента на базы данных по волнению.

Information about the author: senior researcher at the Oceanology department of Geography faculty, MSU.

Education: Geography faculty, MSU (2007).

Research area: wind waves, ocean currents, experimental oceanography.

Publications: 18 publications, 2 state wave data bases patent.



Темеев Александр Архипович
Alexandr A. Temeev

Сведения об авторе: канд. техн. наук, директор ООО «Компания «Прикладные технологии».

Образование: Московский авиационный институт (1967); канд. техн. наук (физика и химия плазмы, 1975); доцент по кафедре физики (1982).

Область научных интересов: разработка компонентов экологически чистой энергосистемы на базе возобновляемых ресурсов мирового океана; преобразователи энергии волн в электроэнергию и установки для получения водорода путем электролиза морской воды; исследование процесса возбуждения микроволновых колебаний в плазменно-пучковых электроразрядных устройствах.

Публикации: более 90 работ и патентов.

Information about the author: PhD (engineering), director of the Applied Technologies Company Ltd.

Education: Moscow Aviation Institute (1967); PhD (plasma physics and chemistry, 1975); associate professor (physics, 1982).

Research area: development of the components of ecologically safe power-industrial systems based on renewable resources of the oceans: a unique offshore Float Wave Energy Electric Power Station as an efficient means for sea wave energy conversion and technology for the production of hydrogen using seawater electrolysis; the study of the excitation of microwave oscillations in a plasma-beam discharge unit.

Publications: more than 90 scientific papers and patents.



Темеев Сергей Александрович
Sergey A. Temeev

Сведения об авторе: канд. техн. наук, заместитель директора ООО «Компания «Прикладные технологии».

Образование: НИУ Московский авиационный институт, аэрокосмический факультет (1997), аспирантура МАИ, кафедра «Механика сплошных сред» (2001).

Область научных интересов: разработка новых устройств и энергопромышленных систем на базе преобразования энергии морских волн; водородная энергетика.

Публикации: 9 и 2 патента.

Information about the author: PhD (engineering), deputy director of the Applied Technologies Company Ltd.

Education: Moscow Aviation Institute (MAI); Aerospace faculty (1997); PhD (oceanology, 2010).

Research area: the development of new devices and systems based on the sea wave energy conversion; hydrogen energy.

Publications: 9 and 2 patents.





Умнов Павел Михайлович
Pavel M. Umnov

Сведения об авторе: начальник отдела ИТ географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Образование: радиотехнический факультет МЭИ (1992).

Круг научных интересов: разработка и производство приборов охранно-пожарной сигнализации.

Information about the author: the head of IT department, Geography faculty, MSU.

Education: Radio Engineering faculty of MPEI.

Research area: development and production of equipment of fire alarm.

Введение

При оценке ресурсов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) на территории СССР в 1970–1990 гг. активно проводилось изучение ресурсов энергии волн [1–6]. Это было обусловлено, в частности, огромной общей протяженностью береговой линии России (порядка 43 000 км), достаточно высокой по сравнению с другими ВИЭ плотностью волновой энергии и значительным КПД устройств, преобразующих энергию волн в полезные виды энергии (до 90 %). Кроме того, активное вовлечение в хозяйственную деятельность удаленных регионов, лишенных централизованного энергоснабжения и имеющих выход на акватории северных и дальневосточных морей, также определяло внимание исследователей к оценкам потенциала волновой энергии. Следует отметить и общий высокий уровень интереса к различным направлениям возобновляемой энергетики в СССР в те годы. В настоящее время устройства волновой энергетики значительно уступают по востребованности фотоэлектрическим преобразователям (ФЭП), ветроэнергоустановкам (ВЭУ) и т.п. Это связано с общепринятым мнением о том, что волновая энергия не может обеспечить значимые объемы выработки для снабжения потребителей, расположенных на прибрежных территориях России. В то же время происходит активное развитие технологий волновой энергетики и рост числа различных автономных объектов – на побережье, в шельфовой зоне морей, в открытом океане – с невысоким уровнем энергопотребления, например: морские платформы различного назначения, океанологические системы наблюдения и мониторинга [7, 8] и другие объекты.

В представленной работе в качестве региона исследований рассматривается прибрежная зона полуострова Крым. Согласно данным Минэнерго РФ [9], полуостров Крым обеспечен собственными генерирующими мощностями электроэнергетики на 25–30 % с учетом солнечных и ветровых источников. Одним из возможных путей развития может стать дальнейшее наращивание имеющихся на полуострове мощностей солнечной, ветровой энергетики, а также более ши-

рокое использование других ВИЭ. В этой связи важно проанализировать ресурсы различных видов возобновляемых источников энергии, в том числе и волновой энергии.

Разработка устройств, с помощью которых энергия волн может быть преобразована в электроэнергию без какого-либо ущерба для окружающей среды, ведётся уже на протяжении нескольких десятилетий. Концепции, положенные в основу работы преобразователей энергии волн, главным образом сводятся к нескольким признанным базовым моделям [10]: колеблющийся водяной столб, переливные устройства, пассивные вертикально или горизонтально колеблющиеся устройства, качающиеся и рычажные устройства. Однако до настоящего времени устройства, создаваемые на базе известных технических решений, не позволяли адекватно решить эту задачу, так как энергопроизводительность данных устройств в большой степени зависит от постоянства длины, интенсивности и направления распространения волн, и в силу вероятностного характера процесса волнообразования их эффективность не может быть высокой.

Очевидно, что наилучшим механизмом отбора энергии волн является колебательный, соответственно, ключевым элементом преобразователя энергии должно быть колебательное устройство, согласованное с внешним волновым полем. Этот принцип был реализован в проекте поплавковой волновой электростанции (ПВЭС), где в качестве одного из основных блоков используется колебательный привод [11, 12].

Устройство и преимущества поплавковой волновой электростанции (ПВЭС)

Модуль ПВЭС представляет собой продолговатую осесимметричную капсулу-поплавок, располагающуюся на поверхности моря и ориентированную в направлении местной вертикали (рис. 1). Основными элементами устройства, находящимися внутри герметичной капсулы, являются механический преобразователь энергии волн 1, электрогенератор 2 и вспомогательный накопитель энергии 3. Механический преобразователь энергии волн состоит из упру-



ного маятника, подвешенного к капсуле, и приводного механизма, сцепленного с грузом маятника и обеспечивающего пондеромоторное возбуждение тока в электрогенераторе.

Под действием волн капсула и маятник находятся в непрерывном колебательном движении, а привод обеспечивает раскрутку якоря электрогенератора.

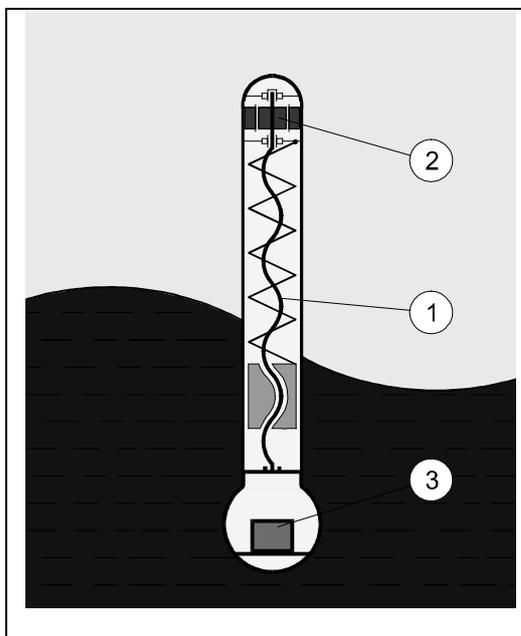


Рис. 1. Схема модуля ПВЭС
Fig. 1. Module outline of the float wave station

Основными достоинствами, отличающими ПВЭС от всех других разрабатываемых в мире волноэнергетических преобразователей, являются:

- Использование в преобразователе колебательного привода, который позволяет согласовывать работу устройства с внешним волновым полем, обеспечивая тем самым наилучшие условия для отбора энергии.
- Возможность размещения энергоустановок и энергопромышленных комплексов прямо в морях и океанах, в местах мало или совсем не пригодных для обитания человека или мореплавания; возможность изменения места размещения установок в зависимости от волновой активности морской акватории и сезонно-синоптических условий.
- Эффективная и надежная работа при любых длинах, скоростях, интенсивностях и направлениях распространения морских волн; возможность подстройки параметров устройства под внешние изменяющиеся условия.

В зависимости от назначения, можно создавать как одномодульные, рассчитанные на мощность до 50 кВт, так и многомодульные установки в виде сети, которые могут быть собраны из большого количества модулей с суммарной электрической мощно-

стью в десятки мегаватт для питания энергоемких потребителей.

Проектирование волновой установки или системы для конкретной акватории требует проведения оценки потенциала волновой энергии. Энергия волн распределяется весьма неоднородно в пространстве и времени, поэтому, поскольку ее использование имеет перспективы прежде всего в автономных энергосистемах и установках, наиболее востребованными являются локальные (реже – региональные) оценки ресурсов. В настоящее время развитие средств математического моделирования и метеорологических реанализов позволяет осуществлять не только общие оценки волновой энергии на основе осредненных по большой акватории характеристик волнения, но и расчеты для отдельных точек и ограниченных участков заданной акватории с учетом сезонных вариаций характеристик волнения. В представленной статье рассматриваются методы оценки ресурсов волновой энергии и приводятся некоторые первичные результаты, полученные в приложении к прибрежным акваториям полуострова Крым. Данные методологические подходы могут быть использованы в дальнейшем для анализа волнового потенциала различных акваторий, оценок средней производительности и ее сезонных вариаций для волновых установок различного типа.

Ранее проведенные оценки потенциала волновой энергии прибрежных акваторий России

Подробный анализ работ, проведенных ранее в СССР и России в области оценки ресурсов волновой энергии, а также обзор методов оценки волновой энергии – статистический и спектральный – представлены в [13]. Ввиду того что поток энергии определяется высотой и длиной волны, которые в свою очередь изменяются во времени и пространстве, в рамках статистического подхода (по аналогии с оценками, например, ветровых ресурсов) используются двумерные функции плотности вероятности высот и периодов волн (метод Матушевского [5]). Спектральный подход подразумевает использование стационарных частотных спектров, предложенных, в частности, в работах Ю.М. Крылова, Д. Неймана, И.Н. Давидана и относящихся к различным стадиям развития волнения. При этом следует отметить, что ранее в качестве исходных данных выступали результаты визуальных наблюдений. Кроме того, характеристики волнения оценивались на основе параметрических зависимостей от скорости ветра и разгона волны. В [13, 14] приведены результаты расчетов потоков волновой энергии для акваторий внутренних (Азовское, Черное, Каспийское) и окраинных морей России (Охотское, Баренцево, Белое, Балтийское, Японское). Суммарные технические ресурсы волновой энергии Баренцева и Белого морей, рассчи-



танные с учетом КПД волновых установок в пределах 30–80 %, оцениваются в 450 млрд. кВтч в год. Технические ресурсы волновой энергии только Мурманской области в прибрежной зоне Кольского полуострова (полосе шириной 10 км) могут составить 1,2 млрд. кВтч в год на побережье Баренцева моря и около 0,4 млрд. кВтч в год на побережье Белого моря. Для сравнения, согласно проведенным на основе базы данных NASASSE [15] оценкам, технический потенциал ветровой энергии для территории Мурманской области (высота 50 м) составляет порядка 150 млрд. кВтч в год.

Современные подходы и методы в оценках ресурсов волновой энергии

Приведенные выше результаты оценок ресурсов волновой энергии были получены преимущественно на основе данных о среднемноголетних высотах волн [16, 17]. Однако практически во всех морях России сезонная изменчивость параметров волнения очень высока, следовательно, для оценки реального потенциала волновой энергии необходим анализ суточной и сезонной изменчивости энергетических характеристик волнения, расчета числа дней с минимальным волнением и т.д.

В то же время в последние десятилетия в зарубежной практике для оценки волновых энергетических ресурсов активно применяются другие методы, основанные на обработке данных реанализа (скорость ветра) и математическом моделировании (характеристики волнения). Обширный перечень работ по оценке волнового энергетического потенциала приведен, в частности, в работе [18]. При этом активизацию исследований в этой области связывают с целым рядом преимуществ использования волновой энергии. К таковым авторы причисляют относительную простоту конструкции волновых преобразователей, их невысокую удельную стоимость [18], возможность локализации производства, а также возможность их использования не только в энергетических целях, но и, например, для защиты береговой линии от разрушающего воздействия волн.

В публикациях, посвященных оценкам ресурсов волновой энергии вблизи побережья Балтийского моря, Калифорнии, Индии, Аргентины, Гавайских островов, Австралии, Португалии, Швеции, Корейского полуострова, Испании, Ирана, атлантического побережья юго-востока США и т.п., применялись спектральные модели волн и данные реанализа ветра. В [19] оценивались плотности энергии ветровых волн акватории морей восточного побережья Китая на основе спектральной волновой модели SWAN (Simulating Waves Nearshore):

$$J = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} C_g E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta.$$

Здесь J – плотность потока энергии (Вт/м фронта волны); $E(\sigma, \theta)$ – спектральная плотность энергии; C_g – групповая скорость волн; θ – угол, характеризующий направление распространения волн; σ – частота волн. Спектральная плотность потока энергии, необходимая для оценки J , является одной из выходных характеристик расчета по модели SWAN. Скорость и направление ветра для расчета волновых параметров были получены с помощью мезомасштабной модели WRF (Weather Research and Forecasting Model). Результаты расчета энергетических характеристик волнения были пространственно охарактеризованы, рассмотрена динамика энергии волн во времени, и, что немаловажно, проведена верификация результатов расчетов по наблюдениям на 7-и станциях в изучаемой акватории. При этом верификация была проведена как для всего периода расчетов (22 года – с января 1990 г. по декабрь 2012 г.), так и для многомесячных периодов на основе спектральной волновой модели этого временного интервала. Средний по всем станциям и сравниваемым периодам коэффициент корреляции оказался более 0,77, что позволило авторам говорить о возможности дальнейшего использования результатов моделирования волнения. В рамках спектрального подхода в [19] было также предложено проводить расчеты потока волновой энергии для глубокого моря по известной формуле

$$J = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H_s^2 c_0$$

с средними значениями значительных высот H_s и периодов волн T_e в данной точке, определенных на основе спектральной плотности энергии $E(\omega, \theta)$. Таким образом, в [19] с помощью современных методов расчета параметров волнения был проведен детальный анализ волновых энергетических характеристик как для значительных акваторий, так и для отдельных точек или локальных областей. Результаты проведенных исследований могут быть использованы для проектных решений при размещении волновых установок.

Оценки энергетических характеристик волнения в прибрежных акваториях полуострова Крым

В работе [20] на основе аналогичных [19] подходов с помощью модели SWAN были проведены оценки волнового потенциала для юго-восточного побережья Черного моря. В [21] указанный подход был распространен на всю акваторию Черного моря. Ранние оценки ветрового и волнового климата для этой акватории проводились странами, выходящими на акваторию Черного моря. При этом использовались достаточно ограниченные по пространственному охвату и частоте наблюдений данные. В работе [21] были использованы результаты международного исследовательского проекта NATOTU-WAVES и моделей волнения METU3 и WAM [22, 23]. В итоге был разработан Атлас ветров и волнения в глубоководной зоне, однако полученные результаты не дают



точной оценки производительности энергоустановок, в связи с чем в исследовании потенциала волновой энергии в работах по Черному морю обоснованно продолжили применять модель SWAN. Численная модель SWAN обеспечивает реалистичную оценку параметров волнения в прибрежной зоне, озерах и эстуариях рек при заданных ветровых условиях, рельефе дна и течениях. Выходными параметрами модели являются высоты значительных волн, средние направления движения волн, средние периоды волн и другие параметры, рассчитываемые на основе спектральных характеристик волнения. Таким образом, в [21] приведены результаты расчета средних за 15 лет (1995–2009 гг.) высот значительных волн для акватории Черного моря и плотности потока волновой энергии (среднегодовые и сезонные значения). В [20] на основе тех же методов и данных реанализа проведены расчеты энергетических характеристик волнения для юго-восточного региона Черного моря, а также верификация полученных результатов по натурным измерениям 7-и буйковых станций, которые подтвердили адекватность данной модели.

Подробный обзор полученных авторами [20] результатов не входит в задачи этого исследования, однако приведенное описание работы позволяет говорить о необходимости развивать аналогичные подходы для более подробной и адекватной оценки

энергетических характеристик волн и потенциала волновой энергии в акваториях морей России.

Для изучения особенностей ветрового волнения у южного берега Крыма авторами настоящей статьи была использована база данных ветрового волнения Черного моря, в основу которой легли результаты численных расчетов параметров ветрового волнения с использованием спектральной модели ветрового волнения третьего поколения SWAN [24, 25, 26]. Модель SWAN уже неоднократно применялась исследователями для Черного моря, и результаты моделирования показывали хорошее соответствие с инструментальными наблюдениями [24, 25, 27, 28].

В базе данных содержатся: значительная высота волны, период, длина, высота зыби и транспорт волновой энергии [24]. Дискретность записи этой информации в файл составляет 3 часа. Шаг сетки волновой модели 5 км. При расчетах учитывались поля ветра на высоте 10 м, полученные из реанализа NCEP/NCAR, с шагом по времени 6 часов и пространственным разрешением $1,875^\circ$ по долготе и $1,9046^\circ$ по широте за период с 1948 по 2010 гг. Этот реанализ был выбран из-за более протяженного временного интервала по сравнению с большинством других реанализов. Результаты проведенной авторами этой статьи оценки волнения приводятся для точки с координатами 34 в.д. 44,25 с.ш., глубина в точке составляет около 100 м (рис. 2).



Рис. 2. Точка, для которой были проведены расчеты энергетических характеристик волнения
 Fig. 2. Point for which calculations of the waves energy characteristics were carried out

Для каждого месяца в пределах расчетного периода (1948–2010 гг.) были подсчитаны среднегодовые значения интегрального переноса энергии, превышающие заданные. В итоге получена средне-

месячная обеспеченность энергии волн (время, когда энергия волн превышала заданные значения). Видно, что в анализируемой точке максимальная удельная энергия (более 5 000 Вт/м фронта волны) наблюдает-



ся в основном в зимние периоды (рис. 3), однако бывают дни, когда волнение отсутствует, поэтому превышение 500 Вт/м наблюдается только в 20–25 днях месяца. Результаты позволяют утверждать, что существенные значения удельной мощности волнения (более 1 000 Вт/м) можно получать только в течение половины зимних месяцев, а в остальные дни потенциал волновой энергии небольшой. В летний период более 30 % времени энергия волн не превышает 500

Вт/м, что связано с низкими скоростями ветра и отсутствием волнения летом, что является нормой для этого района. Результаты обработки данных показали, что среднегодовые значения волновой энергии для Черного моря нельзя использовать для теоретических расчетов потенциала, так как в этом случае не учитываются периоды времени, когда волнение отсутствует.

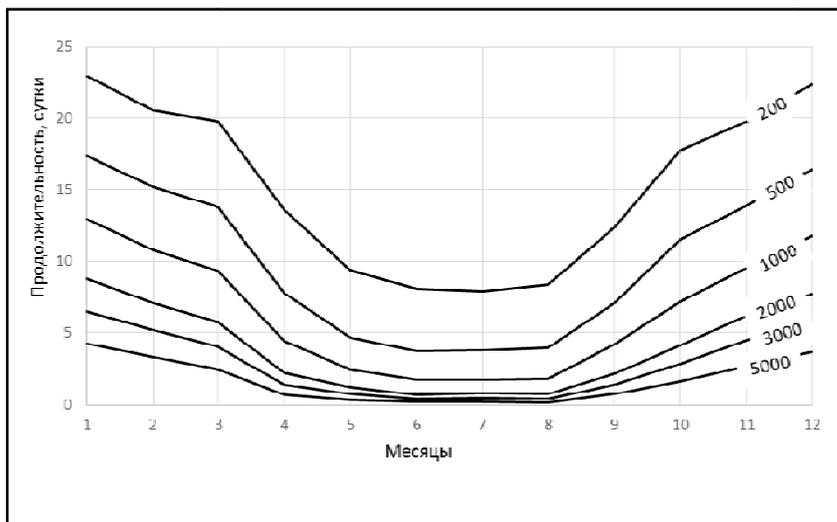


Рис. 3. Среднемесячная продолжительность периодов времени с удельной энергией волн, превышающей заданные значения (цифры на кривых)
Fig. 3. The average monthly long period of time with specific energy waves exceeds a predetermined value (the numbers on the curves)

На рис. 4 представлена значительная высота волн и перенос энергии для летних месяцев в пределах расчетного периода. На графиках присутствуют два пика, когда высота волн превышала 1 м и транспорт

энергии значительно увеличивался. В остальное время наблюдается либо штиль, либо слабое бризовое волнение, причем продолжительность периодов со слабым волнением может составлять 10–20 дней.

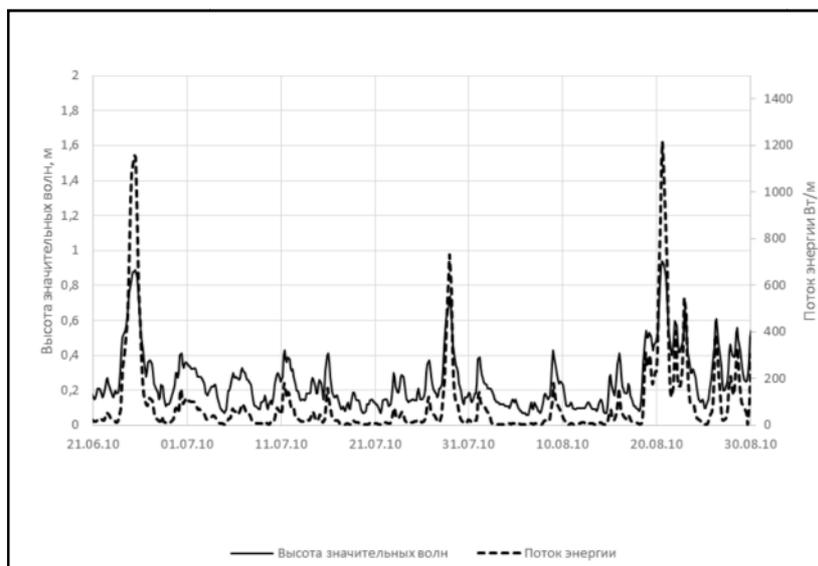


Рис. 4. Типичное распределение средних суточных высот волн и переноса энергии (июнь – август 2010 г.)
Fig. 4. Typical distribution of mean daily wave heights and energy transfer (June – August 2010)



Интересно также рассмотреть пространственную неоднородность распределения высоты волн и транспорта энергии. На рис. 5 представлено распределение значительной высоты волн на акватории Черного моря для 28.08.2010, соответствующее максимуму на графике рис. 3. Как видно на рисунке 5,

акватории, примыкающие к западному побережью Крыма, характеризуются более значительным волнением, чем восточные акватории, что связано с юго-западным ветром, генерирующим распространение волнения в северо-восточном направлении.

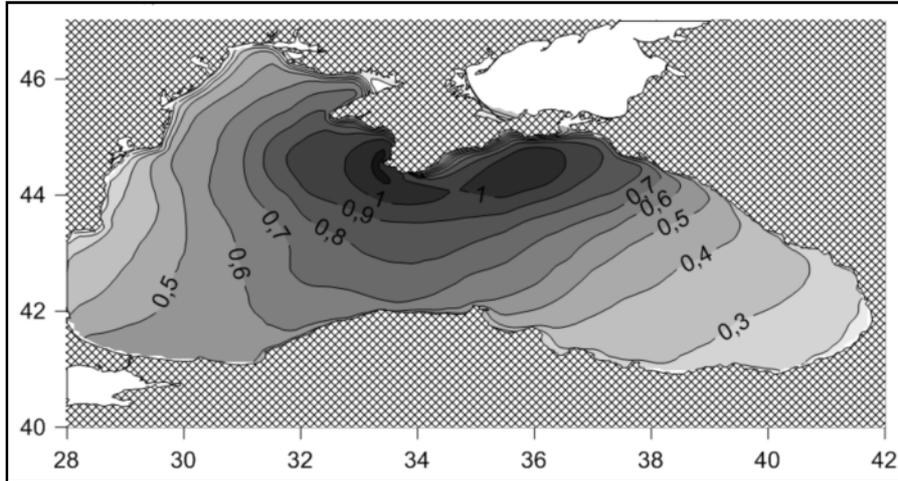


Рис. 5. Высота значительных волн на акватории Черного моря (20.08.2010)
Fig. 5. Height of significant waves on the Black Sea (20.08.2010)

Подобная картина наблюдается в пространственном распределении энергии (рис. 6). Набор таких карт или карты распределения среднемноголетнего

потока энергии могут быть использованы для выявления акваторий, наиболее перспективных для размещения волновых энергетических установок.

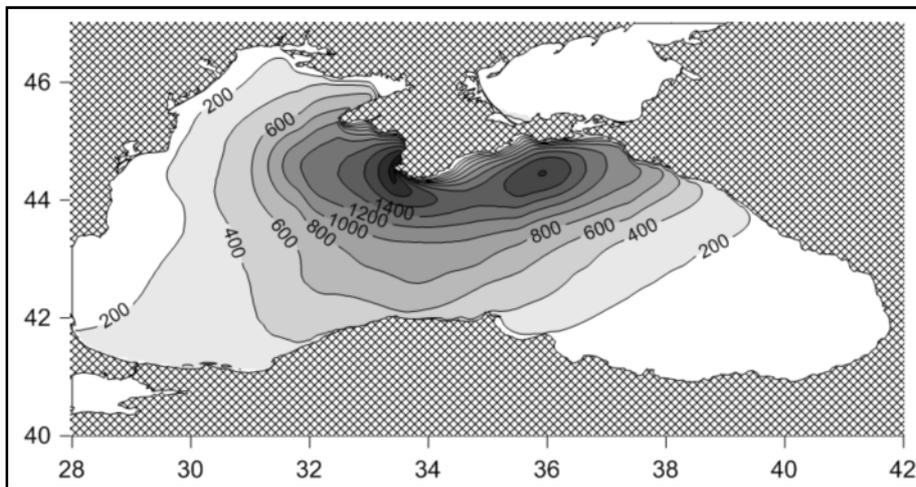


Рис. 6. Поток волновой энергии на единицу фронта волны (Вт/м, 20.08.2010)
Fig. 6. Wave energy flux per unit wave front (Wt/m, 20.08.2010)

Выводы

Таким образом, в настоящей статье с использованием модели ветрового волнения третьего поколения SWAN и данных реанализа NCEP/NCAR были проведены оценки характеристик волнения в заданной точке акватории Черного моря, а также сезонной динамики повторяемости значительных высот волн. Показано, что максимальной волновой энергией ха-

рактеризуется зимний период: в январе и декабре порядка 23 суток в месяц энергия волн превышает 500 Вт/м волнового фронта, в летние месяцы указанная продолжительность падает до 8 суток. Однако при дальнейших расчетах для акваторий, примыкающих к крымскому побережью, требуется верификация с привлечением архивных данных, а также результаты наблюдения на стационарных объектах, таких как исследовательская платформа п. Кацивели



(Республика Крым). Эти исследования позволят в дальнейшем перейти к широким оценкам волнового потенциала и его динамики на основе современных моделей и массивов данных для различных морей России. Ввиду существенной сезонной динамики волновой энергии большое значение приобретает комплексный анализ ресурсов волновой, ветровой и солнечной энергии в акваториях морей как базы для проектирования гибридных установок.

Список литературы

1. Ветер и волны в океанах и морях: Справочные данные. Л.: Транспорт, 1974.
2. Волшаник В.В., Зубарев В.В., Франкфурт М.О. Использование энергии ветра, океанских волн и течений // Итоги науки и техники. Сер. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. М.: ВИНТИ, 1983. Т. 1. 100 с.
3. Волшаник В.В., Матушевский Г.В. Энергия морских ветровых волн и принципы ее преобразования // Гидротехническое строительство. 1985. № 4. С. 41–45.
4. Дьяков А.Ф., Морозкина М.В. Проблемы использования энергии волн. М.: Энергоатомиздат, 1993.
5. Матушевский Г.В. Новый тип режимной функции распределения параметров волн // Метеорология и гидрология. 1977. № 3. С. 66–72.
6. Матушевский Г.В. Оценка энергезапасов ветрового волнения в морях СССР. М.: Деп. в ИЦ ВНИИГМИ – МЦД. 1982. N 14 5 ГМ-д 82. 1982.
7. Горлов А.А. Энергетика ветрового волнения океанских течений // Энергия: экономика, техника, экология. 2015. № 2. С. 30–39.
8. Горлов А.А. Возобновляемая энергия для океанологических исследований // Энергия: экономика, техника, экология. 2014. № 3. С. 28–36.
9. Сайт Министерства энергетики РФ [Электронный ресурс] http://www.minenergo.gov.ru/press/kfo/2686.html?sphrase_id=31822 (дата обращения: 11.06.2015)
10. Temeev A.A. High Efficient Ecologically Pure Wave Electric Power Stations and Its Applications // Proceedings of the 32-th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Honolulu, Hawaii, USA. 1997. Vol. 3. P. 2001–2004.
11. Темеев А.А., Сладков О.С., Темеев С.А. Динамическая модель поплавкового преобразователя энергии волн // Теплоэнергетика. 2008. № 12. С. 27–34.
12. Минин В.А., Дмитриев Г.С. Перспективы освоения нетрадиционных и возобновляемых источников энергии на Кольском полуострове. Мурманск, 2007. С. 58–67.
13. Гентова А. Технические аспекты использования возобновляемых источников энергии и энергоэффективности / Сборник работ победителей конкурса научных исследований в области возобновляемых источников энергии и энергоэффективности для молодых учёных, студентов и аспирантов рос-

сийских вузов в 2013/2014 учебном году. СПб.: Беллона, 2014. С. 5–24.

14. NASA Surface meteorology and Solar Energy. Atmospheric science data center. [Электронный ресурс] <https://eosweb.larc.nasa.gov/> (дата обращения: 10.09.2014).

15. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2003.

16. Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Иванов С.В., Чернышова Е.С. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей. Российский морской регистр судоходства. СПб, 2006.

17. Русецкий А.Н. Быстроокупаемая экологичная экстремальная энергетика – мегаватты и гигаватты – от морских и океанских волн и ветра. [Электронный ресурс] <http://www.sciteclibrary.ru/texts/rus/izobret/gr20/energetica.htm> (дата обращения: 27.07.2015).

18. Bingchen Liang, Fei Fan, Fushun Liu, Shanhong Gao, Hongyan Zuo. 22-Year wave energy hindcast for the China East Adjacent Seas // Renewable Energy. 2014. No 71. P. 200–207.

19. Lemonis G. Report on the EC contract № ICA2-CT-2000-10049, 2006.

20. Adem Akpınar, Murat Ihsan Komurcu Wave energy potential along the south-east coasts of the Black Sea // Energy. 2012. No 42. P. 289–302.

21. Adem Akpınar, Murat Ihsan Komurcu Assessment of wave energy resource of the Black Sea based on 15-year numerical hindcast data // Applied Energy. 2013. No 101. P. 502–512.

22. Ozhan E, Abdalla S. Wind-wave climate of the Black Sea and the Turkish coast (NATO TU-WAVES project) // In: 5th International workshop on wave hindcasting and forecasting, Melbourne, Florida, USA, Proceedings; January 1998. P. 71–82.

23. Abdalla S, Ozhan E. METU models for wind-wave prediction. METU-KLARE Special report. Middle East Technical University, Ankara, Turkey; 1994.

24. Arkhipkin V.S., Gippius F.N., Koltermann K.P. and Surkova G.V. Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study // Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions. 2014. Vol. 14. P. 2883–2897.

25. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions I. Model description and validation // Journal of Geophysical Research C: Oceans. 1999. No 104. P. 7649–7666.

26. The SWAN team. SWAN user manual (Cycle III version 40.72AB). Delft: Delft University of Technology, 2009.

27. Rusu E., Rusu L., Guedes Soares C. Prediction of extreme wave conditions in the Black Sea with numerical models // JCOMM Technical Report No. 34 / WMO-TD. 2006. № 1368.

28. Valchev N., Davidan I., Belberov Z., Palazov A., Valcheva N., Chin D. Hindcasting and assessment of the western Black sea wind and wave climate // J. Environ. Prot. Ecol. 2010. No 11. P.1001–1012.



References

1. Veter i volny v okeanah i morâh: Spravočné dan-nye. Leningrad: Transport Publ., 1974 (in Russ.).
2. Volshanik V.V., Zubarev V.V., Frankfurt M.O. Is-pol'zovanie ènergii vetra, okeanskih voln i tečenij. *Itogi nauki i tehniki. Ser. Netradicionnye i vozobnovlâemye istočniki ènergii*. Moscow: VINITI, 1983, vol. 1, 100 p. (in Russ.).
3. Volshanik V.V., Matushevsky G.V. Ènergiâ mors-kih vetrovyh voln i principy ee preobrazovaniâ. *Gidrotehničeskoe stroitel'stvo*, 1985, no. 4, pp. 41–45 (in Russ.).
4. D'yakov A.F., Morozkina M.V. Problemy is-pol'zovaniâ ènergii voln. Moscow: Ènergo-atomizdat Publ., 1993 (in Russ.).
5. Matushevsky G.V. Novyj tip režimnoj funkcii ras-predeleniâ parametrov voln. *Meteorologîâ i gidrologîâ*, 1977, no. 3, pp. 66–72 (in Russ.).
6. Matushevsky G.V. Ocenka ènergozapasov vetrovogo volneniâ v morâh USSR. Moscow: Dep. v IC VNIIGMI – MCd, 1982, N 14 5 GM-d 82, 1982 (in Russ.).
7. Gorlov A.A. Ènergetika vetrovogo volneniâ okeanskih tečenij. *Ènergiâ: èkonomika, tehnika, èkolo-giâ*, 2015, no. 2, pp. 30–39 (in Russ.).
8. Gorlov A.A. Vozobnovlâemaâ ènergiâ dlâ okeanologičeskikh issledovanij. *Ènergiâ: èkonomika, teh-nika, èkologîâ*, 2014, no. 3, pp. 28–36 (in Russ.).
9. Website of Ministry of Energy of the Russian Federation Available at: http://www.minenergo.gov.ru/press/kfo/2686.html?sphra-se_id=31822 (11.06.2015) (in Russ.).
10. Temeev A.A. High Efficient Ecologically Pure Wave Electric Power Stations and Its Ap-plications. *Proceedings of the 32-th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Honolulu, Hawaii, USA, 1997, vol. 3, pp. 2001–2004 (in Eng.).
11. Temeev A.A., Sladkov O.S., Temeev S.A. Dinamičeskââ model' poplavkovogo preobrazovatelâ ènergii voln. *Teploènergetika*, 2008, no. 12, pp. 27–34 (in Russ.).
12. Minin V.A., Dmitriev G.S. Perspektivy osvoeniâ netradicionnyh i vozobnovlâemyh istočnikov ènergii na Kol'skom poluostrrove. Murmansk, 2007, pp. 58–67 (in Russ.).
13. Gentova A. Tehničeskije aspekty ispol'zovaniâ vozobnovlâemyh istočnikov èner-gii i ènergoèffektivnosti. Sbornik rabot pobeditelej konkursa naučnyh issle-dovanij v oblasti vozobnovlâemyh istočnikov ènergii i ènergoèffektivnosti dlâ molodyh učenyh, studentov i aspirantov rossijskikh vuzov v 2013/2014 učebnom godu. Saint Petersburg: Bellona, 2014, pp. 5–24 (in Russ.).
14. NASA Surface meteorology and Solar Energy. Atmospheric science data center. Available at: <https://eosweb.larc.nasa.gov/>(10.09.2014) (in Eng.).
15. Spravočné dan-nye po režimu vetra i volneniâ Barenceva, Ohotskogo i Kaspijskogo morej. Saint Pe-tersburg: Rossijskij morskoy registr sudohodstva Publ., 2003 (in Russ.).
16. Lopatuhin L.I., Buhanovsky A.V., Ivanov S.V., Chernyshova E.S. Spravočné dan-nye po režimu vetra i volneniâ Baltijskogo, Severnogo, Černogo, Azovskogo i Sredizemnogo morej. Rossijskij morskoy registr sudo-hodstva. Saint Petersburg: 2006 (in Russ.).
17. Rusetsky A.N. Bystrookupaemaâ èkologičnaâ èkstre-mal'naâ ènergetika – megavatty i gigavatty – ot morskikh i okeanskih voln i vetra. Available at: <http://www.sciteclibrary.ru/texts/rus/izobret/gr20/energetica.htm> (27.07.2015) (in Russ.).
18. Bingchen Liang, Fei Fan, Fushun Liu, Shanhong Gao, Hongyan Zuo. 22-Year wave energy hindcast for the China East Adjacent Seas. *Renewable Energy*, 2014, no. 71, pp. 200–207 (in Eng.).
19. Lemonis G. Report on the EC contract # ICA2-CT-2000-10049, 2006 (in Eng.).
20. Adem Akpınar, Murat Ihsan Komurcu Wave energy potential along the south-east coasts of the Black Sea. *Energy*, 2012, no. 42, pp. 289–302 (in Eng.).
21. Adem Akpınar, Murat Ihsan Komurcu Assess-ment of wave energy resource of the Black Sea based on 15-year numerical hindcast data. *Applied Energy*, 2013, no. 101, pp. 502–512 (in Eng.).
22. Ozhan E, Abdalla S. Wind-wave climate of the Black Sea and the Turkish coast (NATO TU-WAVES project). *5th International workshop on wave hindcast-ing and forecasting*, Melbourne, Florida, USA, Proceed-ings; January, 1998, pp. 71–82 (in Eng.).
23. Abdalla S., Ozhan E. METU models for wind-wave prediction. METU-KLARE Special report. Middle East Technical University, Ankara, Turkey; 1994 (in Eng.).
24. Arkhipkin V.S., Gippius F.N., Koltermann K.P. and Surkova G.V. Wind waves in the Black Sea: results of a hindcast study. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2014, vol. 14, pp. 2883–2897 (in Eng.).
25. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions 1. Model de-scription and validation. *Journal of Geophysical Research C: Oceans*, 1999, no. 104, pp. 7649–7666 (in Eng.).
26. The SWAN team. SWAN user manual (Cycle III version 40.72AB). Delft: Delft University of Technol-ogy, 2009 (in Eng.).
27. Rusu E., Rusu L., Guedes Soares C. Prediction of extreme wave conditions in the Black Sea with numeri-cal models. *JCOMM Technical Report*, No. 34 / WMO-TD, 2006, no. 1368 (in Eng.).
28. Valchev N., Davidan I., Belberov Z., Palazov A., Valcheva N., Chin D. Hindcasting and assessment of the western Black sea wind and wave climate. *J. Environ. Prot. Ecol.*, 2010, no. 11, pp. 1001–1012 (in Eng.).

Транслитерация по ISO 9:1995

