



РАЗРАБОТКА ВЕБ-АТЛАСА ДОСТУПНОЙ ЭНЕРГИИ ВОЛН И ВЕТРА ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ МОРЕЙ РОССИИ: ИНФОРМАЦИОННОЕ И КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ (НА ПРИМЕРЕ ЧЁРНОГО МОРЯ)*

*С.А. Мысленков^{1,2,3}, Т.Е. Самсонов¹, С.В. Киселева¹,
В.С. Архипкин¹, А.А. Шестакова⁴, П.М. Умнов¹*

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

тел.: +7(495)939-42-57; e-mail: k_sophia_v@mail.ru

²ФГБУ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
д. 36, Нахимовский проспект, Москва, 117997, Россия

тел.: +7(499)124-59-96

³Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации
д. 11-13, Большой Предтеченский переулок, Москва, 123242, Россия

тел.: +7(499) 252-34-48

⁴ИФА им. А.М. Обухова РАН

д. 3, Пыжковский пер., Москва, 119017, Россия

тел.: +7 (495) 951-55-65

doi: 10.15518/isjaee.2018.16-18.039-054

Заключение совета рецензентов: 28.05.18 Заключение совета экспертов: 04.06.18 Принято к публикации: 09.06.18

Согласно ранее проведенным оценкам, побережья России обладают высоким потенциалом волновой и ветровой энергии. При этом использование нескольких видов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) позволяет преодолеть присущий им недостаток – неоднородность во времени потока энергии. В настоящее время за рубежом и в России при оценке потенциала ветровых и волновых ресурсов широко используются результаты спутниковых наблюдений, математическое моделирование и данные реанализов. На этой основе разрабатываются карты, атласы, базы данных и иные информационные ресурсы (как в печатной, так и в электронной форме) для проектирования, математического моделирования производительности энергетических станций и установок на ВИЭ, в том числе гибридных.

В статье приведены результаты первого этапа разработки веб-атласа волновой и ветровой энергии для прибрежной зоны морей РФ. Задачи данного этапа связаны с проработкой информационного и картографического обеспечения атласа. Представлены методы расчета волновых и ветровых характеристик (спектральная волновая модель SWAN) и источники данных – реанализы скорости ветра NCEP/CFSR и NCEP/CFSv2 за периоды 1979–2010 гг. и 2011–2016 гг. В качестве характеристик энергетического потенциала рассчитаны и проанализированы среднесезонные значения высоты значительных волн, длины и периода волн, потока волновой энергии, обеспеченности, а также средняя удельная мощность ветрового потока.

Детально рассмотрены инструменты разработки прототипа веб-атласа. Веб-атлас базируется на классической трехзвенной модели, включающей подсистему хранения данных (сервер баз данных), подсистему анализа и публикации данных (непосредственно ГИС-сервер) и подсистему веб-приложений, обеспечивающую пользовательский интерфейс для взаимодействия с данными и картографическими сервисами (веб-сервер). Реализация веб-атласа осуществлена на примере акваторий Черного моря. Предполагается дальнейшее развитие атласа с охватом прибрежных акваторий всех морей России.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии; волновая энергия; ветровая энергия; геоинформационная система; веб-атлас; спектральная волновая модель SWAN; реанализ; Черное море; геоинформационное моделирование.

*Мысленков С.А., Самсонов Т.Е., Киселева С.В., Архипкин В.С., Шестакова А.А., Умнов П.М. Разработка веб-атласа доступной энергии волн и ветра прибрежной зоны морей России: информационное и картографическое обеспечение (на примере Чёрного моря) // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;16-18:39-54.



DEVELOPMENT OF WEB-ATLAS OF AVAILABLE WIND AND WAVE ENERGY IN THE COASTAL ZONES OF THE RUSSIAN SEAS: INFORMATION AND CARTOGRAPHIC SUPPORT (ON THE EXAMPLE OF THE BLACK SEA)

*S.A. Myslenkov^{1,2,3}, T.E. Samsonov¹, S.V. Kiseleva¹, V.S. Arkhipkin¹,
A.A. Shestakova⁴, P.M. Umnov¹*

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography
1 Leninskie Gori, Moscow, 119991, Russia
tel: +7(495)939 42 57, e-mail: k_sophia_v@mail.ru

²P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences (IO RAS)
36 Nakhimovski Av., Moscow, 117997, Russia
tel.: +7(499) 124 59 96

³Hydrometeorological Research Centre of the Russian Federation, Marine Forecast Division
11-13 B. Predtechensky Av., Moscow, 123242, Russia
tel.: +7 (499)252 34 48

⁴A.M.Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences
3 Pyzhyovskiy pereulok, Moscow, 119017, Russia
tel.: +7 (495) 951 55 65

doi: 10.15518/isjaee.2018.16-18.039-054

Referred 28 May 2018 Received in revised form 4 June 2018 Accepted 9 June 2018

According to earlier estimates, the Russian coasts have a high potential of wave and wind energy. At the same time, the use of several types of renewable energy sources (RES) allows us to overcome the inherent drawback—the inhomogeneity in time of the energy flow. Nowadays in Russia and abroad, the results of satellite observations, mathematical modeling and reanalysis data are widely used to assess the potential of wind and wave resources. The maps, the atlases, the databases and other information resources (both printed and electronic) are developed for use in the design, mathematical modeling of the power plants performance on the base of RES including hybrid ones.

The paper presents the results of developing a Web Atlas of wave and wind energy for the coastal zone of the seas in the Russian Federation, demonstrates the methods for calculating wave and wind characteristics (SWAN spectral wave model), as well as data sources (wind speed reanalyses NCEP / CFSR and NCEP / CFSv2 for the periods 1979-2010 and 2011-2016). As the characteristics of the energy potential, mean annual values of the height of significant waves, length, period of waves, flux of wave energy, average specific power of the wind flow are calculated and analyzed. The tools for developing a Web Atlas prototype are discussed in detail. Web Atlas is based on the classical three-tier model which includes a storage subsystem (database server), a subsystem for analyzing and publishing data (directly a GIS server), and a Web application subsystem providing a user interface for interacting with data and mapping services (web server). The implementation of the Web Atlas has been carried out for the Black Sea waters. It is planned to further develop the atlas covering the coastal waters of all the seas of Russia.

Key words: renewable energy sources; wave energy; wind energy; geoinformation system; Web Atlas; SWAN spectral wave model; reanalysis; Black Sea; geoinformation modeling.



*Станислав Александрович
Мысленков
Stanislav Myslenkov*

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник кафедры океанологии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Образование: географический факультет МГУ (2007 г.).

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

Публикации: 78, в том числе 2 государственных свидетельства о регистрации на базы данных по волнению.

Information about the author: Ph. D. in Physics and Mathematics, Senior Researcher at Department of Oceanology, Faculty of Geography, MSU.

Education: Faculty of Geography, MSU, 2007.

Research interests: wind waves; ocean currents; experimental oceanography.

Publications: 78, including 2 state certificates of registration on wave databases.





Тимофей Евгеньевич
Самсонов
Timofey Samsonov

Сведения об авторе: канд. географ. наук, ведущий научный сотрудник кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Образование: географический факультет МГУ (2007 г.)

Область научных интересов: картография; геоинформатика; ГИС.

Публикации: 75, в том числе 2 государственных свидетельства о регистрации на базы данных по волнению.

Information about the author: Ph.D. in Geography, Leading Researcher, Department of Cartography and Geoinformatics, Faculty of Geography, MSU.

Education: Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, 2007.

Research interests: cartography; geoinformatics; GIS.

Publications: 75, including 2 state certificates of registration on wave databases.



Софья
Валентиновна Киселева
Sofia 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 г.) и аспирантура того же факультета (1990 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии: оценка ресурсов ВИЭ, эколого-географические аспекты возобновляемых источников энергии; лабораторное моделирование динамических процессов в океане.

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

Information about the author: Ph. D. in Physics and Mathematics, Senior Researcher at Renewable Energy Sources Laboratory (Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography).

Education: Faculty of Physics Lomonosov Moscow State University, 1987.

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

Publications: more than 80, including patents.



Виктор Семенович Архипкин
Victor Arkhipkin

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

Образование: географический факультет МГУ (1976 г.).

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

Публикации: более 150, включая 9 монографий и учебных пособий, 2 государственных свидетельства о регистрации на базы данных по волнению.

Information about the author: Ph.D. in Geography, Assistant Professor at Department of Oceanology, Faculty of Geography, MSU.

Education: Faculty of Geography, MSU, 1976.

Research interests: 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 certificates of registration on wave data bases patent.



Анна Андреевна Шестакова
Anna Shestakova

Сведения об авторе: канд. географ. наук, инженер в Институте физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН.

Образование: географический факультет МГУ (2014 г.).

Область научных интересов: мезометеорология; горная метеорология; численное моделирование.

Публикации: 16.

Information about the author: Ph.D. in Geography, Engineer, Obukhov Institute of Atmospheric Physics.

Education: Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, 2014.

Research interests: mesometeorology; mountain meteorology; numerical modeling.

Publications: 16.



Павел Михайлович Умнов
Pavel Umnov

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

Образование: радиотехнический факультет МЭИ (1992 г.).

Область научных интересов: морское волнение; разработка и производство приборов для измерения волнения.

Публикации: 2.

Information about the author: Head of IT Department, Faculty of Geography, MSU.

Education: Radio Engineering Faculty of MPEI, 1992.

Research interests: wind waves; development and production of equipment for wave measurements.

Publications: 2.



Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
σ	Среднеквадратическое отклонение скорости
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
C_v	Коэффициент вариации
N	Ветроэнергетический потенциал
S	Множество точек
\bar{v}	Средняя скорость ветра
<i>Аббревиатуры</i>	
ACID	Требования к транзакциям: атомарность, согласованность, изолированность, устойчивость (Atomicity, Consistency, Isolation, Isolation)
AJAX	Асинхронный JavaScript и XML (Asynchronous Javascript and XML)
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
EPSG:4326, EPSG:3857	Типы географических проекций
GRID	Растровое представление поверхности на регулярной сетке
NCEP	Национальный центр прогноза состояния окружающей среды (The National Centers for Environmental Prediction)
NIN	Триангуляционная поверхность (Triangular Irregular Networks)
NND	Среднее расстояние до ближайшего соседа (Nearest Neighbor Distance)
SLD	Styled Layer Descriptor
OGC	Открытый геопространственный консорциум (Open Geospatial Consortium)
WGS-1984	Всемирная система геодезических параметров Земли 1984 г. (World Geodetic System 1984)
WFS	Web Feature Service
WMS	Стандартный протокол для обслуживания через Интернет географически привязанных изображений (Web Map Service)
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
ГИС	Геоинформационная система
ИБС	Метод иерархических базисных сплайнов
ПО	Программное обеспечение
СКО	Среднеквадратическое отклонение
СУБД	Система управления базами данных
ЦМР	Цифровая модель рельефа

1. Введение

В последние годы наметился устойчивый тренд увеличения доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в общей выработке электричества [1]. Однако ВИЭ в силу своего непостоянства в пространстве и во времени, а также низкой удельной мощности, как правило, не могут полностью заменить традиционные источники энергии (углеводородное топливо, гидроэнергия и атомная энергия) – как по стоимости, так и по возможностям удовлетворить запросы потребителей в каждый момент времени. Одним из методов преодоления этих естественных недостатков ВИЭ является гибридное (совместное) использование нескольких возобновляемых источников энергии, которое позволяет добиться более стабильной выдачи электроэнергии. В прибрежной зоне морей и океанов такими источниками могут служить солнечная, ветровая и волновая энергия.

Россия омывается тринадцатью морями, протяженность ее береговой линии составляет порядка 40 тыс. км, поэтому для нашей страны исследование возможности использования энергии волн и ветра является весьма актуальным [2]. Согласно ранее проведенным оценкам, побережье России обладает высоким потенциалом волновой и ветровой энергии [3–7].

Любые проекты, связанные с ВИЭ, требуют максимально точной информации о наличии ресурсов того или иного вида возобновляемого источника энергии. В РФ (ранее в СССР) предпринимались попытки оценить эти ресурсы, однако эти исследования базировались на недостаточно точных методах и ограниченной информации [3]. Вовлечение в исследования в качестве информационной основы результатов спутниковых наблюдений, математического моделирования и данных реанализов началось в отечественной практике только около 10 лет назад [8–12]. В то же время за рубежом такого рода исследования проводятся чрезвычайно активно. Созданы ресурсы (открытые или коммерческие в зависимости от предоставляемых опций и детализации) как для отдельных государств, так и глобальные (проекты атласов и ГИС в области возобновляемой энергетики: 3TIER; RenewableEnergyAssessmentandForecasting; Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA), Global Atlas for Renewable energy IRENA). Ряд зарубежных исследовательских центров возобновляемой энергетики инициирует создание электронных атласов и баз данных для территории России (например, атлас ВИЭ Арктики, в том числе ее российской части [13]). В этой связи обоснованной и актуальной является разработка атласа ветровых и волновых ресурсов



прибрежных регионов России на основе современных методологических подходов и баз данных.

В настоящей работе представлены первые результаты проектирования и реализации веб-атласа доступной ветровой и волновой энергии для прибрежной зоны морей России, полученные на примере Черного моря. Даны сведения об информационной базе атласа, методах обработки и картографической визуализации данных, архитектуре предлагаемого решения. Технологической основой создаваемого атласа является ГИС-сервер, на котором будут размещены карты распределения энергии волн и ветра: средних значений, повторяемости, обеспеченности и других статистических характеристик. Приведены примеры карт доступной энергии волн и ветра для прибрежной зоны Черного моря.

2. Материалы и методы исследования

2.1. Информационное обеспечение

Параметры волнения для отображения в веб-атласе были получены с помощью спектральной волновой модели SWAN [14] для периода 1979–2016 гг. [15]. При моделировании волнения использовались данные о ветре из реанализов NCEP/CFSR за период 1979–2010 гг. с пространственным разрешением 0,3° и NCEP/CFSv2 за период 2011–2016 гг. с разрешением 0,2°. Вычисления проводились на неструктурной триангуляционной сетке, где для открытой части Черного моря шаг по пространству составлял 12 км, а для прибрежной зоны до 500 м (рис. 1).

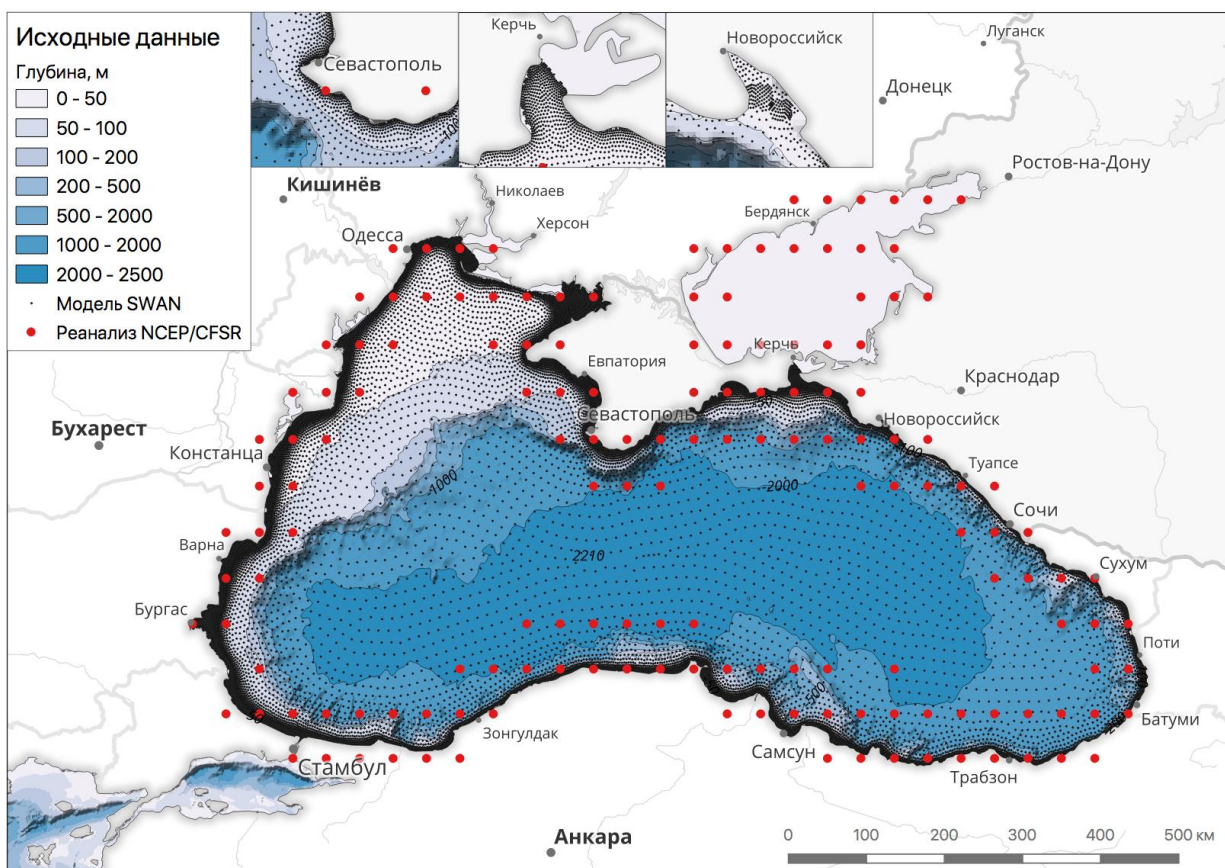


Рис. 1 – Пространственная конфигурация исходных данных
 Fig. 1 – Spatial configuration of input data

Более подробное описание конфигурации волновой модели и оценки ее качества изложены в работах [15–18]. Из реанализа волнения были получены данные о потоке (переносе) волновой энергии через единицу длины волнового фронта (кВт/м) для каждого узла расчетной сетки с шагом по времени 3 ч. за период с 1979 г. по 2016 г. Кроме того, были получены среднесезонные (за весь период) значения высоты значительных волн, длины, периода волн и потока волновой энергии. Для оценки сезонной изменчивости были рассчитаны среднесезонные

значения потока волновой энергии для каждого месяца. Эти показатели позволяют оценить пространственную и сезонную изменчивость потока волновой энергии. Однако для проектирования волновых электростанций наиболее важно иметь данные о стабильности потока волновой энергии во времени. Для этих целей была рассчитана обеспеченность волновой энергией для следующих критериев: >0,5 и 1,2 кВт/м волнового фронта, согласно методике [17, 19]. Обеспеченность представляет собой отношение количества значений ряда, когда поток волновой энергии

превышает заданный критерий, к общему количеству значений всего ряда.

Данные о скорости ветра и ее повторяемости были рассчитаны согласно методике, приведенной в работе [20]. В качестве основы взяты данные реанализа высокого разрешения NCEP/CFSR на высотах изобарических поверхностей 1 000 мб (около 110 м) и 975 мб (около 300 м) с пространственным разрешением 0,5° и шагом по времени 6 ч. По этим данным выполнены оценки повторяемости скорости ветра и рассчитаны средние значения скорости на высотах 50 м и 110 м для побережья Черного моря за период 1979–2010 гг. Ветроэнергетический потенциал (средняя удельная мощность ветрового потока, равная потоку энергии воздушной струи единичной площади сечения на заданной высоте над уровнем земли, Вт/м²) для побережья и прибрежных акваторий рассчитывалась по формуле (см., например, [7]):

$$N = 0,613\bar{v}^3(1 + 3C_v^2 - 0,9C_v^3 + 2,9C_v^4), \quad (1)$$

где $C_v = \sigma / \bar{v}$ – коэффициент вариации; \bar{v} – средняя скорость ветра; σ – среднеквадратическое отклонение (СКО) скорости. Эти параметры (среднее и СКО скорости ветра) были рассчитаны по данным реанализа, которые предварительно верифицировались по данным радиозондовых наблюдений. Результаты сравнения показали удовлетворительное качество реанализа для воспроизведения ветрового режима черноморского побережья. Наименьшие ошибки отмечаются на северном и западном побережье. Ветроэнергетический потенциал рассчитывался в среднем за год и для различных сезонов года на высотах 50 м и 110 м.

2.2. Математическая и геодезическая основа атласа

Сетка исходных данных зафиксирована в системе географических координат WGS 84 (код EPSG:4326), отнесенной к одноименному эллипсоиду, местоположение точек указано в виде широты и долготы. Для картографической визуализации данных необходимо выполнить проецирование в плоскую прямоугольную систему координат. Стандартной проекцией при публикации картографических сервисов является видоизмененная цилиндрическая проекция Меркатора – WebMercator / PseudoMercator (код EPSG:3857). Данная проекция не является оптимальной с точки зрения искажений, однако характеризуется равноугольностью; для фигур малого размера, расположенных в низких и средних широтах, это означает приблизительную конформность, или сохранение формы. Точки исходных данных были проецированы в систему координат проекции EPSG:3857 для выполнения последующей интерполяции и картографической визуализации полученных поверхностей.

2.3. Геоинформационное моделирование поверхностей распределения волновых характеристик

Модель SWAN, использованная для расчетов характеристик волнения, работает на нерегулярной триангуляционной сетке. Визуализация триангуляционных структур данных не поддерживается современными стандартами веб-сервисов OGC(WMS, WFS), а также программными библиотеками визуализации данных (такими как OpenLayers, Leaflet, Mapbox). Следствием данного технологического ограничения является необходимость преобразования триангулированных поверхностей (TIN) в растровые (GRID).

Для этого авторы настоящей работы применяли метод иерархических базисных сплайнов (ИБС) [21]. В данном методе каждый участок поверхности размером 4 x 4 ячейки представляет собой бикубическую поверхность. Значения в ячейках получаются исходя из условия прохождения поверхности через исходные точки, а также минимизации суммы квадратов значений (поскольку существует бесконечное число различных поверхностей на сетке 4 x 4, которые проходят через заданную точку). При иерархическом подходе поверхность строится в несколько итераций с последовательным переходом на более детальное разрешение сетки. При этом на каждой последующей итерации аппроксимации подвергаются остатки между исходными значениями в точках и теми, которые получаются по бикубической поверхности. Достоинство метода иерархических базисных сплайнов заключается в том, что поверхность получается сразу для всех узлов – нет необходимости решать систему линейных уравнений для каждого узла сетки. Метод является локальным: исходные точки, удаленные от текущего узла растровой модели далее, чем на 2 узла, не оказывают на нее влияния. В результате метод ИБС является быстрым и эффективным в вычислительном плане. Помимо этого, мультимасштабность метода позволяет эффективно применять его при интерполяции данных, распределенных неравномерно по пространству, а также получать генерализованные варианты поверхности путем интерполяции с малым числом итераций.

Для оценки необходимого разрешения выходного растра в процессе интерполяции необходимо вычислить для массива исходных точек среднее расстояние до ближайшего соседа (Nearest Neighbor Distance, NND), которое дает оценку пространственной частоты дискретизации. Согласно теореме Котельникова [22], потери данных можно избежать, если частота дискретизации (сигнала, данных) будет вдвое больше максимальной пространственной частоты (частоты Найквиста). Интерпретируя это утверждение в терминах растрового анализа, можно сказать, что разрешение растра должно быть, по крайней мере, в 2 раза выше, чем минимальное расстояние до ближайшего соседа в анализируемом множестве точек. Произведенные расчеты показали, что для представ-



ленных на акваторию Черного моря данных достаточно разрешения 200 метров.

Наконец, важным, но малозаметным для пользователя аспектом построения растровой модели является вопрос выбора области распределения. Для океанологических показателей специфична обрезка этой области контуром береговой линии. При этом в разных масштабах используются представления береговой линии соответствующей детализации. Это означает, что интерполируемая поверхность должна иметь область значений, перекрывающую территорию суши таким образом, чтобы при ее маскировке береговой линией различной детализации не появлялись пустые ячейки. Исходя из этого, полученные растровые поверхности имеют размер 9 000 x 5 400 ячеек, а их версии, маскированные контуром береговой линии, – 8 000 x 4 400 ячеек.

Для каждого отображаемого на картах показателя рассчитаны 8 уровней растровой пирамиды в целях оптимизации скорости и качества отображения в мелких масштабах картографирования. Растровая пирамида представляет собой множество растровых поверхностей, полученных путем последовательного увеличения размера ячейки исходного растра (дискретизация) с соответствующим перевычислением отнесенных к каждой ячейке значений показателей. Каждый уровень пирамиды получен передискретизацией исходного растра с удвоением исходного разрешения методом билинейной интерполяции. Результирующие узлы сетки совпадают с центрами ячеек, образованных четырьмя соседними узлами исходной сетки.

2.4. Геоинформационное моделирование пространственного распределения ветроэнергетического потенциала

Данные об энергии ветра в прибрежной области локализованы на картах по разреженному множеству точек с шагом 0,5°, распределенных в виде узкой полосы вдоль береговой линии. Интерполяция поверхности методами, обеспечивающими непрерывность распределения, по таким данным нецелесообразна в силу ограниченного числа точек моделирования и вытянутой конфигурации. В то же время для картографической наглядности желательно создать сплошное покрытие прибрежных территорий на основе имеющейся информации.

Компромиссным вариантом в такой ситуации является метод «ближайшего соседа» (NND), в котором каждая точка в пределах области интерполяции принимает значение показателя от ближайшей к ней точки исходных данных. В этом случае получается ступенчатая поверхность, сплошным образом покрывающая область интерполяции и напоминающая картограмму с ярко выраженными границами между ячейками. Технологически данный подход реализуется путем построения диаграммы Вороного для множества точек исходных данных. Диаграмма Вороного конечного множества точек S на плоскости

представляет собой такое разбиение плоскости, при котором каждая область этого разбиения образует множество точек, более близких к одному из элементов множества S , чем к любому другому элементу множества [23].

Для ограничения области построения диаграммы Вороного вручную строится осевая линия множества точек, после этого производится ее буферизация таким образом, чтобы полученная буферная зона покрывала исходное множество точек с запасом, равным среднему расстоянию между точками. Вычисления, произведенные для исходного множества точек, дают радиус буфера, равный 50 км. Построенная буферная зона используется для ограничения области построения диаграммы Вороного.

2.5. Методы картографического отображения

Для отображения в картах атласа характеристик волновой и ветровой энергии применяются методы изолиний с послышной окраской (характеристики волнения) и картограмм (характеристики ветровой энергии). Выбор способов изображения базируется на соответствующей локализации показателей (растровая модель и сетка полигонов Вороного соответственно).

Для представления энергетических характеристик в картографическом виде было выполнено проектирование картографических стилей отображения. Цветовые шкалы униполярных и биполярных показателей для скалярных величин были прописаны в формате SLD (StyledLayerDescriptor) [24] на основе системы цветовых палитр ColorBrewer [25].

Униполярные показатели имеют один характерный вектор изменения значения (от минимума к максимуму). Для их картографирования используются последовательные шкалы изменения светлоты и насыщенности цвета при возможном изменении цветового тона. Для базовых физических характеристик, таких как высота, длина и период волны, скорость ветра, предложено использовать однотонные последовательные шкалы (зеленого, синего, красного, фиолетового, оранжевого тонов). Для производных характеристик, отражающих непосредственно величину энергии, а также ее обеспеченность, предложено использовать более сложные многоцветные шкалы. Это способствует наглядному разделению показателей при их визуальном анализе по картам.

Биполярные показатели характеризуются наличием нейтрального значения (обычно нулевого), относительно которого существует два характерных вектора изменения показателя (обычно в положительную и отрицательную сторону). К таким показателям можно отнести долгопериодные (многолетние) изменения анализируемой величины. Для картографирования биполярных показателей традиционно используются расходящиеся цветовые шкалы изменения светлоты и насыщенности цвета. При наличии значительного количества градаций в таких шкалах возможно добавление нового цветового тона в каждый из градиентов.



2.6. Технологическая архитектура атласа

Общая архитектура ГИС-сервера базируется на классической трехзвенной (трехуровневой) модели, включающей подсистему хранения данных (сервер баз данных), подсистему анализа и публикации данных (непосредственно ГИС-сервер) и подсистему

веб-приложений, обеспечивающую пользовательский интерфейс для взаимодействия с данными и картографическими сервисами (веб-сервер). Реализация архитектуры для задач построения веб-атласа представлена на рис. 2.

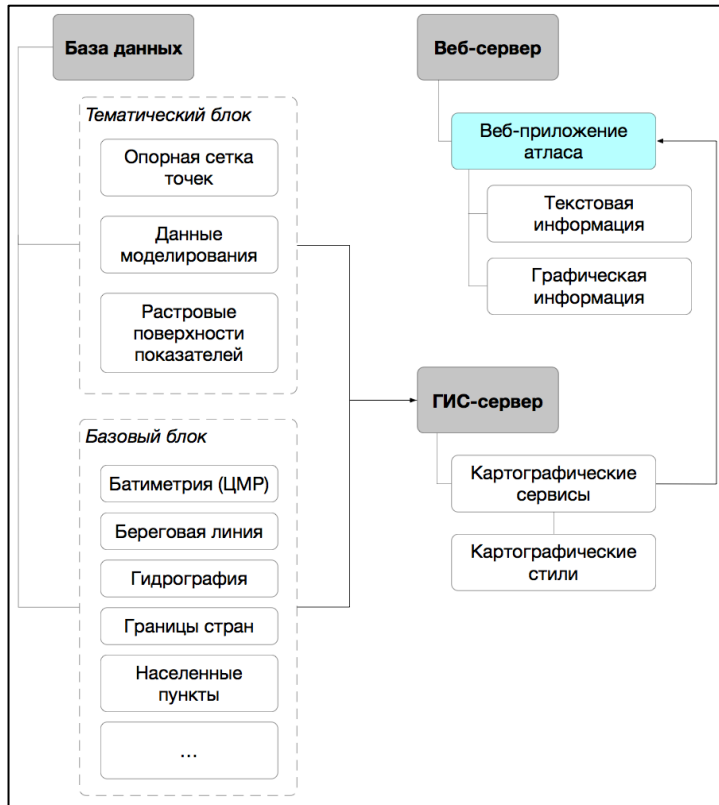


Рис. 2 – Трехзвенная технологическая архитектура веб-атласа
Fig. 2 – Three-tier technological architecture of the Web atlas

3. Результаты и обсуждение

3.1. Реализация технологической архитектуры веб-атласа

В качестве программных платформ для развертывания подсистем были выбраны следующие решения (рис. 3): PostgreSQL – сервер баз данных, GeoServer – ГИС-сервер, Apache и OpenLayers – веб-сервер. Для подготовки пространственных данных задействовано ПО QGIS. Данные программные средства относятся к категории бесплатного ПО с открытым исходным кодом, при этом используемая разработчиками лицензия позволяет применять созданные на их основе технологические решения как в коммерческих, так и некоммерческих целях.

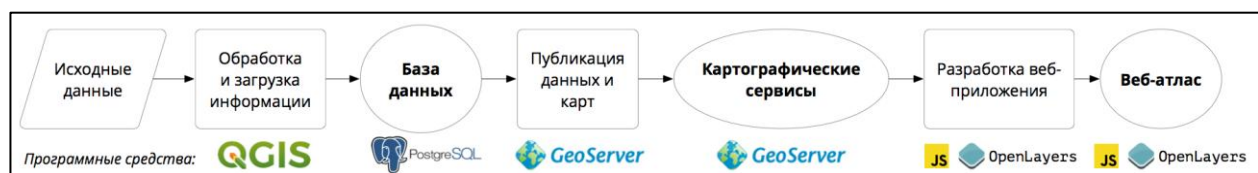


Рис. 3 – Технологическая схема выполнения работ и используемые программные средства
Fig. 3 – Technological scheme and software tools used

PostgreSQL [26] – бесплатная объектно-реляционная СУБД с открытым исходным кодом, которая работает на большинстве распространенных операционных систем (Windows, Linux, Unix). Функциональность СУБД удовлетворяет требованиям к транзакциям ACID [27]: Atomicity (атомарность), Consistency (согласованность), Isolation (изолированность), Durability (устойчивость). Расширение PostGIS добавляет поддержку географических объектов, которая позволяет выполнять запросы местоположения в SQL и хранить специфичную для географических данных информацию, предоставляя вспомогательные пространственные типы и функции. Кроме того, PostGIS обеспечивает совместимость с различными сторонними геопространственными инструментами для работы с данными.

GeoServer [28] – ГИС-сервер, написанный на языке Java и предоставляющий пользователям возможность просматривать и редактировать геопространственные данные в режиме онлайн. Используя открытые стандарты, установленные OpenGeospatial Consortium (OGC), GeoServer обеспечивает интероперабельность в обмене информацией с другими серверами в сети Интернет. GeoServer построен на инструментарию с открытым исходным кодом (Geotools), поддерживает, в том числе, стандарты WFS и WMS, обеспечивающие соответственно передачу и картографическое представление пространственных данных. Публикуемые на Geoserver данные могут быть как векторными (шейп-файлы, GeoPackage), так и растровыми (JPG, PNG, ImageMosaic). Важным свойством является возможность подключения ГИС-сервера к источникам данных в СУБД (PostGIS, MySQL), в которых располагаются как векторные, так и растровые данные. В нашем случае применялась конфигурация с подключением к СУБД.

OpenLayers [29] представляет собой программную библиотеку, написанную на языке JavaScript с открытым исходным кодом (лицензия BSD 2-Clause), благодаря которой можно создавать веб-карты с возможностью просмотра в веб-браузере. OpenLayers обрабатывает информацию с помощью вызова AJAX (Asynchronous Javascript and XML). Каждый раз при взаимодействии пользователя с картой OpenLayers отправляет запросы на сервер, после чего объединяет все возвращенные данные, которые могут быть как растровыми, так и векторными. AJAX обеспечивает возможность фонового обмена данными между браузером и веб-сервером. OpenLayers 3.0+ поддерживает также современные мобильные сенсорные устройства. Авторами настоящей статьи использовалась версия библиотеки Openlayers 4.5.

3.2. Формирование базы пространственных данных

С помощью PostgreSQL были выполнены развертывание и настройка подсистемы хранения данных. Создана база данных, для которой проведена активация

функций PostGIS, позволяющих осуществлять хранение и анализ пространственных данных.

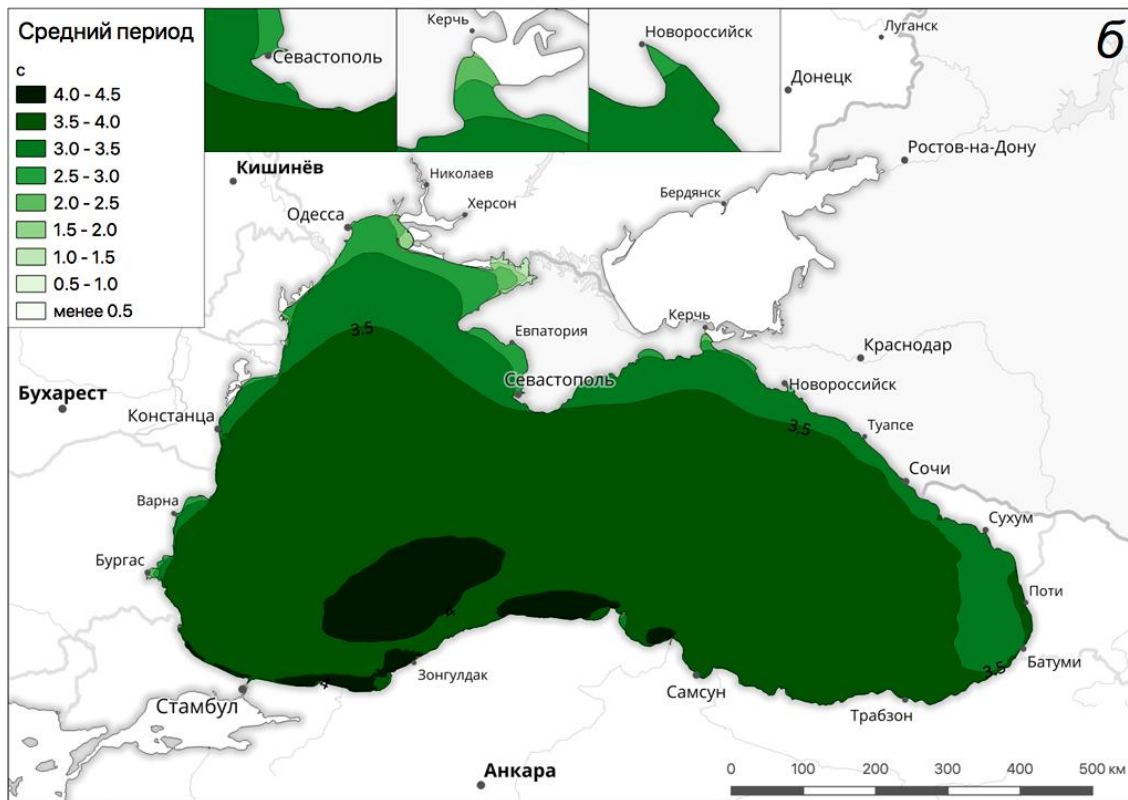
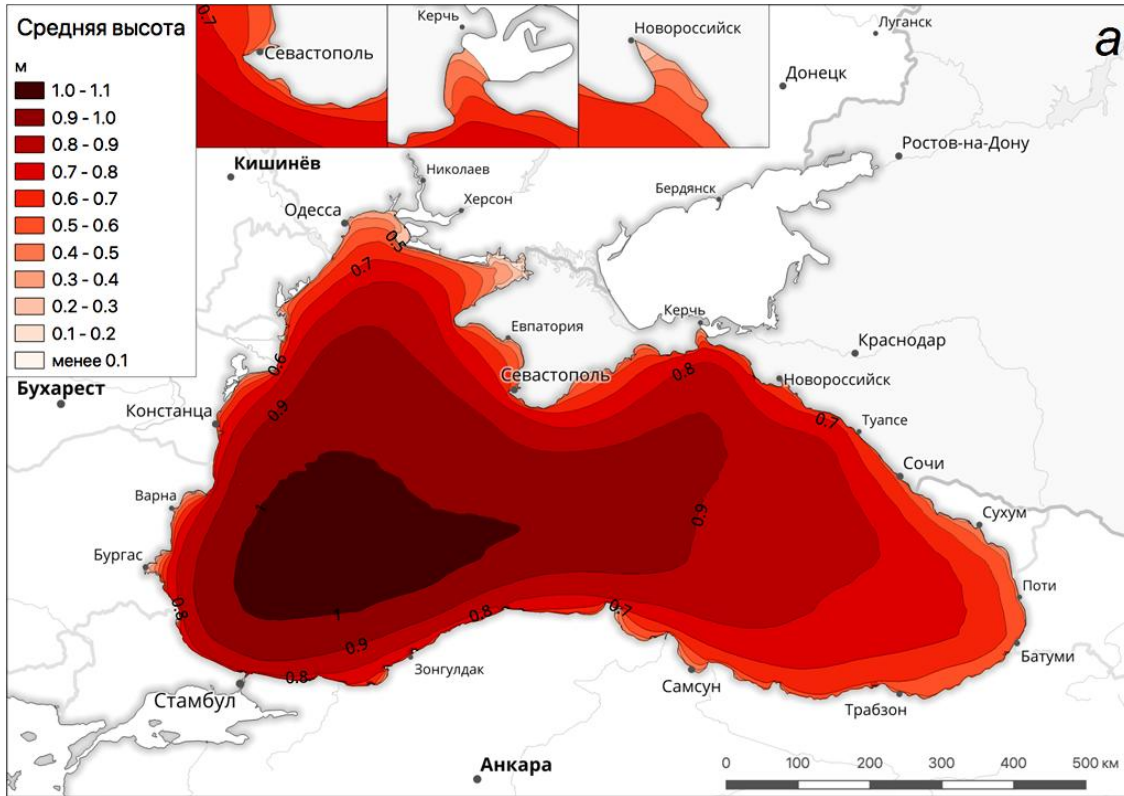
В подсистему хранения данных были загружены данные о скорости ветра, повторяемости ветра, характеристиках волн, а также значения доступной волновой и ветровой энергии для Черноморского региона. Поскольку все данные моделирования получены на фиксированной сетке географических местоположений, с целью оптимизации было произведено разделение информации на пространственную и непространственную составляющие. Пространственная составляющая представляет собой точечный слой PostGIS с уникальными идентификаторами и полем типа GEOGRAPHY, которые хранят географические координаты (широту и долготу) в системе координат, отнесенной к исходным геодезическим датам WGS-1984 (данная система задействована при генерации неструктурной сетки точек). Все расчетные данные, привязанные к точкам, организованы в виде одной отдельной таблицы, также включающей идентификаторы точек, что позволяет осуществлять соединение таблиц для картографической визуализации. На заключительном этапе выполнено преобразование загруженной в базу данных информации в растровые поверхности в проекции WebMercator для обеспечения их публикации на ГИС-сервере. Общегеографический блок базы данных был сформирован на основе открытых данных NaturalEarth масштаба 1:10 000 000 [30].

3.3. Проектирование стилей тематических карт

Перед созданием картографических сервисов необходимо выполнить проектирование стилей тематических карт, которые в дальнейшем загружаются на ГИС-сервер. На основе данных о характеристиках волнения, волновой и ветровой энергии с помощью выбранных ранее шкал в программном пакете QGIS были созданы прототипы картографических изображений. Примеры визуализации данных представлены на рис. 4–8. Базовые физические характеристики (высота, длина, период волны) отображены с последовательными однотонными шкалами. Карты средней энергии и обеспеченности составлены посредством более сложных многоцветных цветовых градиентов.

Среднегодовое значение высоты значительных волн меняется от 0,5 м до 1,0 м, максимальные значения наблюдаются в западной части Черного моря, в прибрежной зоне Южного берега Крыма и в районе м. Утриш (рис. 4). Средняя длина волн меняется от 10 м до 22 м, максимальные значения наблюдаются в центральной и южной части моря. Средний период меняется от 2,7 с в северо-западной части моря до 4 с в центральной и южной части моря. Среднегодовое распределение волновой энергии в Черном море приведено на рис. 5 (поток волновой энергии через 1 м волнового фронта). В западной части Черного моря наблюдаются значения $3 \div 4$ кВт/м, в восточной части – приблизительно в два раза меньше.





International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

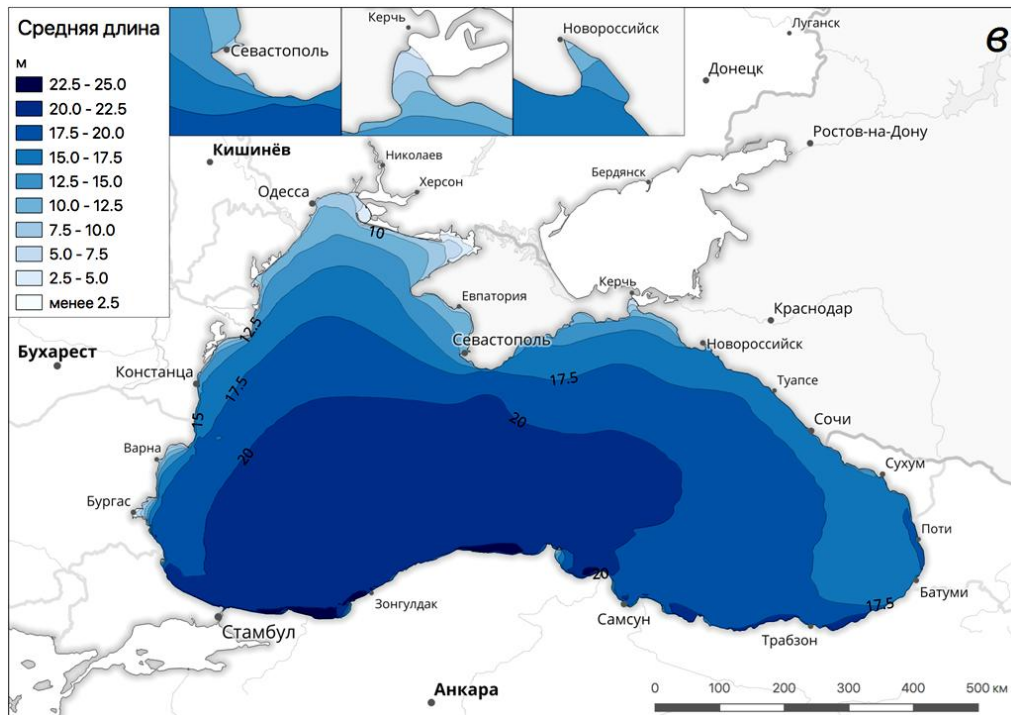


Рис. 4 – Карты распределения среднемноголетнего (за период 1979–2016 гг.) значения высоты значительных волн (а), среднего периода (б), средней длины волн (в) в Черном море

Fig. 4 – Distribution of mean long-term heights of significant waves (a), average period (б), average wavelength (в) in the Black Sea (averaging period 1979–2016)

Среднегодовая обеспеченность энергией более 1 кВт/м за весь период представлена на рис. 6. Видно, что только в 50 % случаев в западной части моря поток энергии превышает 1 кВт/м. В восточной час-

ти обеспеченность составляет около 20 ÷ 40 %. Эти карты позволяют оценить волновой энергетический потенциал конкретного участка побережья.

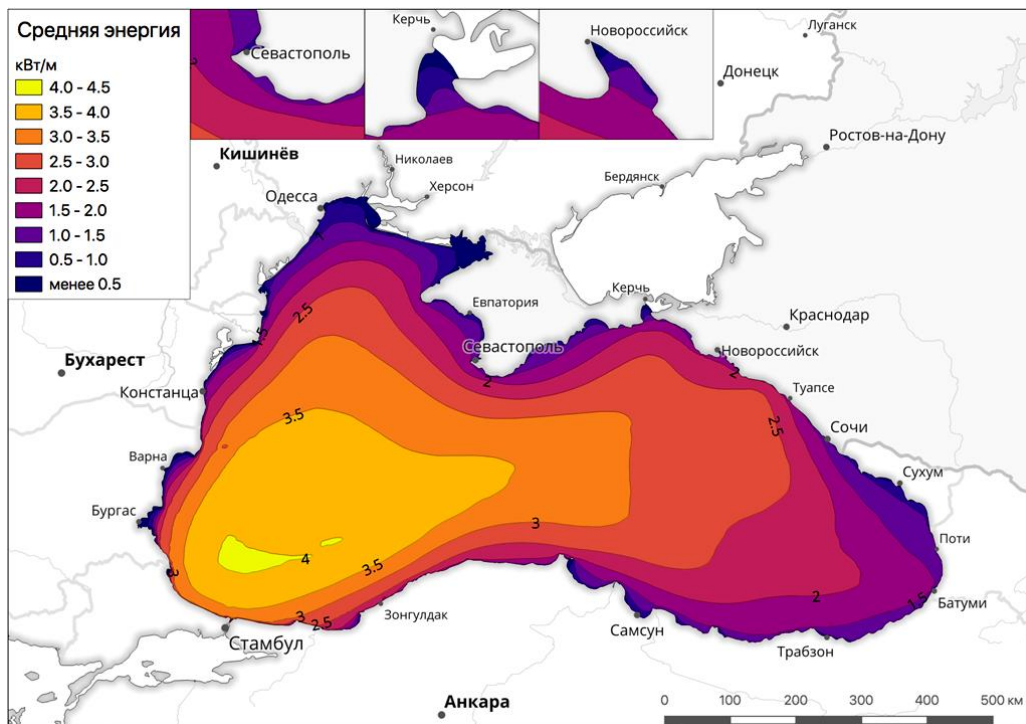


Рис. 5 – Карта распределения среднемноголетнего (за период 1979–2016 гг.) потока волновой энергии кВт/м в Черном море

Fig. 5 – Distribution of mean long-term heights of wave energy flux (kW/m) in the Black Sea (averaging period 1979–2016)

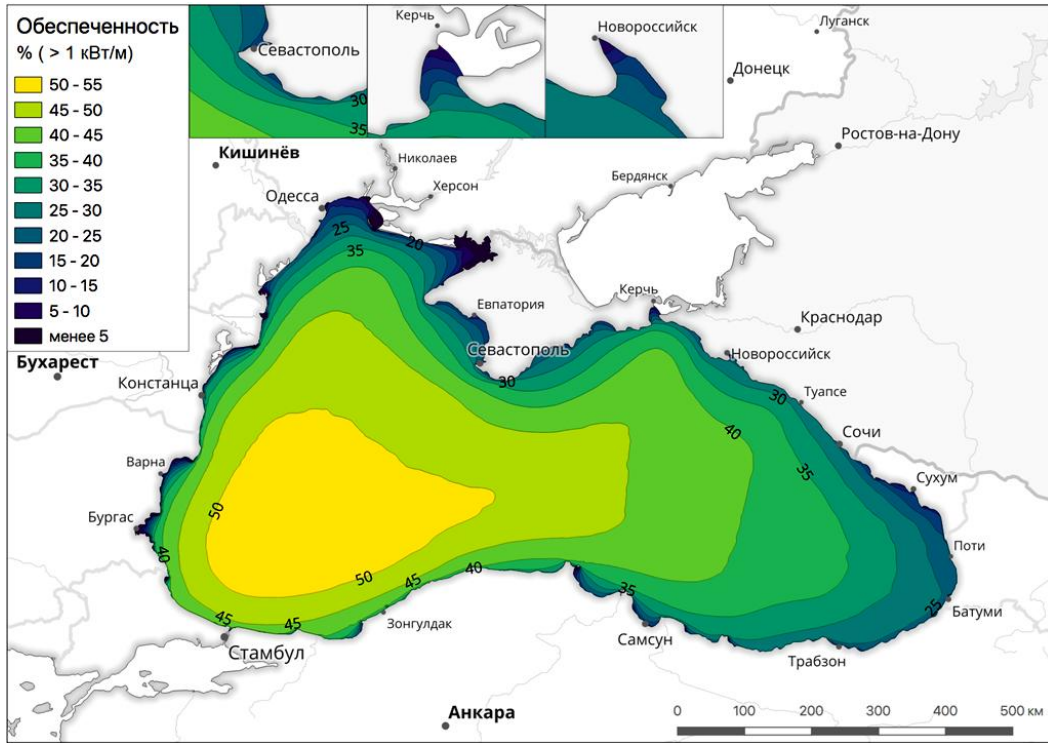


Рис. 6 – Карта обеспеченности волновой энергией >1кВт/м
 Fig. 6 – Wave energy supply map >1kW/m

Визуализация результатов расчетов ветроэнергетического потенциала в прибрежной зоне на основе реанализов скорости ветра на различных высотах

позволяет выделить районы, наиболее благоприятные для развития ветроэнергетики (рис. 7–8).

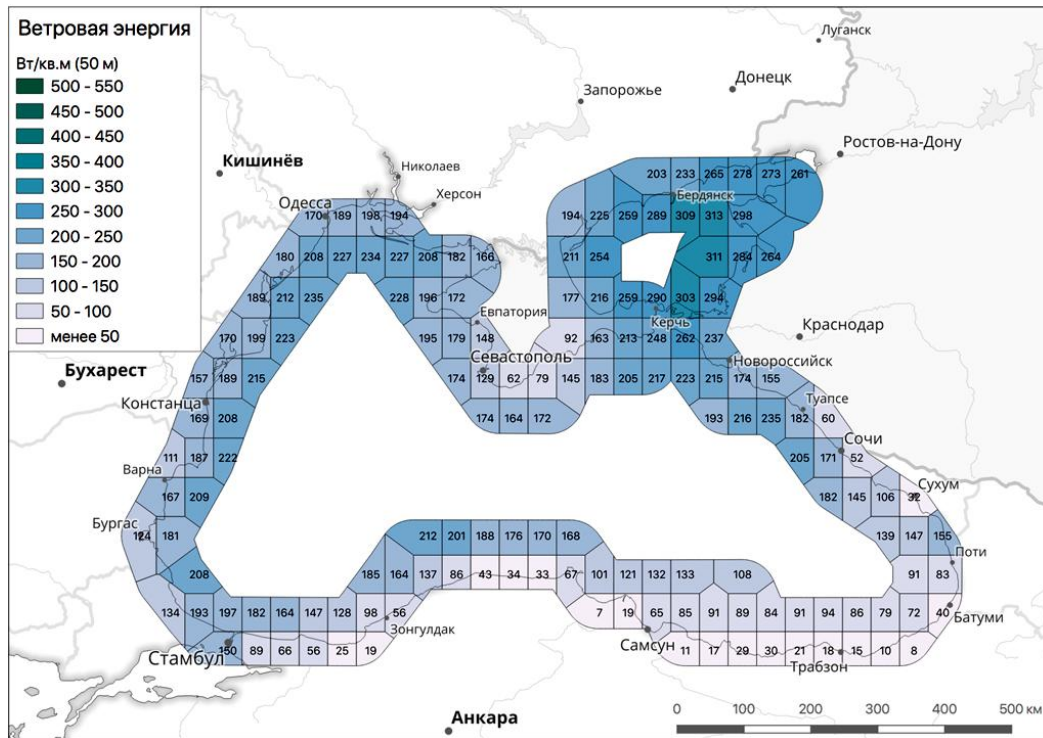


Рис. 7 – Энергия ветра на высоте 50 м
 Fig.7 – Wind power at a height of 50 m

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

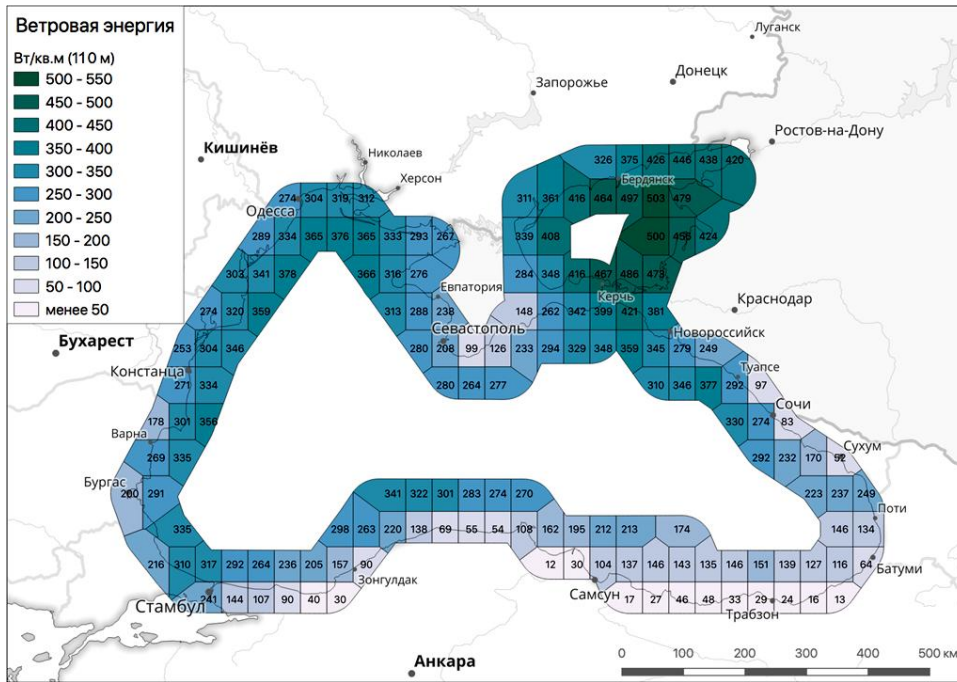


Рис. 8 – Энергия ветра на высоте 110 м
Fig. 8 – Wind power at a height of 110 m

К таким районам относится все побережье Азовского моря (ветроэнергетический потенциал составляет 300 Вт/м^2), участки черноморского побережья в районе Анапы и Одессы.

3.4. Публикация картографических сервисов и организация веб-интерфейса

Выполнены развертывание и настройка подсистемы анализа и публикации данных (ГИС-сервера) на базе ПО GeoServer. Осуществлена настройка подключения к хранилищу данных (PostgreSQL), вы-

полнена организация рабочей области, соответствующей данному источнику, опубликованы картографические сервисы на основе данных тематического и базового блока созданной базы пространственных данных. После этого произведена трансляция картографических стилей из настольного приложения QGIS в каталог ГИС-сервера через формат SLD, что позволило определить правила отображения картографических сервисов в соответствии с разработанными макетами.

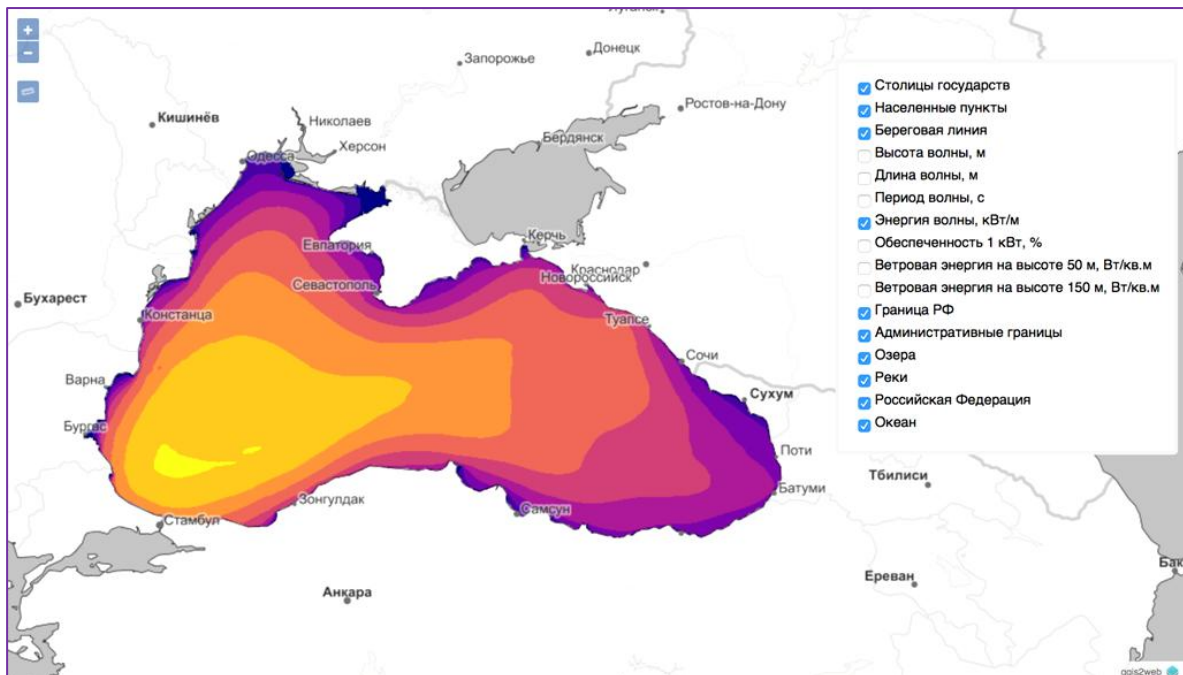


Рис. 9 – Прототип веб-приложения атласа. Доступные слои ГИС.
Fig. 9 – Web atlas application prototype. Available GIS layers.

На заключительном этапе была выполнена разработка прототипа веб-приложения атласа с привлечением библиотеки OpenLayers на языке JavaScript. В настоящий момент приложение включает возможность выбора интересующей карты и ее просмотра (см. рис. 9).

Дальнейшее развитие веб-приложения атласа будет направлено на интеграцию полного набора данных по прибрежным морям России, а также развитие функциональности взаимодействия с данными путем выполнения запросов и построения графиков.

4. Заключение

Веб-атлас доступной энергии волн и ветра прибрежной зоны морей России, результаты создания прототипа которого представлены в настоящей работе, базируется на классической трехзвенной (трехуровневой) модели, включающей подсистему хранения данных (сервер баз данных), подсистему анализа и публикации данных (непосредственно ГИС-сервер) и подсистему веб-приложений, обеспечивающую пользовательский интерфейс для взаимодействия с данными и картографическими сервисами (веб-сервер). Информационную основу атласа составляют данные о волновом и ветроэнергетическом потенциале. Технологическая схема подготовки исходных данных моделирования и реанализа для их автоматизированной загрузки в базу данных атласа и картографического отображения позволит дополнять атлас новыми данными.

На первом этапе реализации веб-атласа в базы данных были загружены данные о доступной ветровой и волновой энергии для прибрежной зоны Черного моря. При помощи веб-атласа визуализированы карты распределения среднесезонных параметров ветровых волн, а также карты распределения волновой и ветровой энергии. По данным картам можно осуществлять географический анализ распределения физических параметров, определяющих ресурсы ветровой и волновой энергии.

Дальнейшее развитие работ предполагает постепенное дополнение базы данных сведениями о волновой и ветровой энергии в прибрежной зоне других морей России. После тестирования и отладки данные веб-атласа будут размещены в открытом доступе в сети Интернет на странице проекта [31].

Благодарности

Исследование ресурсов волновой энергии в морях России выполнено Киселевой С.В., Умновым П.М. и Мысленковым С.А. при финансовой поддержке РФФИ, проект №16-08-00829. Работы по созданию веб-атласа выполнены Архипкиным В.С., Самсоновым Т.Е. и Шестаковой А.А. при финансовой поддержке Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» договор №20/2017/РГО-РФФИ (проект РФФИ № 17-05-41153).

Acknowledgments

Investigation of wave energy resources in the Russian seas is carried out by Kiseleva S., Umnov P., and S. Myslenkov. This work is supported by the Russian Foundation for Basic

Research (grant No. 16-08-00829). Web-atlas was developed by Arkhipkin V., Samsonov T., and Shestakova A. with the financial support of the All-Russian public organization "Russian Geographical Society", agreement №20/2017/RGS-RFBR ((grant RFBR No. 17-05-41153).

Список литературы

[1] Попель, О.С. Возобновляемая энергетика в современном мире: учебное пособие / О.С. Попель, В.Е. Фортов – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 450 с.

[2] Горлов А.А. Научная и экспериментальная инфраструктура развития морских ВИЭ [Текст] / А.А. Горлов // Энергия: экономика, техника, экология. – 2017. – № 4. – С. 21–31.

[3] Минин, В.А. Перспективы освоения нетрадиционных и возобновляемых источников энергии на Кольском полуострове / В.А. Минин, Г.С. Дмитриев. – Мурманск, 2007. – С. 58–67.

[4] Мысленков С.А. Сезонная и межгодовая изменчивость потока волновой энергии в Баренцевом море [Текст] / С.А. Мысленков // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEЕ). – 2017. – № 19–21. – С. 36–48.

[5] Борисенко М.М. Атласы ветрового и солнечного климатов России / М.М. Борисенко, В.В. Стадник. – СПб: Изд-во ГГО им. А.И.Воейкова, 1997.

[6] Атлас ветров России / А.Н.Старков [и др.] – М.: Можайск-Терра, 2000. – 551 с.

[7] Николаев В.Г. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. / В.Г. Николаев, С.В. Ганага, Ю.И. Кудряшов – М.: Атмограф», 2008. – 596 с.

[8] Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России / О.С. Попель [и др.] – М.: Изд-во МФТИ, 2010. – 83 с.

[9] Игнатьев С.Г. Анализ современной методологии определения энергетических характеристик ветра [Текст] / С.Г. Игнатьев // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEЕ). – 2013. – № 12. – С. 22–34.

[10] Overview of European Innovation Activities in Marine Energy Technology. – Joint Research Centre Scientific and Policy Reports. – 2013. – Report EUR 26342 EN.

[11] Progress in Renewable Energies Offshore: Proceedings of the 2nd International Conference on Renewable Energies Offshore (RENEW2016), Lisbon, Portugal, 24–26 October 2016.– CRC Press Book.

[12] Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России: научное издание / Т.И. Андреев [и др.] – М.: РХТУ им. Д.И.Менделеева, 2015. – 160 с.

[13] Arctic Renewable Energy Atlas. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rcinet.ca/eye-on-the-arctic/2016/06/08/focus-on-green-energy-in-the-arctic>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 24.04.18).

[14] Booij, N. A third generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation / N. Booij, R.C. Ris, L.H. Holthuijsen // Journal of Geophys-



ical Research: Oceans. – 1999. – Vol. 104. – No. C4. – P. 7649–7666.

[15] Gippius, F. Wave climate of the black sea's coastal waters during the last three decades / F. Gippius [et al.] // Managing risks to coastal regions and communities in a changing world. EMECS'11 – Seacoasts XXVI. Proceedings of International Conference. St. Petersburg, 2016. – P. 395–402.

[16] Myslenkov, S. Comparing wave heights simulated in the Black Sea by the swan model with satellite data and direct wave measurements / S. Myslenkov, A. Chernyshova // Russian Journal of Earth Sciences. – 2016. – Vol. 16. – No. 5. – P. 1–12.

[17] Мысленков С.А. Система прогноза ветрового волнения в Черном море с детализацией в шельфовых зонах [Текст] / С.А. Мысленков, Е.В. Столярова, В.С. Архипкин // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2017. – № 44. – С. 126–135.

[18] Мысленков С.А. Прогноз ветрового волнения в Черном море с использованием прогностических полей ветра различного пространственного разрешения [Текст] / С.А. Мысленков, Е.В. Столярова // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2016. – № 362. – С. 55–65.

[19] Архипкин В.С. Оценка потенциала волновой энергии прибрежной акватории полуострова Крым [Текст] / В.С. Архипкин [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2015. – № 20. – С. 25–35.

[20] Киселева С.В. Оценка ветроэнергетического потенциала черноморского побережья Кавказа с использованием реанализа CFPSR [Текст] / С.В. Киселева [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2016. – № 15–18. – С. 75–85.

[21] Lee, S. Scattered Data Interpolation with Multi-level B-Splines / S. Lee, G. Wolberg, S.Y. Shin // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 1997. – Vol. 3. – No. 3. – P. 228–244.

[22] Котельников В. А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи [Текст] / В.А. Котельников // Успехи физических наук. – 2006. – № 7. – С. 762–770.

[23] Препарата Ф. Вычислительная геометрия: Введение / Ф. Препарата, М. Шеймос – М.: Мир, 1989. – С. 295.

[24] Open Geospatial Consortium (OGS). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.opengeospatial.org/standards/sld>. – (Дата обращения: 22.04.18).

[25] Harrower M.A., Brewer C.A. ColorBrewer.org: An Online Tool for Selecting Color Schemes for Maps / M.A. Harrower, C.A. Brewer // The Cartographic Journal. – 2003. – Vol. 40. – No. 1. – P. 27–37.

[26] PostgreSQL. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.postgresql.org/>. – (Дата обращения: 18.04.18).

[27] Haerder, T. Principles of transaction-oriented database recovery / T. Haerder, A. Reuter // ACM Computing Surveys. – 1983. – Vol. 15. – No. 4. – P. 287; doi:10.1145/289.291.

[28] GeoServer. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://geoserver.org>. – (Дата обращения 15.04.18).

[29] OpenLayers. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://openlayers.org>. – (Дата обращения: 22.04.18).

[30] NaturalEarth [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.naturalearthdata.com>. – (Дата обращения: 25.04.18).

[31] Web-atlas of wind and wave available energy in the coastal zones of the Russian Seas [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net/project/Web-atlas-of-wind-and-wave-available-energy-in-the-coastal-zones-of-the-Russian-Seas>

References

[1] Popel O.S., Fortov V.E. Renewable energy in the modern world: a tutorial (Vozobnovlyаемая ehnergetika v sovremennom mire: uchebnoe posobie). Moscow: Publishing house MEI, 2015, 450 p. (in Russ.).

[2] Gorlov A.A. Scientific and experimental infrastructure for development of marine renewable energy (Nauchnaya i eksperimental'naya infrastruktura razvitiya morskikh VIE). *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, 2017;(4)21–31 (in Russ.).

[3] Minin V. A. Prospects for development of non-traditional and renewable energy sources on the Kola Peninsula (Perspektivy osvoeniya netraditsionnykh i vozobnovlyаемykh istochnikov ehnergii na Kol'skom poluostrove). Murmansk, 2007, pp. 58–67 (in Russ.).

[4] Myslenkov S.A., Stolyarova E.V., Markina M.Yu., Kiseleva S.V., Arkhipkin V.S., Gorlov A.A., Umnov P.M. Seasonal and interannual variability of the wave energy flux in the Barents Sea (Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' potoka volnovoj ehnergii v Barentsevom more). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2017;19–21:36–48 (in Russ.).

[5] Borisenko M.M., Stadnik V.V. Atlases of wind and solar climates in Russia (Atlasy vetrovogo i solnechnogo klimatov Rossii). SPb.: Izd-vo GGO named after AI Voeikov, 1997 (in Russ.).

[6] The Atlas of the Winds of Russia (Atlas vetrov Rossii) / A.N. Starkov, L.Landberg, P.P. Bezrukhikh, M.M. Borisenko; Ministry of Fuel and Energy of Russia, National Lab. Riso (Denmark). Ros.-Dat. Institute of Energy Efficiency. Moscow: Mozhaisk-Terra, 2000, 551 p. (in Russ.).

[7] Nikolaev V.G., Ganaga S.V., Kudryashov Yu.I. National cadastre of wind power resources of Russia and



methodical bases of their definition (Nacional'nyj kadastr vetroehnergeticheskikh resursov Rossii I metodicheskie osnovy ih opredeleniya). Moscow: "Atmograph" Publ., 2008. 596 p. (in Russ.).

[8] Popel O.S., Frid S.E., Kolomiets Yu.G., Kiseleva S.V., Terekhova E.N. Atlas of solar energy resources in Russia (Atlas resursov solnechnoj ehnergii na territorii Rossii). Moscow: Publishing House of MIPT, 2010, 83 p. (in Russ.).

[9] Ignatiev S.G. Analysis of the modern methodology for determining the energy characteristics of wind (Analiz sovremennoj metodologi i opredeleniya ehnergeticheskikh harakteristik vetra). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2013;12:22–34 (in Russ.).

[10] Overview of European Innovation Activities in Marine Energy Technology. Joint Research Centre Scientific and Policy Reports, 2013), Report EUR 26342 EN.

[11] Progress in Renewable Energies Offshore: Proceedings of the 2nd International Conference on Renewable Energies Offshore (RENEW2016), Lisbon, Portugal, 24–26 October 2016. CRC Press Book.

[12] Atlas of Renewable Energy Resources on the Territory and Russia: scientific edition (Atlas resursov vozobnovlyaemoy ehnergii na territorii Rossii: nauchnoe izdanie): Andreenko T.I., Gabderakhmanova T.S., Danilova O.V. [et al.]. RCTU D. I. Mendeleev. Moscow, 2015, 160 p. (in Russ.).

[13] Project site Arctic Renewable Energy Atlas [E-resource]. Available on: <http://www.rcinet.ca/eye-on-the-arctic/2016/06/08/focus-on-green-energy-in-the-arctic/> (04.24.18.).

[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: Oceans*, 1999;104(C4):7649–7666.

[15] Gippius F., Myslenkov S., Stoliarova E., Arkhipkin V. Wave climate of the black sea's coastal waters during the last three decades. In: Managing risks to coastal regions and communities in a changing world. EMECS'11 – Seacoasts XXVI. *Proceedings of International Conference*. St. Petersburg, 2016, pp. 395–402.

[16] Myslenkov S., Chernyshova A. Comparing wave heights simulated in the Black Sea by the swan model with satellite data and direct wave measurements. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2016;16(5):1–12.

[17] Myslenkov S.A., Stolyarova E.V., Arkhipkin V.S. Wind wave forecasting system in the Black Sea with details in the shelf zones (Sistema prognozavetrovogovolneniya v Chernom more s detalizaciej v shel'fovyh zonah). *Results of testing new and improved technologies, models and methods of hydrometeorological forecasts*, 2017;44: 126–135 (in Russ.).

[18] Myslenkov S.A., Stolyarova E.V. Forecast of wind waves in the Black Sea using predictive wind fields of different spatial resolution (Prognoz vetrovogo

volneniya v Chernom more s ispol'zovaniem prognosticheskikh polej vetra razlichnogo prostranstvennogo razresheniya). *Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*, 2016;362:55–65 (in Russ.).

[19] Arkhipkin V.S., Vaskov A.G., Kiseleva S.V., Myslenkov S.A., Temeyev S.A. Temeyev A.A., Umnov P.M. Estimation of the wave energy potential of the coastal water area of the Crimea peninsula (Ocenka potentsiala volnovej ehnergii pribrezhnoj akvatorii poluostrova Krym). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2015;20:25–35 (in Russ.).

[20] Kiseleva S.V., Shestakova A.A., Toropov P.A., Myslenkov S.A. Assessment of the wind energy potential of the Black Sea coast of the Caucasus using the CFSR reanalysis (Ocenka vetroehnergeticheskogo potentsiala chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza s ispol'zovaniem reanaliza CFSR). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2016;15–18:75–85 (in Russ.).

[21] Lee S., Wolberg G., Shin S.Y. Scattered Data Interpolation with Multilevel B-Splines. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1997;3(3):228–244

[22] Kotelnikov V.A. On the capacity of "ether" and wire in telecommunications (O propusknnoj sposobnosti «ehfira» I provoloki v ehlektrosvyazi). *Uspekhi Fizicheskikh Nauk: Zhurnal*, 2006;7:762–770 (in Russ.).

[23] Preparata F., Sheimos M. Computational geometry: Introduction (Vychislitel'nayageometriya: Vvedenie). Moscow: Mir Publ., 1989, p. 295 (in Russ.).

[24] Web site Open Geospatial Consortium (OGS) [E-resource]. Available on: <http://www.opengeospatial.org/standards/sld> (04.22.18).

[25] Harrower M.A., Brewer C.A., 2003, ColorBrewer.org: An Online Tool for Selecting Color Schemes for Maps. *The Cartographic Journal*, 2003;40(1):27–37.

[26] Web site PostgreSQL [E-resource]. Available on: <https://www.postgresql.org/> (04.18.18.).

[27] Haerder, T.; Reuter, A. (1983). Principles of transaction-oriented database recovery. *ACM Computing Surveys*, 1983;15(4):287; doi:10.1145/289.291.

[28] Web site GeoServer [E-resource]. Available on: <http://geoserver.org> (04.15.18.).

[29] Web site OpenLayers [E-resource]. Available on: <http://openlayers.org> (04.22.18.).

[30] Web site NaturalEarth [E-resource]. Available on: <http://www.naturalearthdata.com> (04.25.18.).

[31] Web-atlas of wind and wave available energy in the coastal zones of the Russian Seas [E-resource]. Available on: <https://www.researchgate.net/project/Web-atlas-of-wind-and-wave-available-energy-in-the-coastal-zones-of-the-Russian-Seas>

Транслитерация по BSI

