

УДК 551.555

С.Б. Крашенинникова¹, М.А. Крашенинникова²

ОЦЕНКА ИЗМЕНЧИВОСТИ СКОРОСТИ ВЕТРА В ПРИЧЕРНОМОРСКОМ РЕГИОНЕ РОССИИ НА ОСНОВЕ ВЫБРАННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОЕКТА CMIP5

На основе сравнительного анализа с данными на метеостанциях выявлены три модели *GFDL-CM3*, *IPSL-CM5B-LR* и *MPI-ESM-MR* проекта *CMIP5*, которые лучше всего воспроизводят внутригодовые и межгодовые характеристики, а также долговременные тенденции изменения скорости ветра в причерноморском регионе России. Выбранные модели хорошо воспроизводят средние значения скорости ветра (3–5 м/с) и ее внутригодовой цикл, свойственный для этого региона – с максимумом зимой (5±0,5 м/с) и минимумом летом (3±0,5 м/с). По данным модели *GFDL-CM3* показано снижение скорости ветра к середине XXI века (2046–2055 гг.) на 3–5% по сравнению с периодом 2006–2015 гг., которое составило <0,3 м/с.

Ключевые слова: прогноз, Черное море, метеостанции п-ва Крым, внутригодовые характеристики, межгодовые характеристики, долговременные тренды, скорость ветра

Введение. Причерноморская область России является одним из наиболее перспективных регионов для курортно-рекреационного использования. Здесь развиваются промышленность и сельское хозяйство. В прибрежной зоне Черного моря расположены крупные торговые, пассажирские и рыбные порты, туристические базы и пляжи, поэтому оценка ветровой обстановки и ее долгосрочное прогнозирование необходимы для обеспечения стабильного функционирования перечисленных объектов. Сезонная изменчивость приводного ветра является основной причиной формирования годового хода общей циклонической циркуляции в Черном море, также ветер является определяющим фактором ее осредненной циркуляции. Это подтверждает актуальность дальнейших исследований ветровых характеристик в внутригодовом и межгодовом приближении.

Исследованию региональных изменений параметров ветра посвящены многие работы, в частности, по Черноморскому региону России [Воскресенская с соавт., 2016; Гидрометеорология и гидрохимия, 1991; Гнатюк с соавт., 2015; Костяной с соавт., 2014; Иванов с соавт., 2011; Репетин с соавт., 2008; и др.], также существуют региональные проекции климата в рамках проекта *CORDEX* [Jacob et al., 2014; Öno et al., 2014] и 5-й Оценочный доклад МГЭИК об изменениях климата [Intergovernmental ..., 2014]. В данных публикациях упоминается, что уменьшение скорости ветра наблюдается со второй половины XX века. Среднегодовые и среднемесячные ее значения, по данным гидрометеорологических станций южного побережья России за десятилетие 1971–1980 гг., снизились по сравнению с 1936–1965 гг. [Гидрометеорология и гидрохимия, 1991]. Похожая тенденция отмечена для северо-восточной части Черного моря в работе Иванова с соавторами [2011]. Линейные тренды скорости ветра на метеостанциях г. Симферополя, г. Евпатории, г. Керчь, г. Фео-

досия за период 1950–2015 гг. также отрицательны [Воскресенская с соавт., 2016]. Понижение скорости ветра отмечается во все сезоны [Репетин с соавт., 2008]. В период с 1979–2011 гг. тренд скорости ветра над всей акваторией Черного моря оказался положительным вследствие усиления ветра в 1995–2005 гг. и составил 0,02 м/с в год [Костяной с соавт., 2014].

Численное моделирование является одним из основных инструментов для изучения изменения климата и климатообразующих факторов [Ефимов с соавт., 2011; Moss et al., 2010; Taylor et al., 2012 и др.]. К настоящему времени в рамках проекта *CMIP5* разработаны различные глобальные климатические модели. С их помощью воспроизведены изменения климата планеты в XX и XXI столетиях с учетом различных вариантов антропогенной нагрузки на окружающую среду [Moss et al., 2010; Taylor et al., 2012]. Они используются для прогнозирования изменений глобального климата планеты. Таким образом, численное моделирование позволяет рассчитывать многие гидрометеорологические параметры: направление и скорость ветра, температуру воздуха, давление и др.

Имеются также региональные модели *HadRM3P (PRECIS)*, *INMCM4*, *RegCM4*, для которых в качестве входных данных используются результаты глобального моделирования [Ефимов с соавт., 2011, 2015]. Входные данные с низким пространственным разрешением являются граничными условиями на боковых границах расчетного домена. Для внутренней части домена интегрирование производится с повышенным пространственным разрешением, которое позволяет учесть региональные особенности подстилающей поверхности и очертания береговой линии. В отличие от глобальных моделей, в региональных можно исследовать локальные особенности мезомасштабной атмосферной циркуляции [Ефимов с соавт., 2011]. С другой сторо-

¹ Институт морских биологических исследований РАН, им. А.О. Ковалевского отдел функционирования морских экосистем, ст. науч. с., канд. геогр. н.; svetlanabk@mail.ru

² Институт природно-технических систем, лаборатория крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы и изменений климата, мл. науч. с.; krmag61@mail.ru

ны, сравнение таких моделей с различным приближением хорошо подходит для описания долговременных климатических изменений [Ефимов с соавт., 2015], а также составления прогнозов. При анализе данных модельных расчетов, предоставляемых международными центрами для конкретных регионов, важно знать качество получаемых прогнозов.

Для анализа и прогноза ветроэнергетического потенциала акватории Черного моря и прибрежной зоны России используются специализированные климатические характеристики ветра. Они подразделяются на 3 группы [Гарцман, 1990, Гнатюк с соавт., 2015]: 1 – оценка особенностей ветрового режима (средние многолетние скорости, СКО); 2 – оценка характеристик, предназначенных для установления оптимального соотношения между мощностью ветрового потока и мощностью ветроэнергетической установки (средние многолетние значения повторяемости ветров по величинам); 3 – оценка неблагоприятного ветрового режима для использования энергетических ресурсов (экстремальные значения скорости ветра). В настоящей работе будет рассмотрена возможность использования данных глобальных численных моделей проекта *CMIP5* для оценки специализированных климатических характеристик ветра первой группы.

Нами выполнен сравнительный анализ оценок скорости ветра, полученных на метеостанциях и по данным выбранных моделей проекта *CMIP5*. Исследование изменений ветровых характеристик в Причерноморском регионе России на внутригодовых и межгодовых масштабах позволило сделать приблизительный прогноз ветровых условий на ближайшие 50 лет.

Материалы и методы исследования. В работе сравнивались результаты расчетов среднегодовой скорости ветра на высоте 10 м по данным глобальных климатических моделей проекта *CMIP5* (*MPI-ESM-LR*, *MPI-ESM-MR*, *HadGEM2-AO*, *IPSL-CM5A-LR*, *IPSL-CM5B-LR*, *INMCM4*, *GFDL-CM3* и др.) [Taylor et al., 2012], имеющих пространственное разрешение от 1,8° до 3,75°, и данным метеостанций (<http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=temp&layers=1>) г. Евпатории, г. Керчь. Для сравнения были выбраны именно эти метеостанции по причине наличия наиболее длинных и непрерывных данных наблюдений. Кроме того, метеостанции г. Евпатория и г. Керчь расположены ближе к узлам сеток моделей проекта *CMIP5*. В настоящей работе использовался метод «ближайшего соседа»; при этом данные на метеостанциях считались эталонными. Интерполяция данных моделей *CMIP5* в узлы более мелкой сетки не проводилась, чтобы не вносить дополнительную методическую погрешность. Сравнение данных скорости ветра моделей проекта *CMIP5* с данными наблюдений на ближайших метеостанциях проводилось для периода с 1950 г. (или 1955 г., в зависимости от имеющихся данных на метеостанциях) до 2005 года. По полученным рядам среднегодовой скорости ветра были рассчитаны линейные

тренды за период 1950–2005 гг., значимость которых оценивалась по *t*-критерию Стьюдента. Среднегодовые значения скорости ветра (V_{cp}) и их среднеквадратичные отклонения (СКО) за период с 1950 г. (1955 г.) по 2005 гг. рассчитывались по данным метеостанций и историческому массиву данных моделей проекта *CMIP5*.

Для исследования внутригодовой и межгодовой изменчивости скорости ветра использовались данные моделей проекта *CMIP5* за 2006–2055 г. со сценарием умеренных антропогенных выбросов парниковых газов RCP 4.5 [Moss et al., 2010].

На рис. 1 отображены узлы сетки данных для выбранных моделей проекта *CMIP5* в Причерноморском регионе России. Для получения устойчивых значений средней скорости ветра по месяцам, с учетом выделенных квазидесятилетних колебаний в изменчивости скорости ветра в рассматриваемом регионе [Жуков с соавт., 2012], а также в соответствии с рекомендациями ГГО им. А.И. Воейкова [Тупикин с соавт., 1998], анализировались 10-летние периоды 2006–2015 гг. и 2046–2055 гг. Характеристики скорости ветра рассчитывались отдельно для каждой модели.

Для построения карт пространственного распределения скорости ветра по сезонам осреднялись данные по зимним (декабрь–февраль), весенним (март–май), летним (июнь–август), осенним (сентябрь–ноябрь) месяцам для периодов 2006–2015 гг. и 2046–2055 гг. В работе также построены карты распределения характеристик разности скорости ветра между этими периодами для разных сезонов и в среднем за год.

Для анализа возможности применения данных моделей *CMIP5* была проведена работа по выявлению наиболее правильного воспроизведения скорости ветра этими инструментами. По данным моделей *GFDL-CM3*, *IPSL-CM5B-LR*, *MPI-ESM-MR*, *INMCM4*, *IPSL-CM5A-LR*, *MPI-ESM-LR* и *HadGEM2-AO* проекта *CMIP5* и метеостанций в г. Евпатория (запад) за 1950–2005 гг. получены среднеегодовые значения скорости ветра (V_{cp}) (табл.): $5,1 \pm 0,2$;

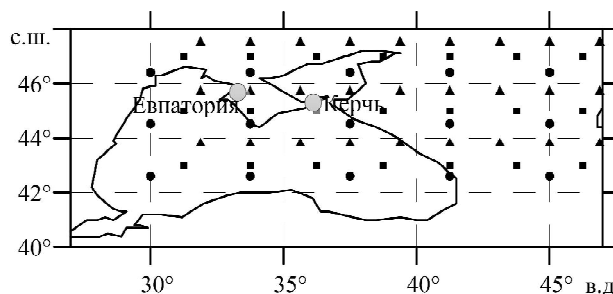


Рис. 1. Карта расположений узлов сетки данных для выбранных моделей проекта *CMIP5* (точки: квадраты – *GFDL-CM3*, круги – *IPSL-CM5B-LR*, треугольники – *MPI-ESM-MR*) и метеостанций в Причерноморском регионе России

Fig. 1. Map of the locations of data grid nodes for selected *CMIP5* project models (points: squares – *GFDL-CM3*, circles – *IPSL-CM5B-LR*, triangles – *MPI-ESM-MR*) and weather stations in the Black Sea region of Russia

Средние значения скорости ветра ($V_{\text{ср}}$) и их среднеквадратические отклонения (СКО) и коэффициентов линейных трендов (А) на метеостанциях п-ва Крым и моделей проекта CMIP5

№	Название моделей и метеостанций	$V_{\text{ср}}$, м/с	СКО	А	$V_{\text{ср}}$, м/с	СКО	А
		Запад			Восток		
1	<i>MPI-ESM-LR</i>	4,64	0,19	+0,005	4,71	0,21	+0,004
2	<i>MPI-ESM-MR</i>	4,77	0,16	−0,0001	4,62	0,17	−0,001
3	<i>HadGEM2-AO</i>	5,38	0,23	0	5,07	0,23	+0,0001
4	<i>IPSL-CM5A-LR</i>	4,83	0,21	+0,003	4,48	0,18	+0,003
5	<i>IPSL-CM5B-LR</i>	4,84	0,18	−0,001	4,42	0,19	−0,001
6	<i>INMCM4</i>	5,64	0,27	+0,001	5,81	0,25	+0,001
7	<i>GFDL-CM3</i>	5,11	0,21	−0,002	4,69	0,18	−0,002
8	Евпатория	4,45	0,55	−0,025	—	—	—
9	Керчь	—	—	—	4,77	0,42	−0,016

4,8±0,2; 4,8±0,2; 5,6±0,3; 4,8±0,2; 4,6±0,2; 5,4±0,2 и 4,2±0,4; 4,5±0,6 м/с, соответственно; в г. Керчь (восток) за 1955–2005 гг.: 4,7±0,2; 4,4±0,2; 4,6±0,2; 5,8±0,3; 4,5±0,2; 4,7±0,2; 5,1±0,2 и 4,8±0,4 м/с, соответственно. Средние значения скорости ветра на этих метеостанциях и их среднеквадратические отклонения, отражающие величину межгодовой изменчивости, хорошо совпадают с оценками, полученными по данным моделей *GFDL-CM3*, *IPSL-CM5B-LR*, *MPI-ESM-MR*, *IPSL-CM5A-LR* и *MPI-ESM-LR* проекта CMIP5, а также с результатами публикаций по теме [Ефимов с соавт., 2011; Иванов с соавт., 2011; Жуков с соавт., 2012; и др.]. Вместе с тем, оценки средней скорости ветра, представленные в публикации А.В. Кара [2005] по спутниковым данным, несколько занижены по сравнению с оценками, полученными в настоящей работе и по данным ре-анализов Иванова с соавторами [2011]. Сравнение результатов расчета $V_{\text{ср}}$ на метеостанциях с модельными расчетами проекта CMIP5 показало, что модели *INMCM4* и *HadGEM2-AO* не подходят для климатических исследований в выбранном районе, так как их значения завышены.

Коэффициенты линейных трендов скорости ветра на метеостанциях г. Евпатории и г. Керчь за период 1950 (1955)–2005 гг. имеют отрицательный знак (табл.). Величины коэффициентов линейных трендов равны −0,021 и −0,016, соответственно. Это согласуется с опубликованными данными [Репетин с соавт., 2008; Ефимов с соавт., 2015]. Коэффициенты линейных трендов, полученные по данным расчетов моделей *GFDL-CM3*, *IPSL-CM5B-LR*, *MPI-ESM-MR*, *INMCM4*, *IPSL-CM5A-LR*, *MPI-ESM-LR* и *HadGEM2-AO* (табл.) равны −0,002 (−0,002); −0,0001 (−0,001); −0,0001 (−0,001); +0,001 (+0,001); +0,003 (+0,003); +0,005 (+0,004); +0,0001 (+0,0001), соответственно для запада (востока). То есть только первые три модели правильно воспроизводят отрицательный знак долговременной тенденции ветра. Поскольку ветер – не сильно изменяющийся параметр, а данные, по которым определялись долговременные тренды, охватывают достаточно большой промежуток времени, и выделенные тенденции значимы на 95% доверительном уровне, то полученным результатам можно верить.

На рис. 2 представлены межгодовые характеристики скорости приповерхностного ветра, получен-

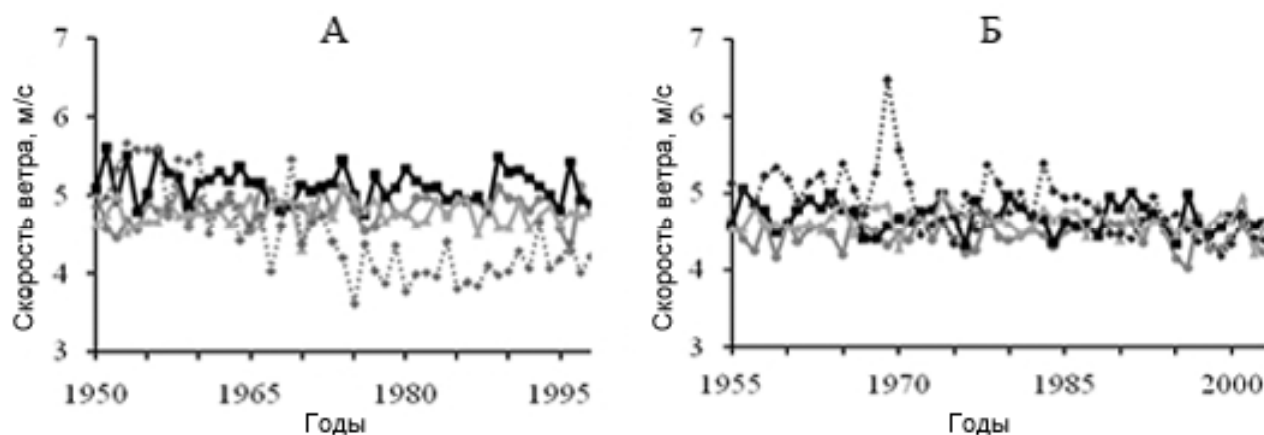


Рис 2. Межгодовая изменчивость скорости ветра (м/с) по данным на метеостанциях (точки: ромбы): г. Евпатория (А), г. Керчь (Б) и моделей проекта CMIP5 (точки: квадраты – *GFDL-CM3*, круги – *IPSL-CM5B-LR*, треугольники – *MPI-ESM-MR*)

Fig. 2. Interannual variability of wind speed (m/s) according to data at weather stations (points: diamonds): Evpatoria (A), Kerch (B) and CMIP5 project models (points: squares – *GFDL-CM3*, circles – *IPSL-CM5B-LR*, triangles – *MPI-ESM-MR*)

ные по данным метеостанций и модельных расчетов проекта *CMIP5*. Данные модели лучше всего воспроизводят характеристику скорости ветра на станции г. Керчь, при этом на станции г. Евпатории совпадение в различной степени наблюдается до 1970 года.

Таким образом, на основании сравнения данных на метеостанциях с данными расчетов глобальных моделей были выбраны три модели *GFDL-CM3*, *IPSL-CM5B-LR* и *MPI-ESM-MR*, которые могут быть использованы для анализа климатических изменений скорости ветра в исследуемом регионе.

Оценки средних скоростей ветра по месяцам за период (2006–2015 гг.) (рис. 3А) и их стандартные отклонения, характеризующие величину межгодовой изменчивости скорости ветра, хорошо показывают реальные значения скорости ветра, свойственные Причерноморскому региону России [Гидрометеорология и гидрохимия, 1991; Иванов с соавт., 2011; Репетин с соавт., 2008]. Также выбранные модели хорошо воспроизводят сезонный цикл скорости ветра с максимумом ($5,0 \pm 0,5$ м/с) в холодный и минимумом ($3,0 \pm 0,5$ м/с) в теплый период. Эти результаты также согласуются с известными оценками [Ефимов с соавт., 2002, 2011; Жуков, 2012; и др.]. Анализ результатов модели *GFDL-CM3* за период 2046–2055 гг. (рис. 3Б) показывает уменьшение скорости ветра в середине XXI в. на 3–5% по сравнению с периодом 2006–2015 гг. На (рис. 3В) представлена разница между полученными внутригодовыми циклами характеристик ветра для периодов 2006–2015 гг. и 2046–2055 гг. Установлено, что при анализе разных месяцев это расхождение может быть как отрицательным (зимой-весной она достигает $-0,2$ м/с), так и положительным (до $0,4$ м/с за летне-осенний период). При этом по всем моделям в среднем за год наблюдается тенденция к уменьшению скорости ветра на $<0,3$ м/с через 50 лет.

Крупномасштабные особенности (свыше 100 км) пространственного распределения скорости ветра по данным модели *GFDL-CM3* для разных сезонов периода 2006–2015 гг., хорошо согласуются с выводами публикаций [Гидрометеорология и гидрохимия, 1991; Иванов с соавт., 2011; Ефимов с соавт., 2002, 2011]. К ним относится наличие антициклонической завихренности на северном побережье Азовского моря. Однако, мезомасштабные структуры (несколько десятков км в диаметре), связанные с орографией и краевыми эффектами вблизи берега [Ефимов с соавт., 2011], по данным модели *GFDL-CM3* не выделяются.

На рис. 4 представлены карты пространственного распределения разности скорости ветра (м/с) между периодами 2006–2015 гг. и 2046–2055 гг. для разных сезонов и в среднем за год, полученные по данным модели *GFDL-CM3* в рамках проекта *CMIP5*. Зимой над рассматриваемым участком Причерноморского региона России наблюдаются положительные разности полей $<0,3$ м/с. Аналогичные значения характерны для западной части территории (г. Евпатория) за весенне-осенний период. Не-

большие отрицательные значения ($\sim -0,1$ м/с) встречаются весной – осенью на востоке Причерноморского региона России. В среднем за год сравнение карт показывает уменьшение скорости ветра на 3–5% для всей исследуемой территории, что составляет $0,1$ – $0,3$ м/с за 50 лет.

Выводы:

– на основании сравнительного анализа оценок скорости ветра, полученных по данным на метеостанциях и моделей проекта *CMIP5*, выбраны три

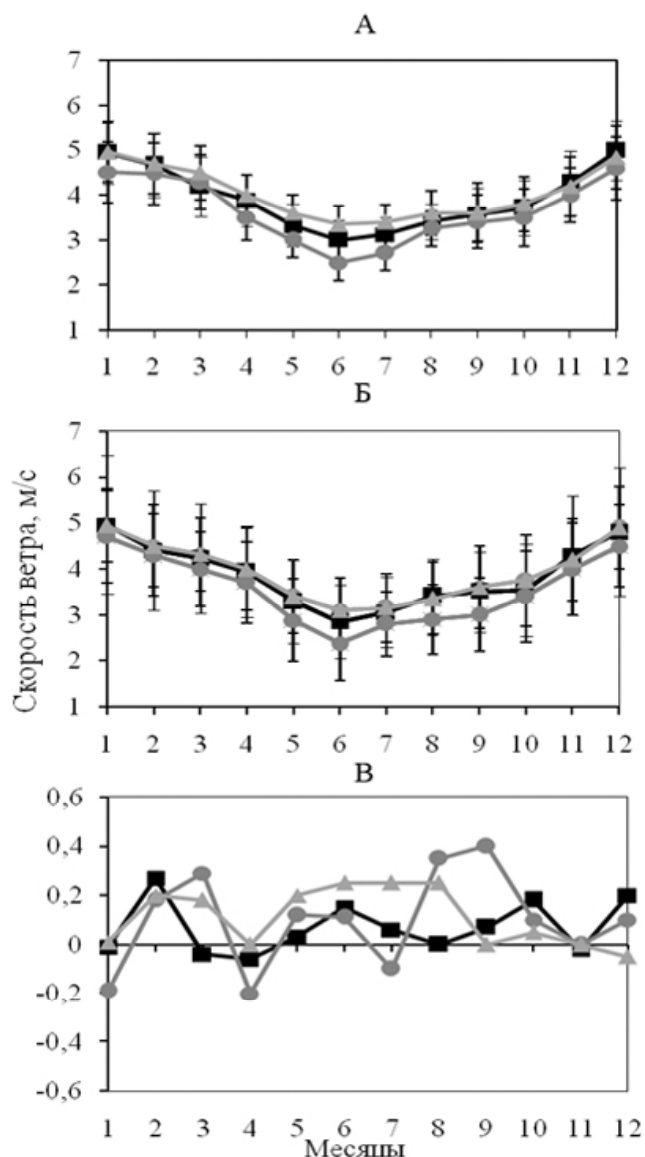


Рис. 3. Внутригодовой цикл скорости ветра за периоды 2006–2015 гг. (А) и 2046–2055 гг. (Б) и разницы между ними (В) по данным глобальных моделей *CMIP5*: *GFDL-CM3* (квадраты), *IPSL-CM5B-LR* (круги), *MPI-ESM-MR* (треугольники). Вертикальные тонкие линии – среднеквадратические отклонения ($\pm y$), обусловленные межгодовой изменчивостью среднемесячных значений за соответствующие периоды

Fig. 3. Intra-annual wind speed cycle for the periods 2006 – 2015 (А) and 2046 – 2055 (Б) and the differences between them (В), according to global *CMIP5* models: *GFDL-CM3* (squares), *IPSL-CM5B-LR* (circles), *MPI-ESM-MR* (triangles). Vertical thin lines – standard deviations ($\pm y$), due to the inter-annual variability of average monthly values for the corresponding periods

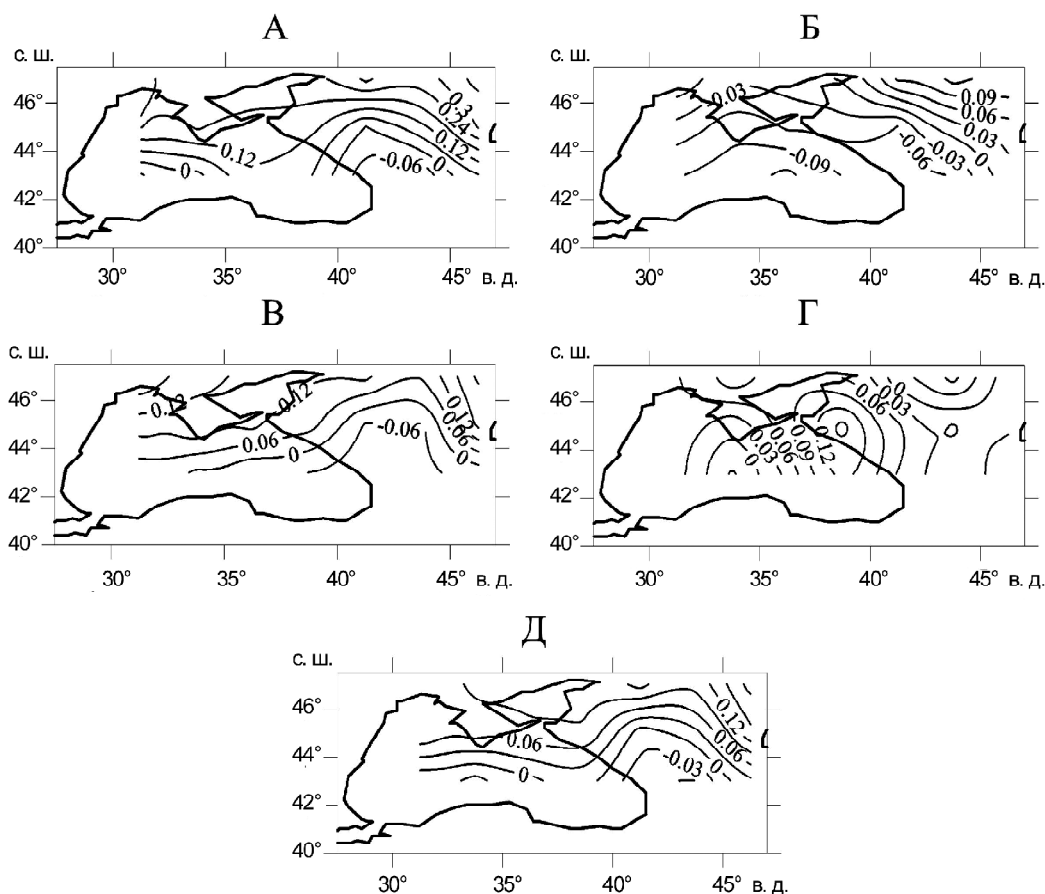


Рис. 4. Карты разницы пространственного распределения скорости ветра (м/с) между периодами 2006–2015 гг. и 2046–2055 гг. для зимы (А), весны (Б), лета (В), осени (Г) и за год (Д) по данным модели *GFDL-CM3*

Fig. 4. Maps of the spatial distribution of wind speed (m/s) between the periods of 2006–2015 and 2046–2055 for winter (A), spring (B), summer (B), autumn (Г) and annual (Д) according to the model *GFDL-CM3*

модели (*GFDL-CM3*, *IPSL-CM5B-LR* и *MPI-ESM-MR*) для анализа долговременных тенденций, внутригодовой и межгодовой изменчивостей. Оценки среднемесячных скоростей ветра и их среднеквадратические отклонения за период 2006–2015 гг., полученные по выбранным моделям *CMIP5*, хорошо воспроизводят средние значения скорости ветра (3–5 м/с) и ее внутригодовой цикл с зимним миниму-

мом ($5 \pm 0,5$ м/с) и летним минимумом ($3 \pm 0,5$ м/с), свойственные Причерноморскому региону России;

– на основе произведенного по данным модели *GFDL-CM3* прогноза было выявлено, что в среднем за год (для периода 2046–2055 гг.), скорость ветра оказалась меньше (на 0,3 м/с), чем в период 2006–2015 гг., что обусловлено в большей степени изменениями скорости ветра в летне-осенние месяцы.

Благодарности. Исследования выполнены по теме государственного задания Института морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского РАН «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом» (AAAA-A18-118021490093-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Воскресенская Е.Н., Крашенинникова М.А., Наумова В.А. Оценка качества воспроизведения скорости ветра на территории Крыма в климатических моделях проекта *CMIP5* // Международная научно-техническая конференция «Системы контроля окружающей среды – 2016», Севастополь, 24–27 октября 2016 г., 2016. 127 с.

Гарцман Л.Б. Методы расчета прикладных характеристик режимов поступления, преобразования и оптимального потреб-

ления энергии ветра и солнца // Прикладная климатология: Сб. тр. Всесоюз. совещания. Труды ГГО, 1990. С. 220–239.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоздат, 1991. 430 с.

Гнатюк Н.В., Бобылев Л.П. Анализ и прогноз ветроэнергетического потенциала акватории Черного моря по данным проекта *CMIP5* // Проблемы гидрометеорологического обеспе-

чения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата: материалы Международной научн. конф., 5–8 мая 2015 г. / Под. ред. П.С. Лопуха. Минск: Белорусский государственный университет, 2015. 337 с.

Ефимов В.В., Анисимов А.Е. Климатические характеристики изменчивости поля ветра в Черноморском регионе – Численный реанализ региональной атмосферной циркуляции // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 3. С. 380–392.

Ефимов В.В., Володин Е.М., Анисимов А.Е., Барабанов В.С. Региональные проекции изменений климата в Черноморско-Каспийском регионе в конце XXI столетия // Морской гидрофизический журнал. 2015. Т. 184. № 4. С. 14–28.

Ефимов В.В., Шокуров М.В., Барабанов В.С. Физические механизмы возбуждения ветровой циркуляции внутренних морей // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 2. С. 247–258.

Жуков А.Н., Крашенинникова М.А. Пространственно-временная изменчивость поля приповерхностного ветра над Черным морем по спутниковым данным // Экологічна безпека та захист довкілля: комплексне використання ресурсів шельфу. 2012. Вып. 2. № 26. С. 143–150.

Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря // Севастополь: МГИ НАН Украины. 2011. Т. 212. 209 с.

Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Лебедев С.А. Климатическая изменчивость гидрометеорологических параметров морей России в 1979–2011 годах // Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Санкт-Петербург. 2014. Вып. 570. С. 50–87.

Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н. Режим ветра над побережьем и шельфом северо-восточной части Черного моря // Наук. праці УкрНДГМІ. 2008. Вып. 257. С. 84–105.

Туникин С.Н., Орлова Н.С. Ветроэнергетические ресурсы Калининградской области: Учебное пособие / Под ред. С.Н. Туникина, Н.С. Орловой // Калининград: Калинингр. ун-т, 1998. 52 с.

Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part B: Regional Aspects: Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press. Doi: 10.1017/CB09781107415386.

Jacob D., Petersen J., Eggert B. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research // Reg. Env. Change. 2014. Vol. 14. P. 563–578.

Kara A.B., Hurlburt H.E., Wallcraft A.J. et al. Black Sea mixed layer sensitivity to various wind and thermal forcing products on climatological time scales // J. Climate. 2005. Vol. 18. № 24. P. 5266–5293.

Moss R.H., et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment // Nature. 2010. Vol. 463. № 7282. 747 p.

Önol B., Bozkurt D., Turuncoglu U.U., Sen O.L., Dalfes H.N. et al. Evaluation of the twenty-first century RCM simulations driven by multiple GCMs over the Eastern Mediterranean–Black Sea region // Climate dynamics. 2014. Vol. 42. № 7–8. P. 1949–1965.

Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. An overview of CMIP5 and the experiment design // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2012. Vol. 93. № 4. P. 485–498.

Поступила в редакцию 28.03.2019

После доработки 01.06.2019

Принята к публикации 28.06.2019

S.B. Krasheninnikova¹, M.A. Krasheninnikova²

ESTIMATION OF WIND SPEED VARIABILITY IN THE BLACK SEA REGION OF RUSSIA BASING ON SELECTED MODELS OF THE CMIP5 PROJECT

Basing on the comparative analysis with the data at meteorological stations, three models (GFDL-CM3, IPSL-CM5B-LR and MPI-ESM-MR) of the CMIP5 project were identified, which best reproduce the intra-annual and interannual characteristics and the long-term trends of wind speed change in the Black Sea region of Russia. The selected models adequately reproduce the average wind speed (3–5 m/s) and its intra-annual cycle typical for the region with maximum in winter (5,0±0,5 m/s) and minimum in summer (3,0±0,5 m/s). Using the GFDL-CM3 model data, we showed possible decrease in wind speed by the middle of the XXI century (2046–2055) by 3–5% compared with the period of 2006–2015, when it was <0,3 m/s.

Key words: prognosis, the Black Sea, weather stations of the Crimea Peninsula, intra-annual characteristics, interannual characteristics, long-term trends, wind speed

Acknowledgments. The research was carried out under the state task theme of the A.O Kovalevsky Institute of Marine Biological Research of the RAS «Functional, metabolic and toxicological aspects of the existence of hydrobionts and their populations in biotopes with different physic-chemical regimes» (AAAA-A18-118021490093-4).

¹ A.O. Kovalevsky Institute of Marine Biological Research of RAS, Department of Functioning of Marine Ecosystems, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: svetlanabk@mail.ru

² Institute of Natural-Technical Systems, Laboratory of large-scale interaction of the ocean and atmosphere and the climate change, Junior Scientific Researcher; e-mail: krmar61@mail.ru

REFERENCES

- Efimov V.V., Anisimov A.E.* Klimaticheskie karakteristiki izmenchivosti polya vetra v Chernomorskom regione – Chislennyi reanaliz regional'noy atmosfery i okeana [Climate characteristics of the wind field variability in the Black Sea region – Numerical reanalysis of the regional atmospheric circulation] // *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2011. V. 47. № 3. P. 380–392. (in Russian)
- Efimov V.V., Shokurov M.V., Barabanov V.S.* Fizicheskie mekhanizmy vzbuzhdeniya vetrovoj cirkulyatsii vnutrennih morey [Physical mechanisms of the excitation of wind circulation over the internal seas] // *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2002. Vol. 38. № 2. P. 247–258. (in Russian)
- Efimov V.V., Volodin E.M., Anisimov A.E., Barabanov V.S.* Regional'nye proekcii izmenenij klimata v Chernomorsko-Kaspijskom regione v konce XXI stoletiya [Regional projections of climate change in the Black Sea-Caspian region at the end of the XXI century] // *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal*, 2015. Vol. 184. № 4. P. 14–28. (in Russian)
- Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR. [Hydrometeorology and hydrochemistry of the USSR seas.] T. IV. Gidrometeorologicheskie usloviya. SPb.: Gidrometeoizdat, 1991. 430 p. (in Russian)
- Gnatyuk N.V., Bobylev L.P.* Analiz i prognoz vetroenergeticheskogo potentsiala akvatorii Chernogo morya po dannym proekta CMIP5 [Analysis and forecast of wind energy potential of the Black Sea water area according to the CMIP5 project data] // *Problemy gidrometeorologicheskogo obespecheniya hozyaystvennoy deyatel'nosti v usloviyah izmenyayushchegosya klimata: materialy Mezhdunarodnoy nauchn. konf., 5–8 maya 2015 g. / Belarus. gos. un-t; redkol.: P.S. Lopuh (otv. red.) [i dr.]*. Minsk, 2015. 337 p. (in Russian)
- Harzman L.B.* Metodyi rascheta prikladnykh karakteristik rezhimov postupleniya, preobrazovaniya i optimal'nogo potrebleniya energii vetra i solntsa [Methods for calculating the application characteristics of the regimes of intake, conversion, and optimal consumption of wind and solar energy] // *Prikladnaya klimatologiya. Sb. tr. Vsesoyuz. Soveshchaniya. Trudy GGO*, 1990. P. 220–239. (in Russian)
- Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part B: Regional Aspects: Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press. Doi: 10.1017/CB09781107415386.
- Ivanov V.A., Belokopytov V.N.* Okeanografiya Chernogo morya [Oceanography of the Black Sea], Sevastopol, 2011. 209 p. (in Russian)
- Jacob D., Petersen J., Eggert B.* EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research // *Reg. Env. Change*, 2014. Vol. 14. P. 563–578.
- Kara A.B., Hurlburt H.E., Wallcraft A.J. et al.* Black Sea mixed layer sensitivity to various wind and thermal forcing products on climatological time scales // *J. Climate*, 2005. Vol. 18. № 24. P. 5266–5293.
- Kostyanov A.G., Ginzburg A.I., Lebedev S.A.* Klimaticheskaya izmenchivost gidrometeorologicheskikh parametrov morey Rossii v 1979–2011 gg. [Climatic variability of hydrometeorological parameters of the seas of Russia in 1979–2011] // *Trudy glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voeykova, Sankt-Peterburg*, 2014, Issue. 570. P. 50–87. (in Russian)
- Moss R.H. et al.* The next generation of scenarios for climate change research and assessment // *Nature*, 2010. Vol. 463. № 7282. P. 747–756.
- Önol B., Bozkurt D., Turuncoglu U.U., Sen O.L., Dalfes H.N. et al.* Evaluation of the twenty-first century RCM simulations driven by multiple GCMs over the Eastern Mediterranean–Black Sea region // *Climate dynamics*, 2014. Vol. 42. № 7–8. P. 1949–1965.
- Repetin L.N., Belokopytov V.N.* Rezhim vetra nad poberezhem i shelfom severo-vostochnoy chasti Chernogo morya [Wind regime over the coast and the shelf of the northeastern part of the Black Sea] // *Nauk. pratsi UkrNDGMI*, 2008. Vol. 257. P. 84–105. (in Russian)
- Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A.* An overview of CMIP5 and the experiment design // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2012. Vol. 93. № 4. P. 485–498.
- Tupikin S.N., Orlova N.S.* Vetroenergeticheskie resursy Kalinigradskoy oblasti: Uchebnoe posobie [Wind Energy Resources of the Kaliningrad Region: Textbook] / S.N. Tupikin, N.S. Orlova // *Kaliningr. un-t. Kaliningrad*, 1998. 52 p. (in Russian)
- Voskresenskaya E.N., Krashenninnikova M.A., Naumova V.A.* Otsenka kachestva vosproizvedeniya skorosti vetra na territorii Kryima v klimaticheskikh modelyakh proekta CMIP5 [Assessment of the quality of reproducing the wind speed in the territory of Crimea by the climate models of the CMIP5 project] // *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy – 2016»*, Sevastopol, 24–27 oktyabrya 2016 g., 2016. 127 p. (in Russian)
- Zhukov A.N., Krashenninnikova M.A.* Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' polya pripoverhnostnogo vetra nad Chernym morem po sputnikovym dannym [Spatio-temporal variability of the near-surface wind field over the Black Sea according to satellite data] // *Ekologichna bezpeka priberezhnoi ta shel' fovoï zon ta kompleksne vikoristannya resursiv shel'fu*, 2012. Vol. 2. № 26. P. 143–150. (in Russian)

Received 28.03.2019

Revised 01.06.2019

Accepted 28.06.2019