**ВЕТРО-ВОЛНОВЫЕ И ЛИТОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ
У ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КРЫМА.
ЧАСТЬ 2: ПРОЕКЦИИ НА 21 ВЕК**

А.Б. Полонский^{1, 2, 3}, М.И. Железняк⁴

¹ Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: apolonsky5@mail.ru

² Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

³ Филиал МГУ им. М.В. Ломоносова в г. Севастополе,
РФ, г. Севастополь, ул. Героев Севастополя, 7

⁴ Institute of Environmental Radioactivity at Fukushima University,
Japan, 1 Kanayagawa, Fukushima City, Fukushima Prefecture 960-1296

В работе рассчитываются проекции ветро-волновых и литодинамических характеристик мелководной части акватории Черного моря, примыкающей к западному побережью п-ва Крым, до конца 21-го века с использованием программного комплекса, разработанного в Институте проблем математических машин и систем НАН Украины, и прогностических данных о поле ветра, полученных с помощью модели Принстонского университета CFDL CM2. Волновое поле на всей акватории Черного моря рассчитывается на весь период до конца 21-го века с пространственным разрешением 1,5–3 минуты, а в районе Каламитского залива на более мелкой неструктурированной сетке. После этого выполняется расчет индуцируемых прибрежных течений и литодинамических характеристик у западного побережья Крыма до конца 21-го века. Проведено сравнение рассчитанных характеристик для первой и второй половины 21-го века с характеристиками при современных условиях. Показано, что в целом характер ветро-волновых процессов и литодинамические условия у западного побережья Крыма до конца 21-го века не изменятся.

Ключевые слова: моделирование, сценарные расчеты ветро-волнового климата Черного моря, литодинамические условия у западного побережья Крыма до конца 21-го века.

Поступила в редакцию: 11.10.2019. После доработки: 20.11.2019.

Введение. Последние оценочные отчеты международной группы экспертов ИРСС указывают на тот факт, что во многих регионах земного шара в ближайшие десятилетия ожидается интенсификация эрозийных процессов в береговой зоне. Такое развитие деструктивных процессов в прибрежной полосе является прямым следствием глобального потепления, сопровождаемого повышением уровня Мирового океана и изменением ветро-волнового режима [1–4]. Вместе с тем, различные регионы характеризуются далеко не одинаковыми тенденциями изменения режимных гидрометеорологических параметров. В ряде регионов эти тенденции могут отличаться вплоть до знака. Кроме этого, на процесс глобального потепления накладываются естественные климатические изменения

квазипериодического характера значительной амплитуды, величина которой варьирует от одного региона к другому. В связи с этим необходимо учитывать существенные региональные особенности в развитии ветро-волновых и эрозийных процессов. На это, в частности, обращалось внимание в первой части настоящей работы [5].

Изменчивость ветро-волновых условий в Черном море в 20-м и начале 21-го вв. описана достаточно подробно (см. работу [5] и библиографию в ней). Что касается вероятных изменений ветро-волновых условий в Черном море в ближайшие десятилетия, то они изучаются на основании климатических проекций. Наиболее обстоятельные работы по использованию климатических проекций для оценки будущих ветро-волновых и

литодинамических условий в западной части Черного моря были выполнены в рамках Европейского проекта 7-ой рамочной программы ЕС THESEUS [6, 7]. Однако эти работы касались, в основном, прибрежной зоны Болгарии [7]. В настоящей работе выполнены соответствующие сценарные оценки для ветроволновых и литодинамических тенденций у западного побережья Крыма.

Основное отличие климатических проекций от прогнозов заключается в следующем. Проекции рассчитываются при различных сценариях социально-экономического развития и, соответственно, при разных величинах эмиссии парниковых газов в будущем. Поскольку точно не известно, какое количество парниковых газов будет выбрасывать человечество через 10, 20 ... 100 лет, можно производить только сценарные оценки с использованием глобальных климатических моделей и предположительных величинах выбросов парниковых газов в будущем.

При подготовке 4-го оценочного отчета IPCC [2] рассчитывались проекции по 6-ти основным сценариям. Самые худшие из них – это сценарии A2 и A1F1, которые не предусматривали никаких практических ограничений на эмиссию парниковых газов в 21-м веке. Самый оптимистичный сценарий (B1) предполагал радикальное снижение эмиссии парниковых газов в 21-м веке. Все остальные сценарии предусматривали промежуточные варианты эмиссии. Кроме этого был проведен контрольный эксперимент с постоянной концентрацией парниковых газов на уровне 2000 г. При подготовке 5-го оценочного отчета количество сценариев было уменьшено до 4-х [3]. Они были названы представительными сценариями (RCP - 2,6, 4,5, 6,0 и 8,5). Каждая из этих цифр означает величину дополнительного радиационного форсирования нижней тропосферы к концу 21-го века (в Вт/м^2). Сокращение количества сценарных расчетов связано с тем, что каждый расчет – это очень дорогостоящий и длительный процесс. Поэтому вполне достаточно ограничиться

самым оптимистическим, самым пессимистическим сценариями и двумя более вероятными промежуточными вариантами.

Далее результаты численных экспериментов по всем моделям усреднялись и получалась ансамблевая оценка возможного роста приземной/приводной температуры, частоты и интенсивности циклонов и изменений других климатических параметров при различных сценариях выбросов парниковых газов. Разброс оценок между различными расчетами указывает на неопределенность результатов моделирования.

Необходимо отметить, что некоторые модели описывают наблюдаемые изменения климата в различных регионах более или менее точно, а другие совершенно неправильно. Поэтому, на наш взгляд, предпочтительнее использовать для региональных расчетов результаты проекций по тем моделям, которые лучше описывают климатические тенденции в данном регионе, а не ансамблевые проекции по всем расчетам. Именно этот подход и будет реализован в настоящей работе, целью которой является расчет вероятных ветро-волновых и литодинамических тенденций у западного побережья Крыма в 21-м веке.

Важность работ такого типа определяется необходимостью разработки адаптационной стратегии к последствиям климатических изменений, основанной на современных представлениях о региональных особенностях таких изменений.

Использованные модели, материалы и методика их обработки. Достаточно подробное описание комплекса моделей, использованного для расчета ветро-волновых и литодинамических характеристик в прибрежной зоне Черного моря, приведено в первой части работы [5]. Для расчета ожидаемых тенденций в динамике вод и направленности литодинамических процессов в прибрежной зоне Черного моря использовались данные сценарных расчетов, полученных по модели Принстонского университета CFDL CM2.1. Эта модель была выбрана из следующих соображений. Во-первых, прогностические расчеты,

выполненные с ее помощью для контрольного периода (1960–2000 гг.), хорошо описывают не только важнейшие глобальные и региональные климатические тенденции (такие, например, как Эль-Ниньо [8]), но и неплохо воспроизводит наблюдаемые изменения гидрометеорологических параметров в Черноморском регионе, включая Крымский полуостров [9, 10]. Во-вторых, по результатам прогностических расчетов, выполненных с использованием этой модели, доступен наиболее полный массив данных за временной период до 2100 г.

Выполненные ранее исследования показали, что скорость ветра в Черноморском регионе, полученная по расчетам с помощью модели CFDL CM2.1, занижена по сравнению с наблюдаемыми значениями в 1,4 раза [9–11]. Главная причина такого занижения – сравнительно низкое пространственное разрешение CFDL CM2.1 (а именно, $2^\circ \times 2,5^\circ$). В связи с этим, все прогностические скорости ветра, полученные в этой модели, домножались на коэффициент 1,4. Скорректированные таким образом дан-

ные использовались для дальнейших расчетов.

В настоящей работе будут приведены и проанализированы результаты сценарных расчетов для 21-го века по модели CFDL CM2.1 и одному из наихудших сценариев эмиссии парниковых газов – А2, который не предусматривает введение ограничений на атмосферные выбросы антропогенного происхождения. Выбор одного из наиболее пессимистических сценариев эмиссии парниковых газов обусловлен необходимостью оценить региональные климатические последствия антропогенной деятельности при наихудшем варианте социально-экономического развития.

Все расчеты производились по многоступенчатой схеме, подробно описанной в первой части работы [5]. Вкратце она сводится к расчету ветро-волновых характеристик во всем Черном море на относительно грубой сетке (3х3 минуты по широте и долготе), уточненным расчетам этих, а также литодинамических характеристик в районе Каламитского залива и Евпаторийского побережья на более мелкой сетке (рис. 1).

Рис. 1. Расчетная область в районе Евпатории и Каламитского залива, в которой производились ветро-волновые и литодинамические расчеты на неструктурированной сетке с высоким разрешением. Точкой обозначен узел сетки, по которому рассчитывались розы ветро-волновых характеристик, приведенные на рис. 2

Fig. 1. Simulation area (Eupatoria and Calamita bay) for high-resolved wind-wave and lithodynamic calculations. Point shows the grid mesh in which the wind-wave parameters have been obtained (see, fig. 2)

Результаты, их анализ и обсуждение. Сравнение будущего ветроволнового климата на акватории, прилегающей к Каламитскому заливу, для двух полувековых периодов времени в 21-ом веке, полученного по результатам

прогностического сценарного моделирования и приведенного на рис. 2 (в центре и снизу), с рассчитанным в первой части работы [5] за период 1979–2008 гг. (рис. 2, сверху) показало следующие основные различия.

Рис. 2. Розы ветров (справа) и волн (слева) по диагностическим расчетам за период 1979–2008 гг. (сверху) и прогностическому сценарному расчету на 2001–2050 (в центре) и 2050–2099 гг. (снизу)
Fig. 2. Wind (right column) and wave roses (left column) for the 1979–2008s (upper panel) and scenarios calculations for the 2001–2050s (central panel) and 2050–2099s (low panel)

Климат 21-го века характеризуется более частой повторяемостью ветров юго-западных румбов, генерирующих наиболее интенсивные шторма в Каламитском заливе. Преобладание ветров юго-западных румбов, в том числе со скоростями, превышающими 6 м/с, особенно хорошо выраженное во второй половине 21-го века, приводит к некоторому увеличению повторяемости штормов. При этом скорость ветра в целом практически не возрастает по сравнению с 1979–2008 гг., а для ветров северо-восточных румбов даже несколько уменьшается. Поэтому (одновременно с увеличением повторяемости) общая интенсивность штормов мало меняется. В основном, происходит перераспределение повторяемости между штормами разных румбов. Если при современных климатических условиях волны с высотами, превышающими 2 м, приходится на северо-западный, западные и юго-западные румбы, то в 21-ом веке – только на юго-западные.

Необходимо подчеркнуть, что на рис. 2 приведены сценарные климатические ветро-волновые характеристики за два полувековых периода, а не за 30-летние временные отрезки, принятые в климатологии. Причина такого увеличения климатического периода по сравнению с диагностическими расчетами заключается в том, что во временном ходе ветро-волновых характеристик в Черном море отмечается низкочастотная квазипериодическая изменчивость с типичным временным масштабом 50 лет [12–15]. Поэтому 30-летний климатический период осреднения не является в данном случае оптимальным, о чем уже упоминалось в первой части нашей работы (см. [5]).

Поскольку на изменчивость литодинамических характеристик в прибрежной зоне Каламитского залива в первую очередь влияют вариации штормовой активности в Черноморском регионе и сопутствующее штормам усиление вдольбереговых течений, а также взмучивание и перенос донных отложений, ветро-волновые и литодинамические характеристики при штормовых условиях рассчитывались с повышенным в два раза пространственным разрешением. В открытой части моря это разрешение

составило $1,5 \times 1,5$ минуты по широте и долготе, что дало возможность более точно рассчитать направленность литодинамических процессов в прибрежной зоне в 21-ом веке. Аналогичная схема расчетов использовалась при диагностических расчетах, проведенных нами в первой части работы. Это позволяет сопоставить изменения литодинамических характеристик в 21-ом веке, обусловленных региональными ветро-волновыми тенденциями, не только для двух полувековых периодов 21-го века, но и сравнить их с аналогичными характеристиками для конца 20-го века. Рис. 3–5 дают ясное представление о таких изменениях. На них хорошо видно, что в целом в 21-ом веке характер аккумуляции наносов и эрозии береговой зоны не изменяется. Общая структура зон аккумуляции и эрозии останется в 21-ом веке практически такой же, как и в конце 20-го. Вместе с тем, во второй половине 21-го века и к западу, и к востоку от м. Карантинный ожидается даже некоторое ослабление интенсивности эрозионных процессов, обусловленное отмеченным выше уменьшением скорости ветра некоторых румбов. Причем это ослабление касается не только второй половины 21-го века по сравнению с первой его половиной, но и ветровой активности в 21-ом веке по сравнению с концом 20-го века (сравните рис. 3–5). Вероятная причина некоторого ослабления ветра в рассматриваемом регионе во второй половине 21-го века при интенсивном радиационном форсировании нижней тропосферы антропогенного происхождения заключается в смещении Атлантических шторм-треков к северу в процессе глобального потепления [12].

Типичные величины эрозии и аккумуляции для конца 20-го века составляют соответственно 0,1–0,3 и 0,4–1,0 м. Во второй половине 21-го века эти значения уменьшатся приблизительно на 0,1 м.

Сравнение результатов прогностических сценарных литодинамических расчетов, приведенных на рис. 3 и 4 (сверху), с данными аналогичных диагностических расчетов за сопоставимый период (рис. 5) указывает на хорошее соответствие между ними.

1981-2008

2001-2050

2050-2099

Рис. 3. Зоны эрозии и аккумуляции наносов к западу от м. Карантинный по данным прогностических расчетов за 1981–2008 гг. (сверху), а также сценарных расчетов на 2001–2050 гг. (в центре) и 2050–2099 гг. (снизу). Красные участки показывают зоны аккумуляции, синие – зоны эрозии

Fig.3. Erosion (blue) and cumulative (red) zones to the West of c.Karantinny in simulation for 1981–2008s (upper), scenarios calculations for 2001–2050s (in centrum) and 2050–2099 (low panel)

Рис. 4. Зоны эрозии и аккумуляции наносов к востоку от м. Карантинный по данным прогностических расчетов за 1981–2008 гг. (сверху), а также сценарных расчетов на 2001–2050 гг. (в центре) и 2050–2099 гг. (снизу). Красные участки показывают зоны аккумуляции, синие – зоны эрозии

Fig. 4. The same as in Fig. 3, but to the East of the c. Karantynny

Закключение. Таким образом, можно сделать вывод, что климатический ветро-волновой режим и литодинамические характеристики мелководной части ак-

ватории Черного моря, прилегающей к западному побережью Крыма, не претерпят в 21-ом веке существенных изменений. Некоторое ослабление скорости

ветра северо-восточных румбов будет частично скомпенсировано увеличением повторяемости ветров юго-западных румбов, вызывающих наиболее интенсивные шторма в Каламитском заливе.

Авторы выражают признательность анонимному рецензенту за полезные замечания и предложения по доработке первого варианта статьи.

Рис. 5. Зоны эрозии и аккумуляции наносов при современных климатических условиях, полученные на основании диагностических расчетов в работе [5]. Красные участки показывают зоны аккумуляции, синие – зоны эрозии. Черные полосы с номерами – стандартные разрезы, на которых проводился мониторинг интенсивности литодинамических процессов по данным авторов работы [16]. Рисунок заимствован из работы [5]

Fig. 5. Erosion (blue) and cumulative zones for the recent climate conditions. Black lines – monitoring sections from [16]. Adopted from [5]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC: Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs [et al.]. Cambridge, New York. Cambridge University Press, 2001. 881 p.
2. IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I To the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Ed. Cambridge, Cambridge University Press. 2007. 996 p.
3. IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC. Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.

4. Zhang K., Douglas B.C., Leatherman S.P. Global Warming and Coastal Erosion // Climatic Change. Kluwer Academic Publishers. 2004. P. 41–58.
5. Железняк М.И., Полонский А.Б. Ветро-волновые и литодинамические условия у западного побережья Крыма. Часть 1: Современный климат // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 3 (37). С. 79–88. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-3-79-88
6. www.theseusproject.eu (дата обращения: 04.12.2019).
7. Mitigating Flood and Erosion Risk using Sediment Management for a Tourist City: Varna, Bulgaria / E. Trifonova, N. Valchev, S. Keremedchiev [et al.] // In book: Coastal Risk Management in a Changing Climate (Edited by B. Zanuttigh and R. Nicholls). Elsevier B.V. 2014. P. 358–383.
8. Wittenberg A.T., Rosati A., Lau N-Ch., Ploshay J.J. GFDL's CM2 global cou-

pled climate models. Part III: Tropical pacific climate and ENSO // J. of Climate. 2006. Vol. 19. P. 698–722.

9. Полонский А.Б., Князьков А.С. Пространственно-временная структура регионального поля температуры для региона Украины и Черного моря в глобальных климатических моделях // Доклады НАН Украины. 2012. № 1. С. 123–130.

10. Соответствие меридиональных и зональных компонент ветра между моделью GFDL, ре-анализом JRA и натурными наблюдениями / А.Б. Полонский, Е.Н. Воскресенская, А.В. Гармашов [и др.] // Системы контроля окружающей среды. 2010. Вып. 14. С. 164–167.

11. Отчет о научно-исследовательской работе «Исследование направленности и интенсивности эрозийных процессов в береговой зоне Черного и Азовского морей в связи с изменения климата» («ЭРБЕР», руководитель работ – А.Б. Полонский). Севастополь, 2013. 222 с.

12. Polonsky A. The Ocean's Role in Climate Change // Cambridge Scholars

Publishing. Newcastle-Upon-Tyne, UK. 2019. 294 p.

13. Low-frequency variability of storms in the northern Black Sea and associated processes in the ocean-atmosphere system / A. Polonsky, V. Evstigneev, V. Naumova [et al.] // Regional Environmental Change, 2014. Vol. 14. Is. 5. P. 1861–1871. DOI:10.1007/s10113-013-0546-z

14. Ветро-волновые условия прибрежной зоны Азово-Черноморского региона / В.П. Евстигнеев, В.А. Наумова, Е.Н. Воскресенская [и др.]. Севастополь: ИПТС, 2017. 320 с. DOI: 10.33075/978-5-6040795-0-8

15. Climatic Change in the Storm Occurrence and Intensity Trends / N. Valchev, E. Trifonova, N. Andreeva [et al.] // Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference SGEM Albena. Bulgaria. 2009. Vol. 2. P. 305–312.

16. Горячкин Ю.Н., Долотов В.В. Изменения береговой линии аккумулятивных берегов Западного Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2011. Вып. 25. Т. 1. С. 8–18.

WIND-WAVE AND LITHODYMANIC CONDITIONS OFF THE WEST COAST OF CRIMEA. PART 2: PROJECTIONS ON THE 21st CENTURY

A.B. Polonsky^{1,2,3}, M.I. Zheleznyak⁴

¹ Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

² Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

³ Sevastopol Branch of Moscow State University, RF, Sevastopol, Sevastopol Hero St., 7

⁴ Institute of Environmental Radioactivity at Fukushima University, Japan, 1 Kanayagawa, Fukushima City, Fukushima Prefecture 960-1296

Projections of wind-wave and lithodynamic characteristics of shallow waters of the Black Sea near Western Crimea up to the end of the 21 century are calculated using original COD of Institute of the Problems of Math Machines and System of National Academy of Sciences of Ukraine and wind forecast of Princeton model CFDL CM2. The wave field in the entire Black Sea basin up to the end of the 21 century is calculated with space resolution of 1,5–3'. Then, higher resolution is applied for calculations in the Kalamita bay region. After that, the wave-induced currents and lithodynamic characteristics are calculated. The comparison of the calculated characteristics for the first and the second semi-centuries showed that in general the wind-wave and lithodynamic parameters will be the similar up to the end of the 21 century.

Keywords: modeling, climate projections, Black Sea wind-wave climate, lithodynamic conditions near Western Crimea up to the end of the 21 century.