**ВЕТРО-ВОЛНОВЫЕ И ЛИТОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ
У ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КРЫМА.
ЧАСТЬ 1: СОВРЕМЕННЫЙ КЛИМАТ**

М.И. Железняк¹, А.Б. Полонский^{2,3,4}

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

²Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: apolonsky5@mail.ru

³Севастопольский государственный университет, РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

⁴Филиал МГУ им. М.В. Ломоносова в г. Севастополе, РФ, г. Севастополь, ул. Героев Севастополя, 7

В работе рассчитываются ветро-волновые и литодинамические характеристики мелководной части акватории Черного моря, примыкающей к западному побережью п-ва Крым, для временного периода с 1979 по 2008 гг. Используются оригинальный программный комплекс, разработанный в Институте проблем математических машин и систем НАН Украины, и скорректированные данные ре-анализа Японского метеорологического агентства. Вначале рассчитывается волновое поле на всей акватории Черного моря с разрешением 1,5–3 минуты, затем на более мелкой сетке в районе Каламитского залива. После этого выполняется расчет индуцируемых течений и литодинамических характеристик. Получено хорошее соответствие результатов моделирования и натурных данных. Сделан вывод, что используемый комплекс программ может быть успешно применен для сценарных ветро-волновых и литодинамических оценок в регионе.

Ключевые слова: моделирование, ре-анализ, ветро-волновой климат Черного моря.

Поступила в редакцию: 30.07.2019. После доработки: 26.08.2019.

Введение. Отчеты международной группы экспертов по вопросам, связанным с изменениями климата, указывают на тот факт, что одно из негативных последствий глобального потепления проявляется в виде интенсификации эрозийных процессов в береговой зоне [1–4]. Частично такая интенсификация представляет собой прямое следствие повышения уровня Мирового океана. Вместе с тем, она может быть вызвана изменением ветро-волнового режима в условиях меняющегося климата. Различные регионы характеризуются разными тенденциями изменения режимных гидрометеорологических параметров. 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 эрозионных процессов [4, 5]. Изменчивость ветро-волновых условий в Черном море в 20-м и начале 21-го вв. описана достаточно подробно [6–15]. Однако, использование разных типов данных и методик их обработки, а также различных периодов осреднения для получения климатических (режимных) характеристик приводят к значительным расхождениям в опубликованных результатах.

Современные методы исследования направленности развития эрозийных процессов основываются на использовании математического моделирования ветро-волновых и литодинамических характеристик [4, 6]. При этом в качестве граничных условий на поверхности выбираются различные поля ветра в том или ином регионе в зависимости от поставленной задачи. Если необходимо рассчитать климатические ветро-волновые и литодинамические характеристики и тенденции их изменения за

последние несколько десятилетий, используются реальные поля ветра, рельеф дна и состав грунта в конкретном регионе. Если же ставится задача оценить направленность изучаемых процессов в будущем, необходимо привлекать сценарные расчеты с использованием глобальных климатических моделей.

В настоящей работе будет рассчитан ветро-волновой режим и преобладающие в настоящее время литодинамические процессы у западного побережья Крыма с использованием современных моделей и данных ре-анализа после их валидации и корректировки по данным прямых натурных измерений. Во второй части работы будут оценены вероятные тенденции изменения режимных характеристик и связанных с ними литодинамических процессов для этого района Черного моря в 21 веке. Важность работ такого типа очевидна. Она обусловлена тем обстоятельством, что в этом регионе базируется Черноморский флот РФ и достаточно интенсивно функционируют морские транспортные коридоры. Кроме этого, западное побережье Крыма относится к интенсивно развивающимся курортным и рекреационным регионам.

Использованные модели, материалы и методика их обработки. Для расчета ветро-волновых и литодинамических характеристик в прибрежной зоне используется комплекс моделей, состоящих из нескольких блоков, описывающих трансформацию волн, динамику течений и наносов на мелководье. Этот комплекс, получивший название COASTOX-M, разработан в Институте проблем математических машин и систем НАН Украины [6] и включает следующие блоки:

1. Модуль постпроцессинга результатов расчетов параметров ветровых волн, полученных с помощью спектральной модели SWAN, которая широко и успешно используется многими исследовательскими группами для волновых расчетов в различных регионах Мирового океана [16]. Модуль позволяет рассчитывать параметры волн на неструктурированных сетках, необходимые для использования в других блоках программного комплекса.

2. Модель HWAVER, которая позволяет проводить волновые расчеты в прибрежной зоне на основе, так называемых, *mild slope equations* в гиперболическом приближении. Она дает возможность более точно (чем модель SWAN) описывать эффекты отражения волн, рефракцию и дифракцию на неоднородностях рельефа и гидротехнических сооружениях, что особенно важно для расчетов в прибрежной зоне. Причем используется спектральная разновидность этой модели, получившей название HWAVER-S.

3. Модель COASTOX-CUR, предназначенная для расчета поля прибрежных течений, генерируемых ветром, градиентами давления на границе прибрежной и глубоководной зон и волновыми эффектами. Модель основана на численной реализации двумерных уравнений мелкой воды на неструктурированных сетках (рис. 1). Она включает члены, описывающие эффекты придонного трения, волновых радиационных напряжений, горизонтальное турбулентное перемешивание. В принципе, модель позволяет также количественно описывать трансформацию приливных волн, штормовые нагоны и цунами на мелководье, а также течения в реках. Однако в нашем случае достаточно ограничиться описанием штормовых нагонов из-за практического отсутствия в исследуемом регионе существенного пресного стока, приливных волн и цунами.

4. Модель транспорта наносов (COASTOX-SED), основанная на численном решении адвективно-диффузионных уравнений переноса. Локальная интенсивность процессов осаждения и эрозии дна считается пропорциональной разности мгновенной и равновесной концентраций наносов в каждом узле расчетной сетки. При расчете равновесной концентрации используется библиотека формул современной теории транспорта прибрежных наносов, учитывающих состав взвешенного вещества, который, в свою очередь, зависит от свойств грунта [17].

5. Модель расчета трансформации дна и берегов (COASTOX-MORPHO), основанная на двумерном уравнении баланса массы донного материала (уравне-

нии Экснера). Численное интегрирование модели реализуется на сетке, совпадающей с сеткой моделей COASTOX-CUR и COASTOX-SED. Тестирование модели проводилось с привлечением данных лабораторных экспериментов, а также спутниковой информации о состоянии береговой черты п-ва Крым. Тестировалась способность модели описывать трансформацию прибрежной зоны в регионе под действием конкретных штормовых условий, а также влияние различных гидротехнических сооружений на литодинамический режим. Кроме этого для оценки качества модели привлекались немногочисленные натурные данные о ширине пляжа на стационарных створах в районе г. Евпатория. Результаты сравнения модельных и натурных данных показали, что первые из них описывают наблюдаемые изменения литодинамических параметров у западного побережья п-ва Крым не только на качественном уровне. Модельные и натурные данные в регионе совпадают в среднем с точностью до 25%. Подробное описание лабораторного тестирования модели и сравнение региональных натурных данных с результатами моделирования приведено в отчете [18].

В качестве граничных условий на поверхности Черного моря задавались срочные данные ре-анализа Японского метеорологического агентства [19] для одного 30-летнего климатического пери-

ода, начинающегося с 1979 г. (т.е., моделирование проводилось по данным за 1979–2008 гг.). Этот период выбирался потому, что данные ре-анализа JRA доступны, начиная со старта спутниковой эры в метеорологии и океанографии (с 1979 г.). Климатический период в 30 лет определен в качестве базового во всех расчетах, проводимых под эгидой ВМО [1–3]. Качество гидрометеорологических полей (в том числе, и поля ветра), продуцируемых ре-анализом для Черноморского региона, исследовалось в работах [20, 21]. В них было показано, что структура ветровых полей в Черноморском регионе (включая прибрежные области у п-ова Крым) в целом хорошо описывается данными ре-анализа. Однако, из-за сравнительно невысокого разрешения (порядка 100 км для анализируемого региона) скорость ветра в ре-анализе занижена по сравнению с прямыми наблюдениями на величину около 30%. Поэтому для расчетов использовался ветер из данных ре-анализа, скорость которого корректировалась (увеличивалась) на 30%. Как показало сравнение рассчитанных с помощью модели SWAN по скорректированным полям ветра JRA и измеренных на стационарной платформе в северо-западной части Черного моря характеристик ветровых волн, результаты моделирования хорошо описывают натурные данные [7]. Расчет ветроволновых характеристик проводился на 30 лет с угловым разрешением 22,5° для

всего Черного моря. Разрешение по пространству составляло 3 мин. В прибрежной зоне использовалась неравномерная сетка со сгущениями у берега (рис. 1). Для более точного моделирования отдельных штормов пространственное разрешение увеличивалось до 1,5 мин.

Кроме расчетов ветро-волновых характеристик с использованием данных о поле ветра JRA проводился соответствующий расчет по данным прогностической модели Принстонского университета CFDL CM2 за контрольный период (1960–2000 гг.), которые будут использованы во второй части работы. CFDL CM2 была выбрана как одна из глобальных моделей, реалистично описывающих климатическую изменчивость как глобального, так и регионального масштабов [20–22].

Результаты и их анализ. Ветро-волновой климат для периода 1979–2008 гг., рассчитанный по модели SWAN и данным ре-анализа JRA, подробно описан в работе [7]. В ней показано, что наибольшую повторяемость в Черном море имеют волны высотой до 1 м. Это, естественно, подтверждается и данными

наших расчетов (рис. 2), поскольку использовалась одна и та же модель, форсируемая тем же самым полем ветра. Незначительные различия в этих двух вариантах расчета обусловлены разницей в пространственном разрешении при численной реализации задачи. Отметим, что максимальные высоты значительных волн (т.е., осредненных по 1/3 наибольших волн) в период с 1979 по 2008 гг. по данным авторов работы [7] превышают 13 м. Это также совпадает с нашими расчетами и указывает на вероятность возникновения волн с максимальной высотой около 20 м (примерно в 1,5 раза больше максимальной высоты значительных волн). Такие волны возникают в открытой (юго-западной) части моря. Их повторяемость не превышает 1 случая за 50 лет. Для Евпаторийского региона максимальные высоты значительных волн в период с 1979 по 2008 гг. не превышают 5 м (рис. 3). Наиболее вероятны волны, распространяющиеся с юго-запада, несмотря на то, что типичный ветер имеет здесь преобладающую северо-северо-восточную и юго-юго-западную составляющие (рис. 2). Очевидно, это обусловлено конфигурацией береговой черты.

Рис. 2. Климатические розы волн (слева) и ветра (справа) для различных градаций (в метрах и м/с, соответственно), рассчитанные за 1979–2008 гг. в точке, показанной на рис. 1 белым цветом

Рис. 3. Поле максимальных значительных волн в Черном море в период с 1979 по 2008 гг. (в метрах, по данным работы [7])

Опасными волнами считаются те из них, высота которых превышает 1,5 м [15]. Повторяемость таких волн в исследуемом регионе – менее 10%. Высоты волн, превышающих в северо-западной части Черного моря 2 м, характеризуются повторяемостью менее 2%, а превышающие 4 м – 0,02%. Шторма наиболее часты в холодное полугодие (с октября по март). Их доля в общем количестве штормов более 80%. Это проявляется и в климатических полях ветра (рис. 4), и в климатических полях волн (рис. 5) для разных месяцев. Описанные результаты в целом соответствуют данным авторов работ [13, 15], полученным на основании анализа длительных полуинструментальных наблюдений на морских гидрометеорологических станциях.

Важно подчеркнуть, что именно осенне-зимние штормы представляют

главную опасность и приводят к интенсификации процессов эрозии берегов [23]. Отметим, что большая часть рассматриваемого периода относится к годам с пониженной ветро-волновой активностью в северо-западной части Черного моря. Точнее, пониженная (по сравнению со столетним климатом) ветро-волновая активность наблюдалась с 1983 г. Поэтому ветро-волновой климат за предыдущие 30 лет (с 1954 г.) характеризовался значительно большей повторяемостью штормовых условий. Для последних вообще типична квазипериодичная изменчивость с временным масштабом порядка 50 лет [13, 15]. Это, в частности, приводит к значительно более высоким значениям повторяемости штормов, рассчитанных по данным до 1984 г. (см., например, [10, 13]). Поэтому климатические характеристики ветро-

Рис. 4. Климатическое поле скорости ветра в январе (а) и в июле (б) (в м/с, по данным работы [18])

Рис. 5. Климатическое поле высот значительных волн в январе (а) и в июле (б) (в метрах, по данным работы [18])

волновых полей в рассматриваемом регионе, полученные путем усреднения расчетных данных за стандартный 30-летний период, не являются репрезентативными. Необходимо увеличить период усреднения по крайней мере до 50 лет. Тогда он будет включать как периоды с высокой активностью синоптических процессов и повышенной повторяемостью штормов, так и периоды с пониженной атмосферной активностью и невысокой повторяемостью штормовых условий. Именно такой период осреднения и будет использован во второй части работы. Отметим также, что приведенные выше результаты расчетов не включают волны-убийцы.

Что же касается практических целей, то статистические характеристики волн (такие, например, как высота волн 1%-ой обеспеченности) лучше рассчитывать по тем десятилетиям, когда повторяемость штормов максимальна. Именно в эти периоды отмечается максимальная нагрузка на гидротехнические сооружения в прибрежной зоне и наибольшая интенсивность литодинамических процессов. В связи с этим, рассмотрим более подробно результаты моделирования штормовых условий и их влияния на литодинамические процессы в Евпаторийском заливе. Рис. 6 можно считать ти-

пичной демонстрацией структуры волнового поля в Черном море при штормах, оказывающих существенное влияние на Каламитский залив. Хорошо видно, что в период ноябрьского шторма 1981 г. высота значительных волн в открытой части Черного моря превышала 8 м. При этом в Евпаторийском заливе их высота достигала 4 м, а в прибрежной зоне – 1,5 м (рис. 7). Скорость вдольбереговых течений в Евпаторийском заливе в период штормов такого типа превышает 1 м/с. Так, например, в период шторма 6–9 декабря 1981 г. она достигала 2 м/с у м. Карантинный, который ограничивает Каламитский и Евпаторийский заливы с запада (рис. 8). Причем, из-за сложного характера береговой черты и рельефа дна поле течений сильно неоднородно. В первую очередь, именно это приводит к тому, что зоны интенсивной береговой эрозии перемежаются зонами аккумуляции наносов и намыва грунта (рис. 9). Численные расчеты неплохо соответствуют натурным измерениям (рис. 10) и подтверждают важнейшую роль статистики штормов в формировании литодинамического режима прибрежных акваторий, на что неоднократно обращалось внимание в литературе (например, в работе [23]).

Рис. 6. Поле значительных волн в Черном море в период шторма 03.11.1981 г.

Рис. 7. Поле значительных волн в районе Евпаторийского залива 03.11.1981 г.

Рис. 8. Поле течений на акватории к востоку от м. Карантинный в период максимальных высот волн при шторме 6–9 декабря 1981 г.

Рис. 9. Зоны эрозии и аккумуляции наносов при современных климатических условиях. Красные участки показывают зоны аккумуляции, синие – зоны эрозии. Черные полосы с номерами – стандартные разрезы, на которых проводился мониторинг интенсивности литодинамических процессов по данным работы [23]

Рис. 10. Изменение береговой черты и рельефа дна на профиле № 8 между 2008 и 2009 гг. по адаптированным данным из работы [23] (сверху) и результаты литодинамического моделирования для 2008 г. (снизу)

Заключение. Таким образом, можно сделать вывод, что модель COASTOX-M вполне пригодна для адекватного количественного описания климатических (режимных) ветро-волновых и литодинамических характеристик мелководной части акватории Черного моря, прилегающей к западному побережью Крыма. Это описание включает также штормовые условия, играющие принципиально важную роль в трансформации прибрежных акваторий и береговой черты. Для расчета возможных в будущем режимных сдвигов и оценки направленности литодинамических процессов необходимо использовать в качестве граничных условий на поверхности моря ветровые поля, полученные в климатических проекциях, адекватно описывающие режимные условия в Черном море.

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* / [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC. Geneva, Switzerland. 151 pp.
4. Zhang K., Douglas B.C., Leatherman S.P. Global Warming and Coastal Erosion // *Climatic Change*. Kluwer Academic Publishers. 2004. P. 41–58.
5. Polonsky A. The Ocean's Role in Climate Change // Cambridge Scholars Publishing. Newcastle-Upon-Tyne, UK. 2019. 294 p.
6. *Laboratory and Numerical Studies of Waves, Currents and Sediment Transport at the Deepwater Navigation Channel in the "Bystroe"* / M. Zheleznyak, V. Khomitsky, S. Kivva [et al.] // *Arm of the Danube Delta ICCE-2006, Book of abstracts*, San Diego, California, USA, 2–8 September 2006. P. 400.
7. Полонский А.Б., Фомин В.В., Гармашов А.В. Характеристики ветрового волнения Черного моря // *Доклады НАН Украины*. 2011. № 8. С. 108–112.
8. *Ветер и волны в океанах и морях: справочные данные* / [под ред. И.Н. Давидана]. Ленинград. Транспорт. 1974. 360 с.
9. Ржеплинский Г.В., Назаретский Л.Н. Расчет режима волнения шельфовых акваторий на примере Черного моря // *Метеорология и гидрология*. 1974. № 1. С. 63–68.
10. Кабатченко И.М. Исследование режима штормовых ветров и волн на примере Черного моря: дис. канд. геогр. наук: 11.00.08. Москва. 1984. 136 с.
11. Ефимов В.В., Комаровская О.И. Атлас экстремального ветрового волнения Черного моря. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. 59 с.
12. *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.
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. V. 14. Is. 5. P. 1861–1871. DOI:10.1007/s10113-013-0546-z.
14. Divinsky B.V., Kosyan R.D. Spatio-temporal variability of the Black Sea wave climate in the last 37 years // *Cont. Shelf Res*. 2017. V. 136, P. 1–19. Doi.org/10.1016/j.csr.2017.01.008.

15. *Ветро-волновые условия прибрежной зоны Азово-Черноморского региона* / В.П. Евстигнеев, В.А. Наумова, Е.Н. Воскресенская [и др.] // Севастополь: ИПТС. 2017, 320 с.
16. *Holthuijsen L. Waves in oceanic and coastal waters.* Cambridge University Press, 2007. [https:// doi.org/10.1017/CBO9780511618536](https://doi.org/10.1017/CBO9780511618536)
17. *Van Rijn L.C. Sediment transport, Part II: Suspended load transport* // Journal of Hydraulic Engineering. 1984. V. 110. No 11. P. 1613–1641.
18. *Отчет о научно-исследовательской работе «Исследование направленности и интенсивности эрозийных процессов в береговой зоне Черного и Азовского морей в связи с изменением климата» («ЭРБЕР», руководитель работ – А.Б. Полонский).* Севастополь, 2013. 222 с.
19. *The JRA-25 Reanalysis* / K. Onogi, J. Tsutsui, H. Koide [et al.] // Journal of the Meteorological Society of Japan. 2007. V. 85. P. 369–432.
20. *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.
21. *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.
22. *Wittenberg A.T., Rosati A. Lau N-Ch., Ploshay J.J. GFDL's CM2 global coupled climate models. Part III: Tropical pacific climate and ENSO* // J. of Climate. 2006. V. 19. P. 698–722.
23. *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 1: RECENT CLIMATE

M.I. Zheleznyak¹, A.B. Polonsky^{2,3,4}

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

²Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

³Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

⁴Sevastopol Branch of Moscow State University, RF, Sevastopol, Sevastopol Hero St., 7

Wind-wave and lithodynamic characteristics of shallow waters of the Black Sea near Western Crimea during the period from 1979 to 2008 are calculated. Original COD of Institute of the Problems of Math Machines and System of National Academy of Sciences of Ukraine and JRA re-analysis are used. As the first step, the wave field in the entire Black Sea basin 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. Quite good results concerning the climatic seasonal variability of the wind-wave fields are obtained. They are well-agreed with the observational data. It is concluded, that the utilized method can be successfully applied for the regional projections of the wind-wave and lithodynamic characteristics using the output of the climatic models.

Keywords: modeling, re-analysis, Black Sea wind-wave climate.