УДК 551.466; 551.46.09

Б.В.Дивинский

Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, г.Москва

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОД В РАЙОНЕ БАКАЛЬСКОЙ КОСЫ

Анализируется изменчивость параметров ветрового волнения и морских течений в районе Бакальской косы. Основной метод исследований – математическое моделирование, с помощью которого выявлены характерные особенности изменчивости параметров ветрового волнения на климатическом отрезке времени (1979 – 2017 гг.), а также оценены внутригодовые вариации скоростей течений. Наиболее характерные особенности климатической изменчивости ветрового волнения: уменьшение повторяемости штормов западных – юго-западных направлений; весьма существенное уменьшение средних высот волн при штормах северных – северо-западных и южных – юго-западных направлений; некоторое увеличение высот волн при волнении западных – северо-западных и северных – северо-восточных румбов. Для западной части косы в среднем за год штормовое волнение (превышающее по мощности 5 кВ/м) продолжается около 14 суток, для восточной (> 2 кВ/м) – 9 суток. Наибольшей повторяемостью (до 15 % в рамках годового цикла) обладают течения, направленные со стороны открытого моря в Каркинитский залив. Обратный поток (с северо-востока на юго-запад) наблюдался в 10 % случаев (данные за 2016 г.). Максимальные значения скоростей течений возможны, в основном, в зимний период и могут достигать 0,7 м/с. Приводятся результаты натурного эксперимента по исследованию морских течений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *ветровое волнение, морские течения, ADCP, Бакальская коса, Крым*

doi: 10.22449/2413-5577-2018-4-31-39

Географическое положение Бакальской косы определяет специфику ее гидродинамического режима [1]. Для западной и восточной частей косы условия волнообразования и режим течений существенно различны. Исходя из этого, выделим основные задачи настоящего исследования:

1) анализ климатической изменчивости основных параметров ветрового волнения за период с 1979 по 2017 гг. в западной и восточной морских акваториях, прилегающих к косе;

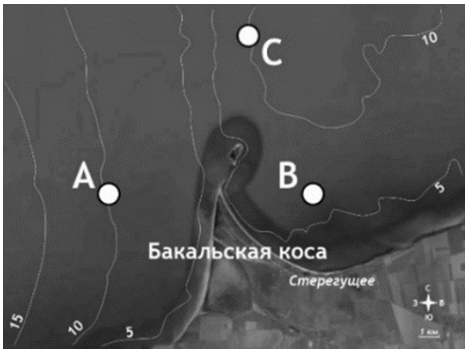
2) оценка изменчивости характеристик течений в рамках годового хода;

3) анализ результатов натурного эксперимента по исследованию течений в районе Бакальской косы.

Отметим, что для условий морской акватории, прилегающей к Бакальской косе, подобные задачи ставятся впервые. Предыдущие исследования ветрового волнения, близкие по тематике [2, 3, 5 – 7], либо ограничены рассмотрением только конкретных штормовых ситуаций, либо оперируют данными визуальных наблюдений, либо отнесены к достаточно отдаленным от косы точкам западного побережья. Режим течений ранее не исследовался.

В акватории вод, омывающих Бакальскую косу, выбраны три характер-

© Б.В.Дивинский, 2018



Р и с . 1 . Точки расчета гидродинамических параметров.

ные точки (рис.1). Особенности волнового климата рассматривались отдельно для западной (точка А) и восточной (точка В) частей косы. Режим течений оценивался в открытой акватории (точка С).

Отправной точкой математического моделирования гидродинамических условий является задание полей ветра. Для этого воспользуемся картами компонентов приземного ветра, предоставляемые Европейским центром среднесрочных прогнозов в виде массива данных глобального атмосферного реанализа *ERA-Interim*. Анализ *ERA-Interim* доступен с 1979 г. по текущее время и содержит более ста параметров, характеризующих состояние атмосферы и океана.

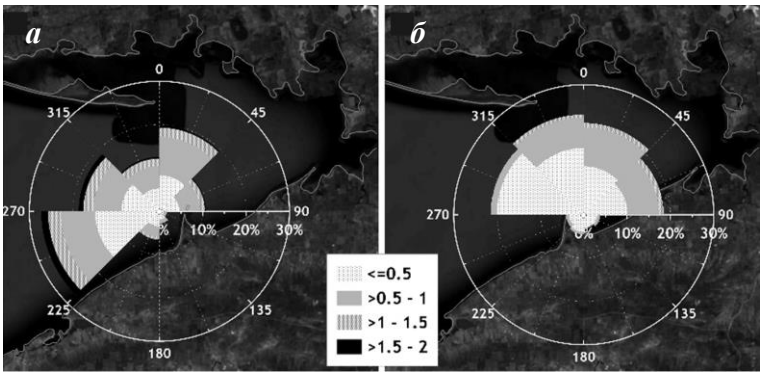
В нашем случае пространственное разрешение составляет 0,25°, что дает в итоговом гриде для бассейна Черного и Азовского морей 61 точку по долготе и 29 точек по широте. Шаг по времени составляет 3 часа. Этого вполне достаточно для корректного воспроизведения синоптической обстановки.

Ветровое волнение. Для моделирования трансформации волнового поля используется современная спектральная модель *DHI MIKE SW* [9]. В модели в полной мере реализованы этапы зарождения, затухания и трансформации ветровых полей. Модель с успехом может применяться как для открытых акваторий, так и в прибрежной зоне.

Модель верифицирована с привлечением большого массива экспериментальных данных [8].

На рис.2 представлены розы ветрового волнения в терминах значительных высот волн для западной и восточной части акватории вод, омывающих Бакальскую косу.

Как следует из рис.2, западная часть косы находится под преимущественным воздействием ветрового волнения западного – юго-западного направления. Западный сектор волнения характеризуется и максимальным штормовым волнением с высотами значительных волн, превышающими 2 м.



Р и с . 2 . Розы ветрового волнения (м) в точках *А* (*а*) и *В* (*б*).

К востоку от Бакальской косы повторяемость волнения западных, северных и восточных румбов практически одинакова. При этом волнение западного – северо-западного направления представляет собой ослабленную в результате дифракции зыбь из открытого моря; волнение с высотами 1,0 – 1,5 м северного – северо-восточного и восточного – северо-восточного направлений формируется на относительно небольших разгонах (~ 30 км) Каркинитского залива.

Вдольбереговые потоки наносов, определяющие морфологический облик Бакальской косы, вызываются штормовым волнением южного – юго-западного, западного – юго-западного, западного – северо-западного, северного – северо-западного направлений для западной части акватории и волнением северного – северо-восточного, восточного – северо-восточного, восточного – юго-восточного и южного – юго-восточного румбов – для восточной. Для указанных румбов рассчитаны соответствующие повторяемости направлений волнения и средние величины значительных высот волн по этим направлениям за период с 1979 по 2017 гг. (рис.3).

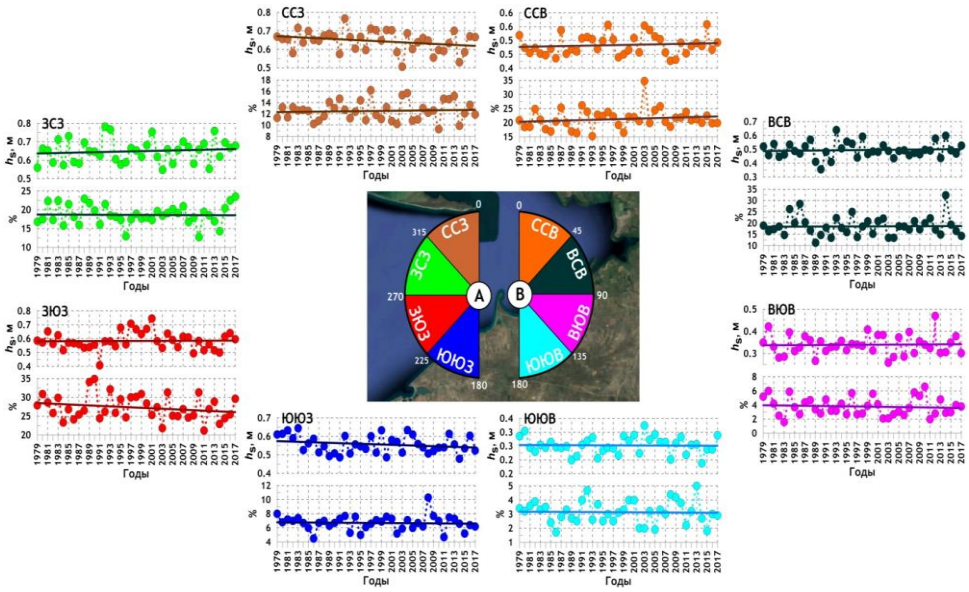
Если рассматривать трендовые составляющие, то наиболее характерными особенностями климатической изменчивости ветрового волнения за период с 1979 по 2017 гг. в районе Бакальской косы являются:

− уменьшение повторяемости штормов западных – юго-западных направлений;

− весьма существенное уменьшение средних высот волн при штормах северных – северо-западных и южных – юго-западных направлений;

− некоторое увеличение высот волн при волнении западных – северо-западных и северных – северо-восточных румбов.

Южные – юго-восточные и восточные – юго-восточные направления характеризуются малой повторяемостью и, в целом, незначительным волнением.



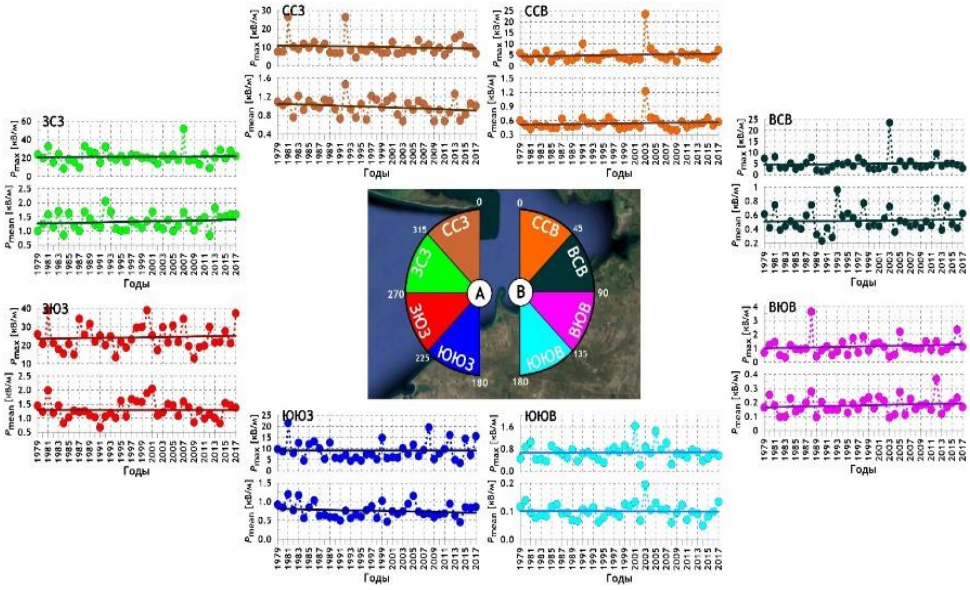
Р и с . 3 . Повторяемости ветрового волнения (%) и средние величины значительных высот волн (м) за период 1979 – 2017 гг.

Удобной характеристикой штормовой активности выступает мощность ветрового волнения, поскольку мощность является функцией одновременно двух основных интегральных параметров ветрового волнения (высоты и периода), а также характеризует именно энергетическую ценность штормов. На рис.4 представлены среднегодовые (P_{mean}) и максимальные для каждого года (P_{max}) значения мощности поверхностного волнения в точках А и В за период 1979 – 2017 гг.

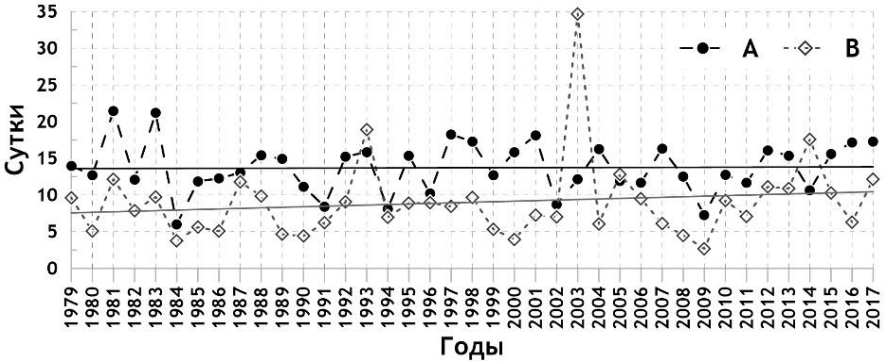
Средние значения мощности, в общем, невелики. Для точки А они составляют порядка 1 кВ/м, для точки В – 0,5 кВ/м. Однако в отдельные годы может развиваться штормовое волнение, в разы превосходящее по энергетике средние шторма. Подобные экстремальные события во многом определяют литодинамический облик косы.

Для западной части косы (точка А) наиболее сильные шторма наблюдались: в 1981 и 1992 гг. (северные – северо-западные направления); 2007 г. (западные – северо-западные); 1981, 2000 и 2017 гг. (западные – юго-западные); 1981 и 2008 гг. (южные – юго-западные). Шторм 2007 г. обладал наибольшей мощностью за весь рассматриваемый период, составившей почти 60 кВ/м. В восточной части косы (точка В) штормовая активность, естественно, более умерена. Тем не менее, в 2003 г. наблюдались шторма северных – северо-восточных направлений с максимальной мощностью, почти в 5 раз превосходившей среднюю.

Кроме непосредственно мощности, представляет интерес такая характеристика волнения, как продолжительность действия. Под продолжительностью штормового волнения (в рамках годового цикла) будем понимать суммарное время превышения кривой хода мощности некоторого порогового значения. Для западной части косы в качестве порогового определено



Р и с . 4 . Максимальные за каждый год (P_{max}) и среднегодовые (P_{mean}) мощности поверхностного волнения (кВ/м) за период 1979 – 2017 гг. по разным секторам волнения.



Р и с . 5 . Продолжительности штормов (в сутках) для каждого года за период 1979 – 2017 гг.

значение волновой мощности в 5 кВ/м, для восточной – 2 кВ/м. На рис.5 представлены продолжительности штормов (в сутках) для каждого года за период 1979 – 2017 гг. в точках А и В.

Для западной части косы в среднем за год штормовое волнение (превышающее по мощности 5 кВ/м) продолжается около 14 суток, для восточной (> 2 кВ/м) – 9 суток. Для точки В снова обращает на себя внимание 2003 г., который характеризуется не только максимальными мощностями поверхностного волнения, но и наибольшей продолжительностью (почти 35 суток, т.е. больше месяца).

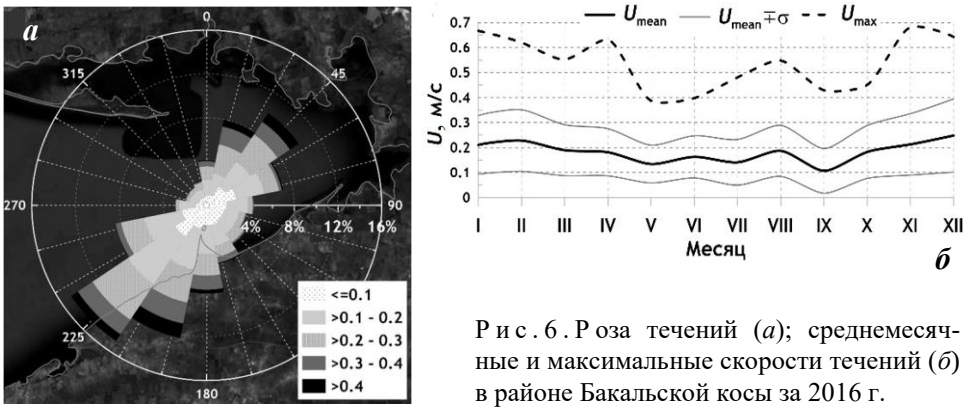
В западной части косы (точка А) в последние годы развиваются шторма суммарной продолжительностью больше 15 суток (т.е. больше средних показателей). Кроме того, в точке В наблюдается межгодовая (климатическая) тенденция к увеличению продолжительности штормов. В точке А заметные тренды по продолжительности штормового волнения не обнаружены.

Течения. В отличие от волновых, гидродинамические модели являются более сложными в плане численной реализации основных физических явлений, а также на порядок величины требовательнее в вычислительном смысле. По этой причине в настоящей работе исследуется только один календарный год (2016 г.).

При анализе используется модель *DHI MIKE* 21/3 *Coupled Model FM* [9], многокомпонентная вычислительная система, направленная на исследование широкого круга задач прибрежной гидродинамики. В состав системы входят несколько взаимосвязанных модулей, из которых отметим собственно гидродинамический (модель течений) и волновой модули. Объединение моделей, с одной стороны, приводит к существенному увеличению общего времени счета, с другой – позволяет в более полной форме описывать гидродинамику вод.

Счет – сквозной за весь 2016 г. Начало счета 1 ноября 2015 г. с нулевыми начальными условиями по скоростям.

Верификация гидродинамической модели производилась по материалам натурных наблюдений, выполненных акустическим доплеровским измерителем скорости течения *ADCP WH*-600, входящими в состав подспутникового полигона. Полигон функционирует на шельфе и континентальном склоне Черного моря в районе г.Геленджика [4]. *ADCP WH*-600 входит в состав донной станции, расположенной на траверзе Голубой бухты на расстоянии



Р и с . 6 . Р оза течений (*а*); среднемесячные и максимальные скорости течений (*б*) в районе Бакальской косы за 2016 г.

900 м от берега (глубина 22 м). Измерительный комплекс позволяет в автономном режиме с заданной дискретностью регистрировать скорости и направления течений в слое воды от поверхности до дна. Отметим также, что данный полигон – единственный в своем роде на Черном море.

Расчетная роза течений для акватории Бакальской косы (точка С, рис.1) представлена на рис.6, *а*; на рис.6, *б* приведены среднемесячные и максимальные скорости течений.

Наибольшей повторяемостью (почти 15 % в рамках годового цикла) обладают течения, направленные со стороны открытого моря в Каркинитский залив. Обратный поток (с северо-востока на юго-запад) наблюдался в 10 % случаев. Эти же направления характеризуются и наибольшими скоростями течений, превышающими 0,6 м/с.

Достаточно большие среднемесячные значения скоростей течений (порядка 0,15 м/с) свидетельствуют о том, что Бакальская коса подвержена активному гидродинамическому воздействию, причем, как следует из рис.6, большей частью с ее западной стороны. Максимальные значения скоростей течений наблюдаются, в основном, в зимний период и могут достигать 0,7 м/с.

Данные 2016 г. не могут, естественно, рассматриваться в климатическом контексте, тем не менее, проведенные расчеты дают представление о характере морских течений в рассматриваемой области.

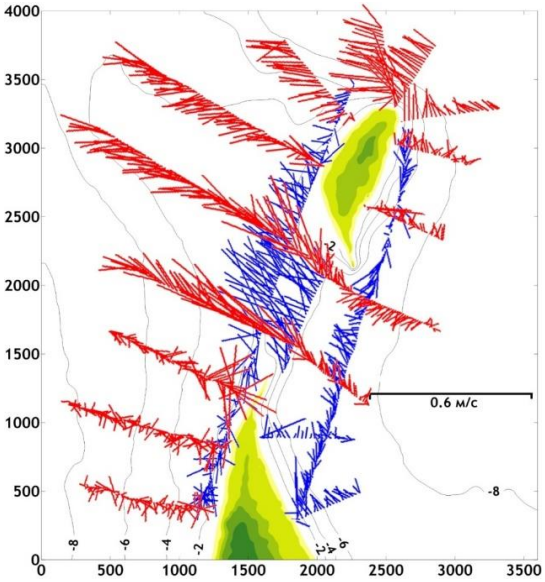
Натурный эксперимент по исследованию течений. Первый (и пока единственный) эксперимент по исследованию пространственной структуры течений в акватории Бакальской косы был проведен 15 – 16 июня 2018 г. Профилирование течений выполнено с помощью современного измерителя скорости течений *ADCP WorkHorse Rio Grande* 600, который позволяет в режиме реального времени с борта движущегося судна получать профили течений (три компоненты скорости движения и направление) и дна в диапазонах глубин 0 – 45 м с привязкой к географическим координатам.

Исследуемый район (его подводная часть) обладает некоторыми батиметрическими особенностями. Западная часть подводного склона косы представляет собой мелководное плато, в то время как восточной части наблюдается резкий свал глубин до 7 м.

Всего было пройдено 19 разрезов: 16 поперечных к берегу и 3 продольных. 15 июня выполнены разрезы с 01 по 14, 16 июня – с 15 по 19. Метеорологическая обстановка в период проведения эксперимента характеризо-

валась слабыми ветрами переменных направлений с преобладанием северо-восточных и западных румбов; максимальные высоты волн не превышали 0,6 м. Несмотря на быструю смену господствующих ветров, их локальный характер с незначительными скоростями позволяет оценивать съемку 15 – 16 июня как квазисинхронную.

На рис.7 представлены экспериментальные векторы течений, отложенные вдоль пройденных разрезов. Красным цветом на рисунке выделены данные съемки 15 июня, синим – 16 июня. Для удобства рассмотрения на рис.8 представлена обобщенная схема морских течений.

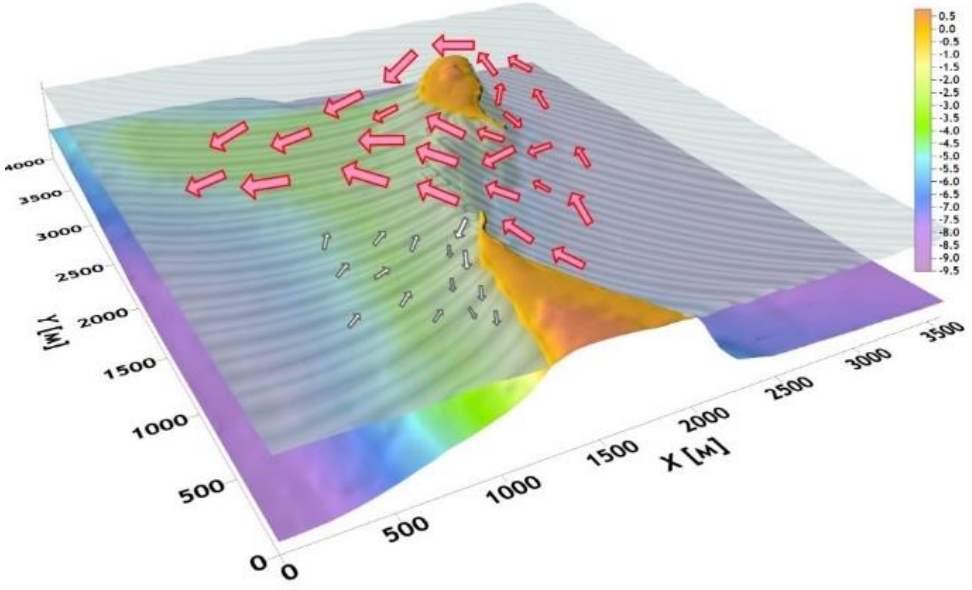


Р и с . 7 . Векторы течений в районе Бакальской косы по данным измерений 15 (*красные стрелки*) и 16 (*синие стрелки*) июня 2018 г.

Выделим основные особенности течений:

− преобладающий поток направлен из Каркинитского залива в открытое море;

− в районе прорана (между северной оконечностью косы и островом) наблюдались самые сильные течения со скоростями порядка 0,5 м/с;



Р и с . 8 . Обобщенная схема течений в районе Бакальской косы 15 – 16 июня 2018 г.

течение огибает остров с севера и юга и далее соединяется в единый поток. Подобное поведение, возможно, объясняет присутствие обширного мелководного плато в западной части острова. Течения, направленные с юго-запада (и наиболее обеспеченные в рамках годового хода) интенсивно перемещают донный материал вдоль по склону с юга на север. В дальнейшем, при смене генерального направления течений на северо-восточное, мощное течение выносит донные отложения в тыловую (для северо-восточного направления) часть острова и распределяет их далее на запад;

− на западном мелководном склоне косы зафиксированы относительно слабые течения магнитудой порядка 0,1 м/с, направленные на юг в районе уреза и на северо-восток на глубинах 1,5 – 2,0 м.

С необходимостью отметим следующее: работа *ADCP* на мелководье в присутствие даже незначительного волнения сталкивается с неопределенностями в интерпретации акустических сигналов. Тем не менее, полученные результаты свидетельствуют о правильности общего подхода к планированию эксперимента (наличие поперечных и продольных профилей), а также корректности установок программного обеспечения.

Заключение. В результате проведенной работы:

− выполнен анализ климатической изменчивости основных параметров ветрового волнения за период с 1979 по 2017 гг.;

− оценена изменчивость характеристик морских течений в рамках годового хода;

− проанализированы данные натурного эксперимента по исследованию течений в районе Бакальской косы.

Наиболее характерными особенностями климатической изменчивости ветрового волнения за период с 1979 по 2017 гг. в районе Бакальской косы являются: уменьшение повторяемости штормов западных – юго-западных направлений; весьма существенное уменьшение средних высот волн при штормах северных – северо-западных и южных – юго-западных направлений; некоторое увеличение высот волн при волнении западных – северо-западных и северных – северо-восточных румбов. Для западной части косы в среднем за год штормовое волнение (превышающее по мощности 5 кВ/м) продолжается около 14 суток, для восточной (> 2 кВ/м) – 9 суток.

Бакальская коса подвержена весьма активному гидродинамическому воздействию. Наибольшей повторяемостью (до 15 % в рамках годового цикла) обладают течения, направленные со стороны открытого моря в Каркинитский залив. Обратный поток (с северо-востока на юго-запад) наблюдался в 10 % случаев (данные за 2016 г.). Максимальные значения скоростей течений возможны, в основном, в зимний период и могут достигать 0,7 м/с.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект №14-17-00547). Математическое моделирование волнового климата выполнено при поддержке РФФИ (проект №18-05-80035).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горячкин Ю.Н., Косьян Р.Д.* Бакальская коса – уникальный природный объект крымского полуострова (обзор) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.– 2018.– № 4.– С.5-14.

2. *Горячкин Ю.Н., Репетин Л.Н.* Штормовой ветро-волновой режим у черноморского побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2009.– вып.19.– С.56-69.
3. *Горячкин Ю.Н., Удовик В.Ф., Харитонова Л.В.* Оценки параметров потока наносов у западного берега Бакальской косы при прохождении сильных штормов в 2007 году // Морской гидрофизический журнал.– 2010.– № 5.– С.42-51.
4. *Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В., Низов С.С., Пиотух В.Б., Соловьев В.А., Швоев Д.А., Цибульский А.Л., Куклев С.Б., Куклева О.Н, Москаленко Л.В., Подымов О.И., Баранов В.И., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кубряков А.А., Соловьев Д.М., Станичный С.В.* Подспутниковый полигон для изучения гидрофизических процессов в шельфово-склоновой зоне Черного моря // Изв. РАН. ФАО.– 2014.– т.50, № 1.– С.16-29.
5. *Наумова В.А., Евстигнеев М.П., Евстигнеев В.П., Любарец Е.П.* Ветро-волновые условия Азово-Черноморского побережья Украины // Научные труды УкрНИГМИ.– 2010.– вып.259.– С.263-283.
6. *Фомин В.В., Алексеев Д.В., Харитонова Л.В.* Моделирование морфодинамики Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2013.– вып.27.– С.374-380.
7. *Харитонова Л.В., Фомин В.В.* Статистические характеристики ветрового волнения в прибрежной зоне Западного Крыма по данным ретроспективных расчетов за 1979–2010 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, 2012.– вып.26, т.1.– С.24-33.
8. *Divinsky B.V., Kosyan R.D.* Spatiotemporal variability of the Black Sea wave climate in the last 37 years // Continental Shelf Research.– 2017.– v.136.– P.1-19.
9. *DHI* Water&Environment. MIKE 3, Spectral Wave Module.– 2007.

Материал поступил в редакцию 20.09.2018 г.

B.V.Divinsky

HYDRODYNAMIC WATER CONDITIONS IN THE BAKALSKAYA SPIT AREA

The variability of wind waves parameters and sea currents in the Bakalskay Spit area is analyzed. Using the main research method as mathematical modeling, the characteristic features of wind wave variability on the climatic time interval (1979 – 2017) are revealed, as well as the intra-annual variations of current velocity are estimated. The most characteristic features of the climatic variability of wind waves are: a decrease in the frequency of western to southwestern storms; a very significant decrease in the average wave heights during northern-northwestern and southern-southwestern storms; some increase in the wave heights during western-northwestern and northern-northeastern storms. Near the western part of the spit, on average for a year, storm waves (exceeding 5 kV/m) lasts about 14 days, for the eastern (> 2 kV/m) 9 days. The greatest frequency (up to 15 % within the annual cycle) has currents directed from the open sea to the Karkinitsky Bay. The reverse flow (from northeast to southwest) was observed in 10 % cases (in 2016). The maximum currents are possible, mainly, in winter and can reach 0,7 m/s. The results of a full-scale experiment on the sea currents study are also presented.

KEYWORDS: wind waves, sea currents, ADCP, the Bakalskaya Spit, the Crimea