

Гидродинамические условия деградации Бакальской косы (Западный Крым)

Б. В. Дивинский , Р. Д. Косьян

Институт океанологии им. П. П. Шириова РАН, Москва, Россия

 divin@ocean.ru

Поступила в редакцию 04.09.2020 г., после доработки – 27.10.2020 г.

Цель. Цель работы – исследование морфодинамических особенностей развития Бакальской косы под воздействием морского ветрового волнения и зыби: оценка межгодовых вариаций площадей намывов (размывов) береговой линии Бакальской косы; анализ межгодовой изменчивости параметров ветрового волнения; определение характеристик поверхностного волнения (или сочетаний нескольких), ответственных за процессы эрозии или аккумуляции донного материала в прибрежной зоне.

Методы и результаты. На основе анализа спутниковых снимков за 1984–2016 гг. определены площади намывов или размывов береговой линии Бакальской косы. С использованием спектральной волновой модели получены временные ряды основных параметров ветрового волнения и зыби (значительные высоты волн, направления распространения) в прибрежной зоне Бакальской косы за 1984–2016 гг. с дискретностью по времени 1 ч. С помощью дискриминантного анализа определены характеристики поверхностного волнения, ответственные за процессы деформации береговой линии.

Выводы. Анализ спутниковых снимков косы позволил выделить три периода в истории развития Бакальской косы: 1985–1997, 1998–2007 и 2007–2016 гг. Первый период – промежуток относительной стабильности. В 1998 г. произошел сильнейший размыв, после чего в течение 10 лет чередовались случаи намыва и размыва со слабой тенденцией к общему размыву. В 2007 г. наступил третий период, который можно определить как период деградации косы, сопровождающийся безвозвратной потерей пляжевого материала. В качестве основных параметров, определяющих гидродинамику акватории Бакальской косы, выбраны: суммарная продолжительность штормов; средние и максимальные значительные высоты ветровых волн и зыби. Статистические характеристики параметров ветрового волнения испытывают довольно сильную межгодовую изменчивость. Согласно средним и максимальным показателям, наиболее развито ветровое волнение с направлениями, близкими к нормали к береговой линии (ЗЮЗ и ЗСЗ). Применение дискриминантного анализа позволило с высокой статистической достоверностью заключить, что направление итогового (среднегодового) волнового воздействия на прибрежную зону, определяющего происходящие в ней процессы (эрозию или аккумуляцию песка), задается волнением ССЗ направлений, причем вклад зыби является преобладающим. Степень воздействия определяется сильными штормами с направлениями, близкими к нормали к береговой линии, а именно ЗЮЗ.

Ключевые слова: математическое моделирование, MIKE 21 SW, ветровые волны, зыбь, Бакальская коса, морфодинамика

Благодарности: постановка задачи выполнена в рамках проекта РНФ № 20-17-00060, анализ экспериментальных данных – благодаря финансовой поддержке РФФИ (проекты № 18-05-00333 и 20-05-00009), математическое моделирование и вычислительная часть – при поддержке грантов РФФИ (проекты № 19-05-00041 и 19-45-230002). Анализ результатов выполнен в рамках программы № 0149-2019-0014 и проекта РФФИ № 18-05-80035.

Для цитирования: Дивинский Б. В., Косьян Р. Д. Гидродинамические условия деградации Бакальской косы (Западный Крым) // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 3. С. 288–304. doi:10.22449/0233-7584-2021-3-288-304

© Дивинский Б. В., Косьян Р. Д., 2021

Hydrodynamic Conditions of the Bakalskaya Spit Degradation (Western Crimea) over the Past 30 Years

B. V. Divinsky , R. D. Kosyan

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

 *divin@ocean.ru*

Purpose. The paper is aimed at studying the morphodynamic features of the Bakalskaya Spit evolution being influenced by the sea wind waves and swell, namely assessment of inter-annual variations in the alluvial (erosion) areas of the Bakalskaya Spit coastline, analysis of inter-annual variability of the wind wave parameters, determination of the surface wave characteristics (or a combination of a few ones) responsible for the processes of the bottom material erosion or accumulation in the coastal zone.

Methods and Results. Based on the analysis of satellite images for 1984–2016, the areas of the bottom material accumulation or erosion of the Bakalskaya Spit coastline were determined. Application of the spectral wave model permitted to obtain time series of the main parameters of wind waves and swell (significant wave heights and propagation directions) in the Bakalskaya Spit coastal zone with the 1 hr time resolution for the period from 1984 to 2016. The characteristics of surface waves responsible for the coastline deformation were revealed using the discriminant analysis.

Conclusions. Analysis of satellite images of the spit made it possible to distinguish three periods in the history of the Bakalskaya Spit evolution: 1985–1997, 1998–2007 and 2007–2016. The first period was characterized by relative stability. The strongest erosion took place in 1998; after that the alluvial and erosion cases alternated for 10 years weakly tending to general erosion that constituted the second period. The third one that began in 2007 can be defined as the period of spit degradation accompanied by the irreversible loss of beach material. The basic parameters conditioning hydrodynamics of the Bakalskaya Spit water area are: total duration of storms; average and maximum values of significant heights of wind waves and swell. Statistical characteristics of the wind waves' parameters are of a fairly strong inter-annual variability. According to the average and maximum indices, the wind waves directed close to the normal to the coastline (WSW and WNW) are the most developed. The applied discriminant analysis permitted to draw a statistically reliable conclusion that the direction of the final (average annual) wave impact on the coastal zone, conditioning the processes of sand accumulation or erosion was set by the waves directed to NNW, at that the swell contribution was dominant. The impact degree is conditioned by strong storms with the directions close to the normal to the coastline, namely, the WSW ones.

Keywords: mathematical modeling, *MIKE 21 SW*, wind waves, swell, Bakalskaya Spit, morphodynamics

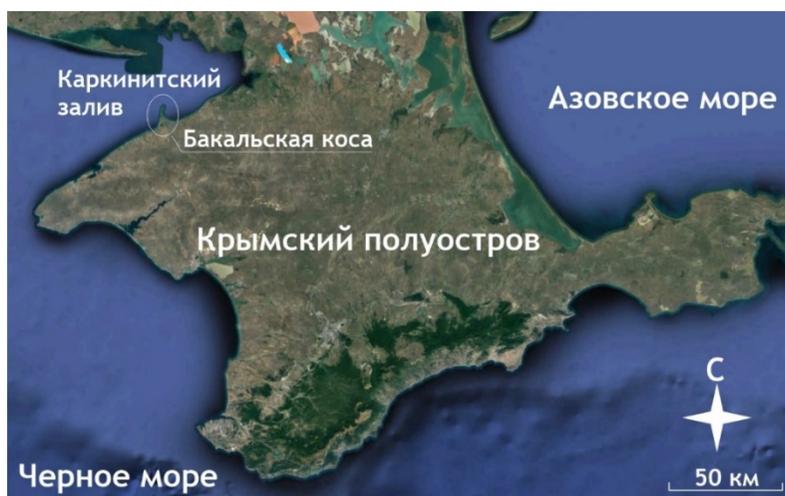
Acknowledgements: the problem was formulated within the framework of the RSF project No. 20-17-00060, the experimental data were analyzed thanks to the RFBR financial support (projects No. 19-05-00041 and 19-45-230002). The results were analyzed within the framework of program No. 0149-2019-0014 and the RFBR project No. 18-05-80035.

For citation: Divinsky, B.V. and Kosyan, R.D., 2021. Hydrodynamic Conditions of the Bakalskaya Spit Degradation (Western Crimea) over the Past 30 Years. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(3), pp. 266–281. doi:10.22449/1573-160X-2021-3-266-281

Введение и постановка задачи

Бакальская коса – аккумулятивная песчаная форма длиной ~ 8 км, расположенная на южном побережье Каркинитского залива Черного моря (рис. 1). В 2000 г. коса вошла в состав ландшафтно-рекреационного парка «Бакальская коса» площадью 1550 га, закрепив за собой статус уникального природного объекта. При этом историю развития Бакальской косы за последние 30 лет вполне можно назвать драматичной. На фоне общего истощения

пляжевого материала перешеек, соединяющий материковую часть с северной оконечностью, несколько раз размывался, затем восстанавливался, пока в 2010 г. не отделился окончательно, образовав при этом остров [1].



Р и с. 1. Географическое положение Бакальской косы
F i g. 1. Geographical position of the Bakalskaya Spit

В последние годы значительно интенсифицировались исследования по проблематике Бакальской косы. Выделим несколько основных, на наш взгляд, публикаций, касающихся гидродинамических аспектов переформирования косы, и кратко остановимся на главных результатах исследований.

В работе [2] на основе анализа спутниковых снимков за 1986–2009 гг. оценена скорость смещения западной части косы в акваторию Каркинитского залива, составившая ~ 13 м/год. За указанный период абсолютная величина смещения достигла 300 м. В работе показано, что общая тенденция развития косы определяется процессами, обусловленными возрастающей повторяемостью западных и юго-западных ветров при существенном уменьшении повторяемости ветров северо-западных и северных румбов (позволим себе высказать замечание, что направление ветра и направление волн – не одно и то же). В качестве фактора, обусловившего отделение от Бакальской косы ее дистальной части, называется «аномально высокий уровень моря в этот период» [2, с. 14], но это утверждение не подкрепляется аргументами.

Принимая во внимание, что уровень моря – важный гидродинамический фактор воздействия на прибрежную зону, авторы работы [3] исследовали влияние штормовых нагонов на процессы эрозии и аккумуляции донного материала в районе Бакальской косы. Сделан вывод о том, что, в зависимости от направления волн, нагоны могут приводить как к усилению, так и ослаблению процессов размыва.

В статье [4] исследованы потоки наносов в прибрежной зоне Бакальской косы, а также смоделирована картина отделения дистальной части косы от основного тела в условиях **отдельных** экстремальных штормов. Отметим,

что в 2018 г. вышел специализированный номер журнала «Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря», целиком посвященный экспериментальным исследованиям Бакальской косы, проведенным в 2017 и 2018 гг. сотрудниками Института океанологии им. П. П. Ширшова и Морского гидрофизического института РАН. На основании этих исследований в работах, опубликованных в спецномере журнала, проанализированы различные аспекты **современного** состояния косы.

Климатические характеристики ветрового волнения в акватории Бакальской косы как основного фактора воздействия на прибрежную зону практически не исследовались. Некоторые близкие по тематике исследования [5–8] имеют ограниченный характер (к примеру, основаны на визуальных данных наблюдений за морским волнением, рассматривают конкретные штормовые ситуации или же отнесены к отдаленным от косы точкам западного побережья).

Очевидно, что ретроспективная оценка развития любого побережья требует знания климатических характеристик гидродинамических параметров, влияющих на морфодинамические процессы. Исходя из этого, определим задачи настоящей работы:

- оценить межгодовые вариации площадей намывов (размывов) береговой линии Бакальской косы;
- исследовать межгодовую изменчивость параметров ветрового волнения, при этом разделяя поверхностное волнение на компоненты (ветровые волны и зыбь);
- выявить характеристики поверхностного волнения (или сочетание нескольких), ответственные за процессы эрозии или аккумуляции донного материала в прибрежной зоне.

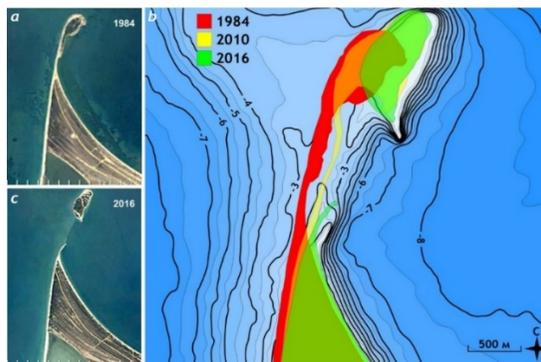
Ранее анализ климатической изменчивости основных параметров смешанного (без разделения) волнения в районе Бакальской косы был выполнен в работе [9]. Важность отдельного рассмотрения ветровых волн и зыби связана с тем обстоятельством, что воздействие компонентов волнения на подводный размываемый склон различно. Как правило, высоты ветровых волн в 2–3 раза превосходят высоты волн зыби. Обрушение ветровых волн приводит к усилению поперечного транспорта донного материала с образованием (трансформацией) подводных баров и выносу материала в сторону моря. Зыбь диссипирует в приурезовой зоне и способствует аккумуляции осадков. К примеру, в условиях Анапской пересыпи [10] вклад зыби во вдольбереговые потоки донного материала может составлять до 50 %, определяя во многом процессы размыва или аккумуляции пляжеобразующего материала вдоль береговой линии.

Материалы и методы

Анализ морфодинамики косы

Ранее проведенные исследования дают некоторое представление о развитии Бакальской косы за последние несколько десятков лет. Что может выступать в качестве характерного параметра трансформации косы? Представляется, что таким параметром может быть площадь косы, точнее, не сама площадь, а отношения (или разности) площадей в разные годы наблюдений.

Для оценки площадей воспользуемся спутниковыми снимками, размещенными в сервисе *Timelapse* на платформе *Google Earth* (URL: <https://earthengine.google.com/timelapse>), которые позволяют проследить трансформацию береговой линии побережья в районе Бакальской косы с 1984 по 2016 г. (рис. 2). Рис. 2, *b* дает представление о том, что мы понимаем под площадью косы: это площадь фигуры, ограниченной статичной (неизменной) южной границей и динамичной береговой линией.



Р и с. 2. Спутниковые карты Бакальской косы за 1984 (*a*) и 2016 (*c*) гг., а также примеры расчетных площадей косы (*b*). Глубины на карте приведены в метрах

F i g. 2. Satellite maps of the Bakalskaya Spit for 1984 (*a*) and 2016 (*c*), and the examples of the spit calculated areas (*b*). The depth on the map is given in meters

Заметим, что точность определения кромки берега зависит от множества факторов: уровня моря, текущего состояния атмосферы, цифровых свойств снимков и т. п. Поскольку в дальнейшем нас будут интересовать не **абсолютные** отметки положения береговой линии, а **разница** между положениями береговой черты в смежные годы, то, на наш взгляд, преимуществом выступает одинаковая методика нахождения береговой линии, применяемая ко всем снимкам. Другими словами, мы предполагаем одинаковую природу ошибок, возникающих при фиксации положения береговой линии по спутниковым снимкам за каждый год. При этом неизбежны, естественно, общие ошибки, минимизация которых возможна путем повышения качества исходных снимков.

Карта глубин построена на основании данных экспедиционных исследований Института океанологии, проведенных в 2018 г. [11] и уточненных в 2019 г. [12]. Отметим, что к настоящему времени это самая подробная карта данного района. Обращает на себя внимание характерная деталь подводного рельефа: относительно мелководная западная часть с обширной подводной банкой в северо-западной части и резкий свал глубин к востоку от косы.

Рис. 2, *b* дает ясное представление об общей картине деградации косы: 1) смещение дистальной части в восточном направлении составило с 1984 г. ~ 300 м; 2) смещение косы по мелководью со сменой режима волнения позволяло ей восстанавливаться; 3) достижение кромки каньона привело к необратимым потерям песка. Перенос песка из западной части акватории в восточную косвенным образом подтверждается гранулометрическим анализом донных отложений.

С целью анализа гранулометрического состава осадков в июне 2019 г. произведены отборы проб (рис. 3). Сортировка песка по крупности описывается в терминах логнормального распределения диаметров частиц d с функцией распределения в виде

$$F(d) = 0,5 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\log \left(\frac{d}{d_{50}} \right)}{\sqrt{2} \log \sigma_d} \right) \right],$$

где erf – функция ошибок; d_{50} – медианный размер частиц; σ_d – геометрическое стандартное отклонение, определяемое как $(d_{84}/d_{16})^{0,5}$.

Особенности гранулометрического состава донных отложений приведены на рис. 3. Пробы грунта взяты в приустьевой части косы с западной (точка 1 на рис. 3, *b*) и восточной (точка 3) стороны, а также непосредственно на мысу (точка 2). Как следует из рис. 3, в западной части косы, примыкающей к проливу, медианный диаметр частиц песка существенно превосходит аналогичный размер частиц в восточной части. Непосредственно в самом проливе (точка 2) кривая гранулометрического состава характеризуется многомодальным распределением, что свидетельствует об интенсивности процессов вовлечения и переработки донных осадков. Указанные особенности могут свидетельствовать о том, что основной механизм транспорта песка в районе пролива заключается в размыве западной части оголовка косы и перемещении переработанного материала в ее восточную часть.

Изложенные соображения указывают на важную деталь: перенос песка вдоль западной части косы до 2010 г. (т. е. до момента окончательного прорыва перешейка) мог носить реверсивный характер, после прорыва часть донных отложений стала безвозвратно направляться в восточную часть.

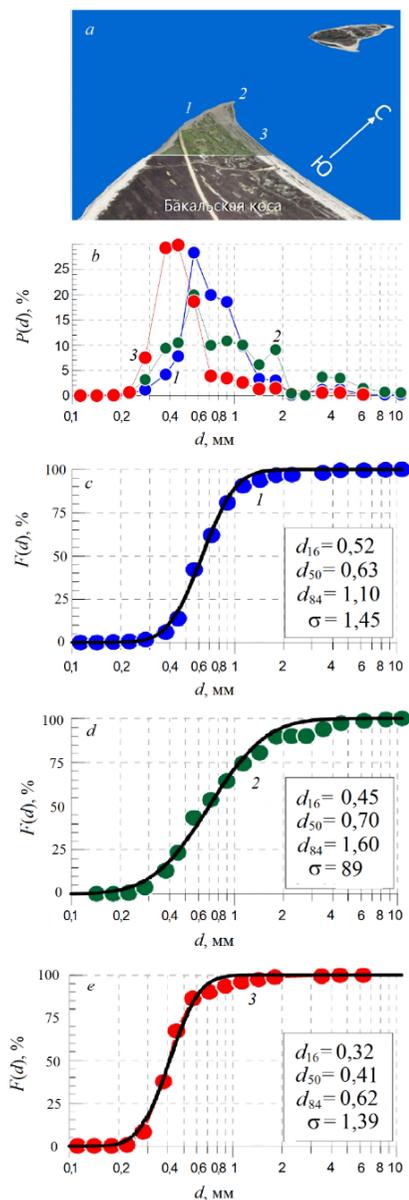
Таким образом, при расчете площадей косы полагаем, что положение береговой линии отражает самые общие (интегральные) процессы эрозии или аккумуляции донного материала под воздействием ветрового волнения.

Параметры ветрового волнения

Современным и эффективным средством исследования параметров поверхностного волнения является математическое моделирование, которое позволяет по исходным полям ветра рассчитывать параметры морского волнения за любой промежуток времени. В нашей работе используется современная спектральная модель *DHI MIKE SW*¹, с успехом применяемая как для открытых акваторий, так и в прибрежной зоне.

В модели в полной мере реализованы этапы зарождения, затухания и трансформации полей ветровых волн с учетом следующих физических механизмов:

¹ MIKE 21. Spectral Wave Module : Scientific documentation. Hørsholm, Denmark : DHI, 2007. 56 p. URL: https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast_and_Sea/M21SW_Scientific_Doc.pdf (date of access: 30.04.2021).



Р и с. 3. Точки забора грунта (а), кривые гранулометрического состава (b) и функции распределения размеров частиц песка, соответствующие пробам из точек забора грунта: 1 (c); 2 (d); 3 (e)

Fig. 3. Points of bottom sampling (a), curves of granulometric composition (b) and functions of the sand particle size distribution corresponding to the samples taken at the points of the bottom sampling: 1 (c); 2 (d); 3 (e)

- рефракции волновых лучей в поле переменной батиметрии и течений;
- дифракции (аппроксимативно);
- блокирования и отражения волн на встречном течении;
- диссипации волновой энергии вследствие донного трения, обрушения и забурунивания;
- трех- и четырехволновых взаимодействий.

Входными параметрами модели являются восточная и северная компоненты приземного ветра, полученные из анализа *ERA-Interim*. Исходные поля ветра покрывают акваторию Черного моря с пространственным разрешением по широте и долготе в $0,25^\circ$. Временная дискретность полей – 3 ч. Ранее модель была успешно верифицирована для условий Черного моря [13] и настроена для автоматического разделения параметров поверхностного волнения на два компонента: ветровые волны и зыбь [14].

В результате проведенных расчетов получены временные ряды основных параметров ветрового волнения и зыби в прибрежной зоне Бакальской косы: значительных высот волн, направлений распространения – за 1984–2016 гг. с дискретностью по времени в 1 ч. Дополнительно для оценки штормовой активности получены значения мощности смешанного волнения. Расчетная точка расположена к западу от центральной части косы на глубине 10 м.

Результаты исследования

Любой анализ, как правило, ограничен некоторыми условностями и неопределенностями. В нашем случае это касается в первую очередь площадей косы, полученных при обработке спутниковых снимков. К сожалению, весьма затруднительной оказалась задача определения даты снимков. Косвенным путем удалось установить, что треть из 32 снимков (с 1984 по 2016 гг.) поверхности Бакальской косы сделаны в летние месяцы. В качестве допущения примем, что все снимки поверхности датируются летом соответствующего года. Конечно, у строгого читателя могут возникнуть сомнения в правомерности подобных допущений, но выражаем надежду, что изложенный в работе **подход** будет полезен и в случае уточнения исходных данных.

Кроме того, анализируются данные по режиму волнения, определенные только для западной части акватории, прилегающей к Бакальской косе. Это обусловлено двумя обстоятельствами: 1) значения всех параметров штормовых ситуаций в западной части значительно выше, чем в восточной [9], так что общая динамика косы почти полностью определяется происходящими в западной части акватории процессами; 2) привлечение дополнительных параметров в этом случае лишь усложняет анализ.

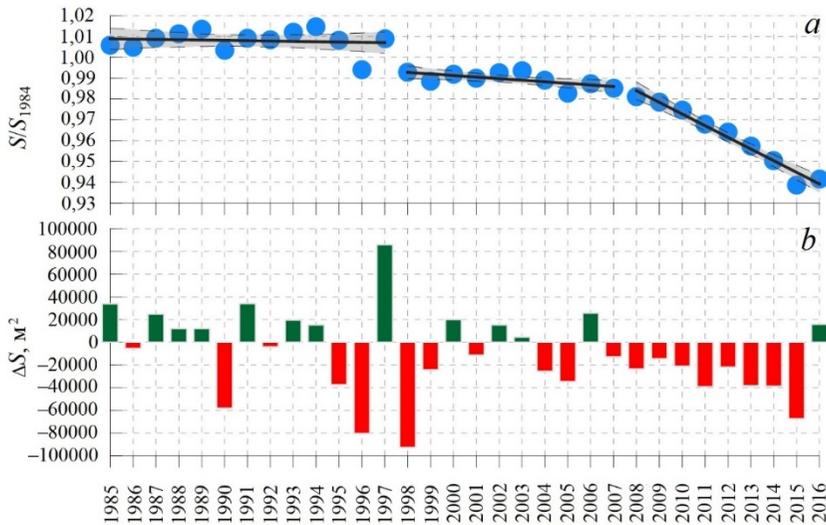
Вначале рассчитываем площади косы за промежуток времени с 1984 по 2016 г.: $S_{1984}, S_{1985}, \dots, S_{2016}$. Определяем разности площадей в смежные годы, к примеру $\Delta S = S_{1985} - S_{1984}$. Полагаем, что ΔS соответствует приросту (или убыли) площади пляжа с сентября 1984 по май 1985 г. (летние месяцы не учитываем по соображениям, изложенным выше). За этот же период (с сентября 1984 по май 1985 г.) рассчитываем статистические характеристики волнения. Таким образом, в выражении, например, «максимальная высота значительных волн в 1985 г.» под словами «1985 г.» понимаем промежуток времени, включающий девять месяцев: осенние месяцы 1984 г., а также зимние и весенние 1985 г. Подобные вычисления проводим для всех смежных лет.

Кроме разности площадей, для иллюстрации общих тенденций развития косы за последние 30 лет вычислим отношения площади косы за каждый год из этого диапазона к ее площади в 1984 г. (рис. 4).

Как следует из рис. 4, *a*, в истории развития Бакальской косы за последние 30 лет можно выделить три периода: 1985–1997, 1998–2007, 2007–2016 гг. Первый период – промежуток относительной стабильности, второй характеризуется чередованием случаев намыва и размыва со слабой тенденцией к общему размыву, третий – период деградации, сопровождающийся безвозвратной потерей пляжевого материала. Действительно экстремальные размывы наблюдались в 1996 и 1998 гг. (рис. 4, *b*). В 1997 г., после катастрофического размыва 1996 г., пляж не только восстановился, но и существенно вырос по площади. Значительные размывы зафиксированы также в 1990 и 2015 гг. Причины эрозии (аккумуляции) пляжевого материала кроются, естественно, в особенностях гидродинамического режима того или иного года.

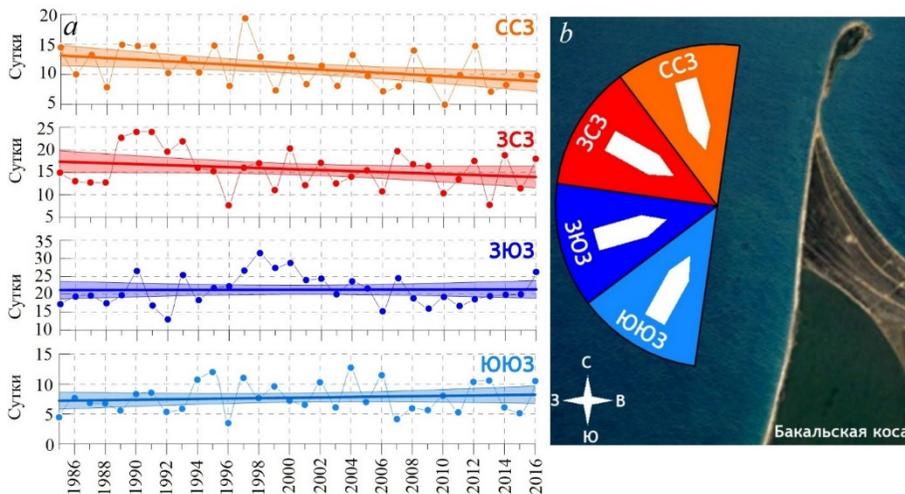
В качестве основных параметров, определяющих гидродинамику акватории Бакальской косы, выберем следующие:

- суммарную продолжительность штормов;
- средние и максимальные значительные высоты ветровых волн и зыби.



Р и с. 4. Морфодинамическая характеристика развития Бакальской косы: *a* – отношение площади косы в данный год к ее площади в 1984 г.; *b* – разность площадей в смежные годы
F i g. 4. Morphodynamic characteristics of the Bakalskaya Spit evolution: *a* – the ratio of the spit area in a given year to its area in 1984; *b* – area differences between the neighbouring years

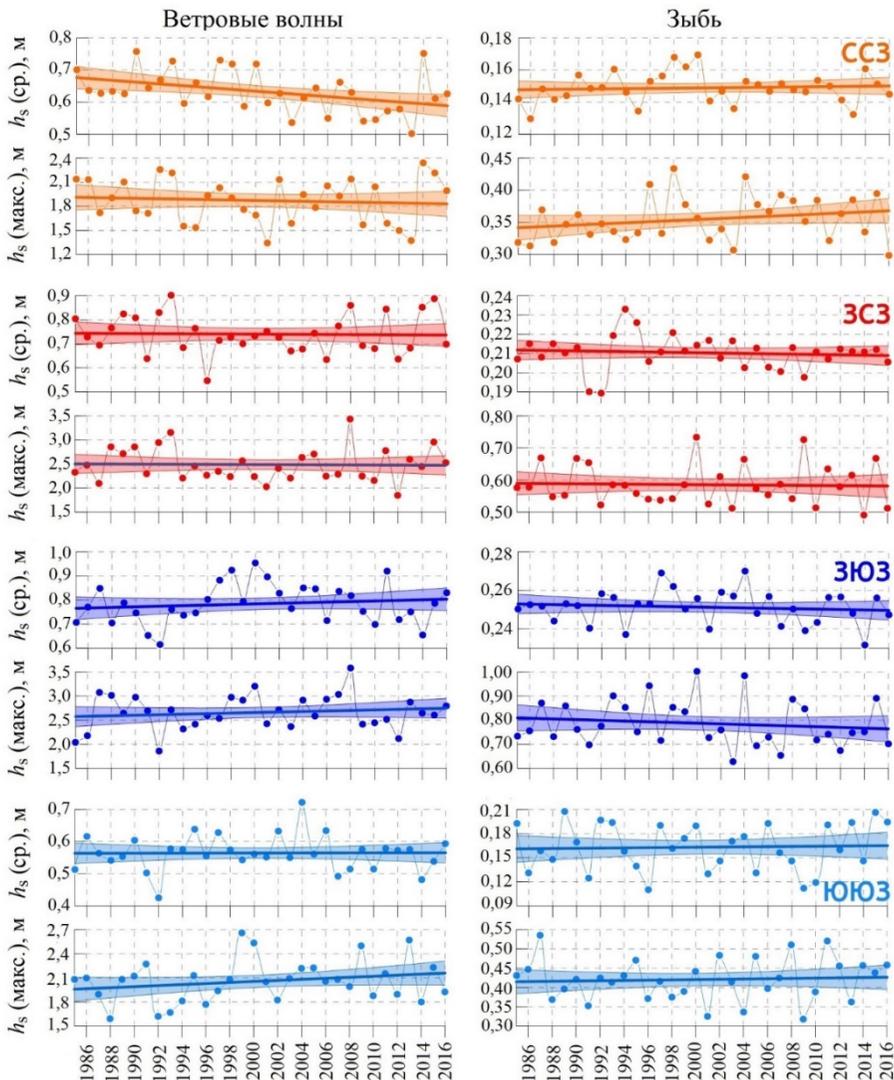
Транспорт донных осадков (поперечный и вдольбереговой) во многом зависит от угла подхода штормового волнения к берегу. Для района западной акватории выделим четыре 45-градусных сектора волнения относительно генерального направления берега (рис. 5, *b*). Два из них (ЗЮЗ и ЗСЗ) близки к нормали к берегу, два (ЮЮЗ и ССЗ) определяют косой поход волн. В дальнейшем все статистические характеристики волнения будем разделять по этим секторам. На рис. 5, *a* приведены суммарные продолжительности штормов в четырех секторах волнения.



Р и с. 5. Продолжительность штормов по секторам волнения (*a*), выделенным по схеме (*b*)
F i g. 5. Storm durations by the wave sectors (*a*) selected according to the scheme (*b*)

Уточним: под началом шторма понимаем превышение кривой хода мощности смешанного волнения значения, равного 1 кВт/м, что соответствует значительной высоте волны $\sim 0,65$ м. Конечно, выбор порогового уровня во многом спорный, однако в нашем случае, во-первых, важно применять одно правило ко всем секторам, слишком различным по штормовой активности, и, во-вторых, желательно получить значимое число штормов.

Статистические характеристики (средние и максимальные) значительных высот волн, полученные, напомним, за 9-месячные промежутки времени, а также соответствующие линейные тренды и 90%-ные доверительные интервалы приведены на рис. 6.



Р и с. 6. Средние и максимальные значительные высоты (м) ветровых волн и зыби по секторам волнения (см. рис. 5, b)

Fig. 6. Average and maximum significant heights (m) of wind waves and swell by the wave sectors (see Fig. 5, b)

Итак, в результате проведенных исследований определены межгодовые площади размывов (намывов) пляжевой зоны Бакальской косы, а также некоторые гидродинамические параметры, характеризующие воздействие поверхностного волнения на прибрежную зону. Необходимо также отметить, что статистика штормов весьма оценочна, так как шторм может начать развиваться в одном секторе, а затухать – уже в другом.

Обсуждение результатов

Вначале дадим общую характеристику режима волнения в западной части акватории Бакальской косы:

- наибольшей продолжительностью характеризуются штормы ЗЮЗ направлений (рис. 6); в среднем штормы этих румбов продолжаются в течение 22 дней. Несколько менее продолжительны штормы ЗСЗ направлений. В целом штормы с направлениями, близкими к нормали к береговой линии (ЗЮЗ и ЗСЗ), превалируют в годовом цикле. Характерная среднегодовая продолжительность шторма ЮЮЗ направлений – около недели, ССЗ – 11 сут;

- статистические характеристики высот морского волнения испытывают довольно сильную межгодовую изменчивость. Согласно средним и максимальным показателям, наиболее развито ветровое волнение с направлениями, близкими к нормали (ЗЮЗ и ЗСЗ). Ветровое волнение ЮЮЗ – в среднем самое слабое, но сильные штормы этих направлений могут сопровождаться волнами, превышающими 2,5 м;

- высоты волн зыби, как правило, в 2–3 раза меньше высот ветровых волн, однако в отдельные годы может наблюдаться зыбь с высотами значительных волн ~ 1 м (ЗЮЗ направлений).

Признаем, что для анализа процессов намыва – размыва береговой линии сами по себе графики межгодовой изменчивости параметров волнения малоинформативны, общие тенденции воздействия (если они присутствуют) трудноуловимы.

К примеру, сильнейший намыв 1997 г. (см. рис. 4) происходил на фоне самых продолжительных за время наблюдений штормов ССЗ направлений (см. рис. 5); в 1998 г. волнение ЗЮЗ румбов продолжалось более месяца и привело (возможно!) к экстремальному размыву. Однако эти детали не носят закономерный характер.

Итак, была произведена оценка площадей межгодовых намывов или размывов, формирующих тело Бакальской косы. Положение береговой линии определяется сочетанием множества факторов: литодинамических (гранулометрический состав осадков), батиметрических (изменение глубин и локальных уклонов дна), гидродинамических (волны, течения, уровень моря). Из всего перечисленного в нашем распоряжении имеются лишь данные о режиме ветрового волнения, полученные модельным путем. Зададимся вопросом: можно ли определить характеристики поверхностного волнения, которые наиболее ответственны за процессы деформации береговой линии в среднегодовом выражении? Здесь мы имеем в виду общую (интегральную) оценку для всей косы, поскольку очевидно, что шторм определенного направления может размывать одну часть косы и перемещать песок в другую

часть, определяя в ней локальный намыв, так что общие потери в этом случае будут почти нулевые.

Ответить на поставленный вопрос попытаемся с помощью дискриминантного анализа – раздела многомерного статистического анализа, позволяющего определять принадлежность объектов к непересекающимся и изначально заданным классам (группам).

Нет, пожалуй, необходимости приводить все детали процедур дискриминантного анализа, великолепный обзор которых изложен в [15]. Сам анализ выполнен в программной среде *Statistica*.

Основная идея дискриминантного анализа заключается в построении особых функций, составленных из линейных комбинаций признаков со своими коэффициентами (вкладами). С помощью дискриминантных функций (ДФ) можно оценить достоверность межгрупповых различий, а также определить признаки, которые в первую очередь обуславливают межгрупповые различия.

Определим три условия трансформации пляжа, характеризующие гидродинамический отклик в зависимости от величин намывов – размывов:

- при $\Delta S > 5000 \text{ м}^2$ происходит намыв пляжевой зоны;
- при $\Delta S < -5000 \text{ м}^2$ – размыв;
- при $-5000 \text{ м}^2 < \Delta S < 5000 \text{ м}^2$ – незначительные изменения.

В качестве дискриминантных переменных выступают среднегодовые и максимальные (за условный год) значительные высоты волн отдельно ветрового волнения и зыби для каждого из четырех секторов волнения, всего 16 параметров (табл. 1).

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Дискриминантные группы и переменные
Discriminant groups and variables

Год / Year	$\Delta S, \text{ м}^2 /$ $\Delta S, \text{ м}^2$	Группа / Group	Дискриминантные переменные для сектора волнения / Discriminant variables for a wave sector							
			ЮЮЗ / SSW				ЗЮЗ / WSW			
			1	2	3	4	1	2	3	4
1985	33854	Намыв / Alluvial	0,51	2,08	0,19	0,43	0,71	2,04	0,25	0,73
1986	-5425	Незначительные изменения / Insignificant changes	0,62	2,10	0,13	0,45	0,77	2,18	0,25	0,76
1987	24826	Намыв / Alluvial	0,56	1,89	0,16	0,54	0,85	3,07	0,25	0,87
2014	-38773	Размыв / Erosion	0,48	1,80	0,15	0,46	0,65	2,65	0,23	0,75
2015	-67455	Размыв / Erosion	0,54	2,23	0,21	0,44	0,79	2,61	0,26	0,89
2016	15895	Намыв / Alluvial	0,59	1,92	0,19	0,46	0,83	2,80	0,25	0,70

Продолжение табл. 1
Continuation of Table 1

Год / Year	$\Delta S, \text{m}^2 /$ $\Delta S, \text{m}^2$	Группа / Group	Дискриминантные переменные для сектора волнения / Discriminant variables for a wave sector							
			ЗСЗ / WNW				ССЗ / NNW			
			1	2	3	4	1	2	3	4
1985	33854	Намыв / Alluvial	0,80	2,33	0,21	0,58	0,70	2,14	0,14	0,32
1986	-5425	Незначительные изменения Insignificant changes	0,73	2,47	0,22	0,58	0,64	2,13	0,13	0,31
1987	24826	Намыв / Alluvial	0,70	2,10	0,21	0,67	0,63	1,72	0,15	0,37
2014	-38773	Размыв / Erosion	0,85	2,45	0,21	0,49	0,75	2,34	0,16	0,34
2015	-67455	Размыв / Erosion	0,89	2,95	0,21	0,67	0,61	2,22	0,15	0,39
2016	15895	Намыв / Alluvial	0,70	2,52	0,21	0,51	0,63	2,00	0,15	0,30

Примечание: 1 – средняя высота **ветровых** волн; 2 – максимальная высота **ветровых** волн; 3 – средняя высота волн **зыби**; 4 – максимальная высота волн **зыби**

Note: 1 – average height of **wind** waves; 2 – maximum height of **wind** waves; 3 – average height of **swell**; 4 – maximum height of **swell**

В дальнейшем для удобства будем придерживаться обозначений: ЮЮЗ- $h_w(\text{mean})$ – средняя высота ветровых волн в секторе волнения ЮЮЗ, ЗЮЗ- $h_s(\text{max})$ – максимальная высота волн зыби в секторе ЗЮЗ и т. д. Заметим также, что 32 строки данных, соответствующие годам с 1985 по 2016, будем называть наблюдениями.

Наша задача – получить ДФ, которые являются линейной комбинацией всех переменных. Весовые коэффициенты при переменных будут определять вклад этих переменных в дискриминирующие способности функции. В нашем случае нужно определить две ДФ (на единицу меньше, чем число групп).

На первом этапе анализа весьма полезной процедурой является сокращение числа исходных признаков (переменных). Применение метода последовательного включения переменных в модель позволило определить параметры, вносящие наименьший вклад в межгрупповые различия. Признаки, исключенные из модели: ЗЮЗ- $h_w(\text{mean})$; ЗЮЗ- $h_s(\text{max})$; ЗСЗ- $h_w(\text{max})$; ССЗ- $h_w(\text{mean})$.

Чтобы оценить, как оставшиеся 12 переменных разделяют 3 выделенные группы, были вычислены две ДФ (табл. 2). Из табл. 2 следует, что ДФ₁ ответственна почти за 85 % объясненной дисперсии, т. е. 85 % всей дискриминирующей способности определяется этой функцией. На ДФ₂ приходится 15 % дисперсии.

Коэффициент канонической корреляции служит показателем разделительной способности ДФ. Высокий коэффициент для первой ДФ указывает на сильную взаимосвязь между переменными и группами. Λ -статистика показывает, значимо ли различаются в двух группах средние значения ДФ. Малые значения Λ -статистики (около 0) указывают на то, что средние значения групп различаются. Кроме того, для первой ДФ уровень значимости p менее 0,05, т. е. различие значимо.

Т а б л и ц а 2
Table 2

Характеристики дискриминантных функций (ДФ)
Characteristics of the discriminant functions (DF)

ДФ / DF	Собственное значение / Eigvalue	Вклад в диспер- сию, % / Contribution to dispersion, %	Каноническая корреляция / Canonical correlation	Λ-статистика / Λ-statistics	p-значение / p-value
ДФ ₁	5,57	84,9	0,92	0,0760	0,000053
ДФ ₂	0,99	15,1	0,71	0,5013	0,132914

Вклад переменных в значение дискриминантной функции показывают стандартизованные коэффициенты. Они позволяют оценить относительную важность каждой дискриминантной переменной при разделении исследуемых групп. Канонические корреляции показывают силу связи дискриминантных переменных со стандартизованными значениями ДФ. Стандартизованные коэффициенты и канонические корреляции для всех дискриминантных переменных представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3
Table 3

**Стандартизованные коэффициенты регрессии и канонические
корреляции для дискриминантных функций и переменных**
**Standardized regression coefficients and canonical correlations for the
discriminant functions and variables**

Дискриминантная переменная / Discriminant variable	Стандартизованные коэффициенты / Standardized coefficients		Канонические корреляции / Canonical correlation	
	ДФ ₁ / DF ₁	ДФ ₂ / DF ₂	ДФ ₁ / DF ₁	ДФ ₂ / DF ₂
CC3- <i>h_s</i> (max) / NNW- <i>h_s</i> (max)	-1,971	0,039	-0,613	0,106
ЗЮ3- <i>h_w</i> (max) / WSW- <i>h_w</i> (max)	0,665	1,463	-0,079	0,509
ЗЮ3- <i>h_s</i> (mean) / WSW- <i>h_s</i> (mean)	1,056	-1,284	0,067	-0,233
ЮЮ3- <i>h_w</i> (mean) / SSW- <i>h_w</i> (mean)	-1,267	0,961	-0,003	0,219
ЗС3- <i>h_w</i> (mean) / WNW- <i>h_w</i> (mean)	-1,211	-0,290	-0,015	-0,027
CC3- <i>h_w</i> (max) / NNW- <i>h_w</i> (max)	1,468	-0,146	0,119	-0,046
ЮЮ3- <i>h_s</i> (mean) / SSW- <i>h_s</i> (mean)	0,727	0,767	0,144	0,103
ЗС3- <i>h_s</i> (max) / WNW- <i>h_s</i> (max)	1,351	0,333	-0,131	0,251
ЮЮ3- <i>h_w</i> (max) / SSW- <i>h_w</i> (max)	-0,626	-0,630	-0,150	0,023
ЗС3- <i>h_s</i> (mean) / WNW- <i>h_s</i> (mean)	0,848	-0,095	-0,030	0,101
CC3- <i>h_s</i> (mean) / NNW- <i>h_s</i> (mean)	-0,442	0,638	-0,078	0,354
ЮЮ3- <i>h_s</i> (max) / SSW- <i>h_s</i> (max)	-0,449	0,051	0,052	-0,004

Данные табл. 3 показывают, что наибольший вклад в $ДФ_1$ вносят экстремальные зыбь и ветровое волнение ССЗ направлений, в $ДФ_2$ – максимальные ветровые волны и средняя зыбь ЗЮЗ румбов. При этом наивысшую корреляцию с ДФ показывают ССЗ- $h_s(\max)$ ($ДФ_1$) и ЗЮЗ- $h_w(\max)$ ($ДФ_2$).

В наглядной форме результаты разделения наблюдений по группам представляет диаграмма рассеивания (рис. 7). Крестиками на рис. 7 обозначены центроиды, соответствующие средним значениям ДФ в исследуемых группах (т. е. типичным наблюдениям соответствующего класса). Степень разделения исследуемых групп характеризует расстояние между центроидами этих групп. Из рис. 7 следует, что $ДФ_1$ весьма успешно разделяет группы «размыв» и «намыв». $ДФ_2$, несмотря на недостаточную статистическую достоверность, разделяет незначительное и весьма ощутимое штормовое воздействие на береговую линию. Другими словами, $ДФ_1$ определяет знак (направление) воздействия, $ДФ_2$ – его силу.

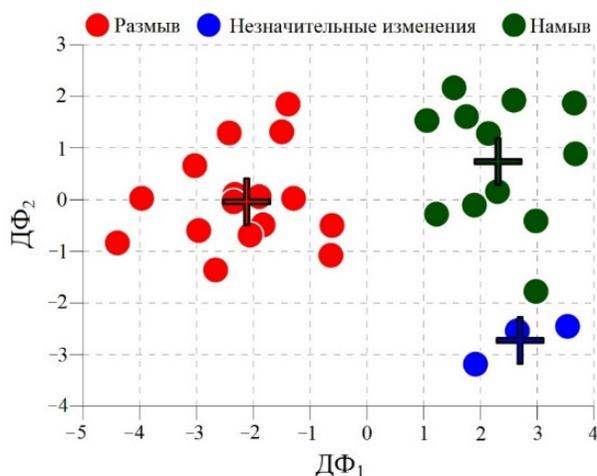


Рис. 7. Распределение наблюдений в поле дискриминантных функций (ДФ)
Fig. 7. Distribution of observations in the field of the discriminant functions

Как было сказано выше, наибольший вклад в $ДФ_1$ вносят экстремальные зыбь и ветровое волнение ССЗ направлений, причем вклад зыби преобладает; в $ДФ_2$ – максимальные ветровые волны и средняя зыбь ЗЮЗ румбов. Таким образом, можно заключить, что волнение ССЗ направлений, особенно **зыбь**, определяет направление (другими словами, знак) итогового среднего годового волнового воздействия на прибрежную зону, т. е. определяет, будет ли это намыв песка либо его размыв. Экстремальное ветровое волнение ЗЮЗ румбов и фоновые (средние) показатели зыби этого же направления определяют силу воздействия на прибрежную зону.

Заключение

В настоящей работе оценены межгодовые вариации площадей намывов (размывов) береговой линии Бакальской косы, а также предпринята попытка выявить характеристики поверхностного волнения (или сочетание несколь-

ких), ответственные за процессы эрозии или аккумуляции донного материала в прибрежной зоне.

Анализ спутниковых снимков косы позволил выделить три периода в истории развития Бакальской косы: 1985–1997, 1998–2007 и 2007–2016 гг. Первый период – промежуток относительной стабильности. В 1998 г. произошел сильнейший размыв, после чего в течение 10 лет чередовались случаи намыва и размыва со слабой тенденцией к общему размыву. В 2007 г. наступил третий период, который можно определить как период деградации косы, сопровождающийся безвозвратной потерей пляжевого материала.

Комплексный характер гидродинамического воздействия осложняет выделение отдельных параметров поверхностного волнения, однозначно ответственных за процессы эрозии или аккумуляции донного материала в прибрежной зоне. Тем не менее применение дискриминантного анализа позволило с высокой статистической достоверностью заключить, что направление итогового (среднегодового) волнового воздействия на прибрежную зону, определяющего происходящие в ней процессы (эрозия или аккумуляция песка), задается волнением ССЗ направлений, причем вклад зыби является преобладающим. Степень воздействия определяется сильными штормами с направлениями, близкими к нормали к береговой линии, а именно ЗЮЗ.

Естественно, исследования проведены с рядом неизбежных допущений, тем не менее полагаем, что их результаты соответствуют общим представлениям о морфодинамических процессах в прибрежной зоне моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горячкин Ю. Н., Косьян Р. Д. Образование нового острова у берегов Крыма // *Океанология*. 2020. Т. 60, № 2. С. 323–330. doi:10.31857/S0030157420020033
2. Современное состояние и эволюция Бакальской косы / В. А. Иванов [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 26, т. 1. С. 8–15.
3. Харитонова Л. В., Иванча Е. В., Алексеев Д. В. Влияние штормовых нагонов и ветровых волн на морфодинамические процессы в районе Бакальской косы // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 1. С. 79–90. doi:10.22449/0233-7584-2015-1-79-90
4. 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 : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. Вып. 27. С. 374–380.
5. 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 : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. Вып. 19. С. 56–69.
6. 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.
7. Ветро-волновые условия Азово-Черноморского побережья Украины / В. А. Наумова [и др.] // *Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту*. 2010. Вып. 259. С. 263–283.

8. 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 : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. Вып. 26, т. 1. С. 24–33.
9. Дивинский Б. В. Гидродинамические условия вод в районе Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. Вып. 4. С. 31–39. doi:10.22449/2413-5577-2018-4-31-39
10. Divinsky B. V., Kosyan R. D. Influence of the climatic variations in the wind waves parameters on the alongshore sediment transport // Oceanologia. 2020. Vol. 62, iss. 2. P. 190–199. doi:10.1016/j.oceano.2019.11.002
11. Руднев В. И. Особенности рельефа дна прибрежной зоны Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. Вып. 4. С. 15–21. doi:10.22449/2413-5577-2018-4-15-21
12. Руднев В. И., Дивинский Б. В., Косьян Р. Д. Изменения топографии прибрежной зоны Бакальской косы с 2018 по 2019 годы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. Вып. 1. С. 22–35. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-22-35
13. Divinsky B. V., Kosyan R. D. Spatiotemporal variability of the Black Sea wave climate in the last 37 years // Continental Shelf Research. 2017. Vol. 136. P. 1–19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2017.01.008>
14. Divinsky B., Kosyan R. Parameters of wind seas and swell in the Black Sea based on numerical modeling // Oceanologia. 2018. Vol. 60, iss. 3. P. 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2017.11.006>
15. Клекка У. Р. Дискриминантный анализ // Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Под ред. И. С. Енюкова. М. : Финансы и статистика, 1989. С. 79–138.

Об авторах:

Дивинский Борис Васильевич, ведущий научный сотрудник, лаборатория геологии и литодинамики, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2452-1922**, **ResearcherID: C-7262-2014**, divin@ocean.ru

Косьян Рубен Дереникович, заведующий лабораторией геологии и литодинамики, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), доктор географических наук, профессор, **ResearcherID: C-5154-2014**, rkosyan@hotmail.com