

## Волновой режим и литодинамика в районе аккумулятивных берегов Западного Крыма

Ю. Н. Горячкин\*, В. В. Фомин

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

\*E-mail: yngor@yandex.ru,

Поступила в редакцию 05.03.2020 г.

*Цель.* Получить характеристики волнового режима в районе аккумулятивного берега Западного Крыма, составить схемы вдольбереговых потоков наносов для разных направлений ветра, провести анализ ранее существовавших представлений о литодинамических процессах в исследуемом районе и сопоставить с полученными результатами – цель данной работы.

*Методы и результаты.* Для анализа волнового режима использовались результаты ретроспективных расчетов ветрового волнения в Черном море по модели *Simulating Waves Nearshore*, полученных на основе данных атмосферного реанализа *ERA-Interim* за 1979–2018 гг. По данным ретроспективных расчетов методом годовых максимумов определены параметры волн различной повторяемости. Проведено моделирование и получены схемы вдольберегового потока наносов для шести направлений ветра с помощью методики, использующей модельные значения волновых характеристик.

*Выводы.* Получены оперативные и экстремальные характеристики ветрового волнения в исследуемом районе. Показано, что наиболее интенсивные вдольбереговые потоки наносов на исследуемом участке возникают под воздействием волнения, сформированного ветрами западного, юго-западного и южного направлений. При северо-западном и западном ветрах формируется генеральный поток наносов, направленный на восток. При действии западного ветра юго-восточнее пересыпи оз. Донузлав в вогнутостях берега перемещение материала происходит в противоположном направлении. При юго-западном и южном ветрах вдольбереговой поток наносов направлен от м. Урет к северной косе оз. Донузлав, где он встречается с потоком противоположного направления. Юго-восточнее оз. Донузлав возникают разнонаправленные вдольбереговые потоки, при этом в вогнутостях берега формируются зоны их конвергенции. При юго-восточных и восточных ветрах мощность вдольбереговых потоков наносов резко уменьшается, а сами они имеют разнонаправленное движение, не образуя единого потока на каком-либо протяженном участке береговой линии.

**Ключевые слова:** ветро-волновой режим, литодинамика, математическое моделирование, Крымский полуостров, озеро Донузлав.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания Морского гидрофизического института РАН (тема № 0827-2018-0004) при поддержке РФФИ (проект № 18-05-80035).

**Для цитирования:** Горячкин Ю. Н., Фомин В. В. Волновой режим и литодинамика в районе аккумулятивных берегов Западного Крыма // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 4. С. 451–466. doi:10.22449/0233-7584-2020-4-451-466

# Wave Regime and Lithodynamics in the Region of the Western Crimea Accumulative Coasts

Yu. N. Goryachkin\*, V. V. Fomin

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

\*e-mail: yngor@yandex.ru

*Purpose.* The paper is aimed at obtaining the wave regime characteristics in the region of the Western Crimea accumulative coast, at constructing the scheme of the sediment along-coastal fluxes for various wind directions, at analyzing the previous notions on the lithodynamical processes in the region under study and their comparison with the obtained results.

*Methods and Results.* The wave regime was analyzed using the results of the retrospective calculations of wind waves in the Black Sea derived due to the model *SWAN* and based on the *ERA-Interim* atmospheric reanalysis data for 1979–2018. The data of retrospective calculations performed by the method of annual maximums yielded the parameters of the waves of various repeatability. The sediment along-coastal flux was simulated and the schemes for six wind directions were constructed by the method including model values of the wave characteristics.

*Conclusions.* Operative and extreme characteristics of the wind waves in the region under study are obtained. It is shown that in the above-mentioned area, the most intense sediment along-coastal fluxes occur being affected by the waves formed by the western, southwestern and southern winds. The northwestern and western winds give rise to the sediment main flux directed to the east. At the western wind, to the southeast from the Donuzlav Bay-Bar and in the coast concavities, the sediments are transported in the opposite direction. When the winds are southwestern and southern, the sediment along-coastal flux move from the Cape Uret to the Lake Donuzlav northern spit, where it meets the oppositely directed flux. To the southeast from the Lake Donuzlav, the multidirectional fluxes arise; at that, in the coast concavities their convergence zones are formed. At the southeastern and eastern winds, the sediment along-coastal fluxes' capacity decreases sharply; the fluxes are of multidirectional character and they form not a single flux on any of the long stretches of the coastline.

**Keywords:** wind-wave regime, lithodynamics, mathematical modeling, Crimea Peninsular, Lake Donuzlav.

**Acknowledgements:** The investigation was carried out within the framework of the state task of Marine Hydrophysical Institute, RAS (theme No. 0827-2018-0004) at the RFBR support (project No. 18-05-80035).

**For citation:** Goryachkin, Yu.N. and Fomin, V.V., 2020. Wave Regime and Lithodynamics in the Region of the Western Crimea Accumulative Coasts. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(4), pp. 415-429. doi:10.22449/1573-160X-2020-4-415-429

## Введение

Аккумулятивные берега Западного Крыма протянулись от оз. Кызыл-Яр до оз. Донузлав (урочище Беляус). Мыс Евпаторийский делит их на две равные части длиной примерно 37 км каждая. Восточная часть этого побережья в рекреационном и экономическом отношении в значительной мере уже освоена (например, курорты Евпатория и Саки) и, как следствие, в результате неразумной хозяйственной деятельности существенно утратила былую привлекательность своих пляжей [1]. Западная часть во многом остается в естественном состоянии и только в последние годы стала привлекать внимание инвесторов. Здесь уже сделаны первые шаги к освоению побережья, вызвавшие глубокую озабоченность общественности местных приморских поселений, которая справедливо опасается деградации еще одного участка Крымского побережья. Существует план строительства непрерывной набережной

на всем участке, включенный в стратегию развития Сакского района Республики Крым, а также другие не менее амбициозные планы. Вместе с тем никакие научные обоснования таких проектов не проводилось.

К настоящему времени одним из нерешенных вопросов является уточнение схемы динамики донных наносов на отрезке береговой линии оз. Донузлав – Евпатория. Не известны как ее особенности и изменчивость в связи с воздействием ветров различных направлений, так и результирующий поток. Между тем этот вопрос является принципиальным как с точки зрения освоения указанной территории, так и с позиции постоянно поднимаемой проблемы – влияния добычи песка в оз. Донузлав и эксплуатации подходного канала на береговую зону региона. С этим вопросом тесно связана проблема количественного определения ветро-волновых характеристик. На ближайшей к району гидрометеостанции «Евпатория» наблюдения за параметрами ветровых волн проводятся в светлое время суток визуальным методом в полузакрытой (от западного и юго-западного направлений волнения) бухте, поэтому такие данные вряд ли можно отнести к репрезентативным. Это в определенной степени касается и данных по ветру, который измеряется в условиях плотной городской застройки, на что указывалось в [2]. В связи с планами освоения побережья и разработкой конкретных проектов данное исследование представляется актуальным.

Цель работы – получить характеристики ветро-волнового режима в районе аккумулятивного берега Западного Крыма, составить схемы вдольбереговых потоков наносов для разных направлений ветра, провести анализ ранее существовавших представлений о литодинамических процессах в исследуемом районе и сопоставить с полученными результатами.

### Волновой режим

Одним из наиболее важных факторов, определяющих литодинамику аккумулятивного берега Западного Крыма, является ветровое волнение Черного моря. Для оценки волнового режима исследуемого района использовались результаты ретроспективных расчетов ветровых волн по спектральной модели *Simulating Waves Nearshore (SWAN)* [3], основанной на численном решении уравнения баланса волновой энергии вида

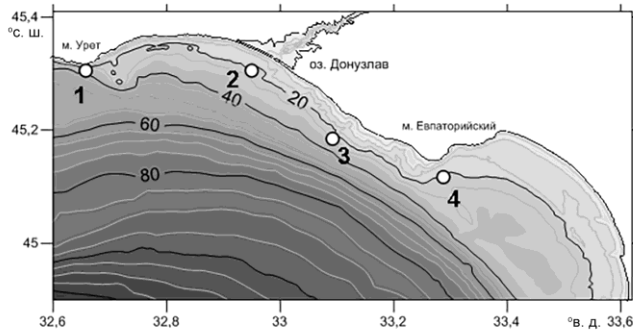
$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}(c_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta N) = S/\sigma, \quad (1)$$

где  $N = E/\sigma$  – плотность волнового действия,  $E$  – энергетический спектр волнения;  $x, y, t$  – пространственные координаты и время;  $\sigma, \theta$  – частотная и угловая координаты;  $c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta$  – скорости переноса вдоль пространственных и частотно-угловых координат;  $S$  – источники и стоки волновой энергии.

На входе в *SWAN* задавались поля приземного ветра *ERA-Interim* (URL: <http://www.ecmwf.int> (дата обращения: 15.07.2020)) за 1979–2018 гг. В результате численного моделирования получен массив параметров ветровых волн на неструктурированной сетке для всего Азово-Черноморского бассейна с дискретностью по времени 1 ч (далее – массив *ERAI-SWAN*). Детали расчета волновых полей изложены в [4]. Из этого массива были выбраны четыре

ближайших к исследуемому району узла сетки (рис. 1) и сформированы ряды скорости ( $w$ ) и направления ветра ( $\varphi$ ) высоты значительных волн ( $h_s$ ), среднего направления волнения ( $\theta$ ), среднего ( $\bar{\tau}$ ) и пикового ( $\tau_p$ ) периодов волн продолжительностью 40 лет.

Полученные ряды характеризуются следующими максимальными значениями:  $\max w = 24,5 - 25,9$  м/с;  $\max h_s = 6,5 - 7,8$  м;  $\max \bar{\tau} = 11,2 - 11,4$  с. Средние многолетние значения  $w$  и  $h_s$  для точек 1–4 равны 7,25 м/с и 0,77 м соответственно.

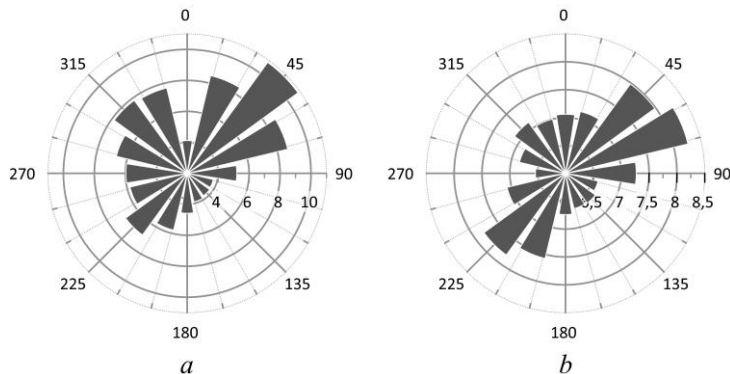


**Р и с. 1.** Рельеф дна (м) на исследуемом участке (область 2). Белые кружки – положение точек, в которых анализировались данные массива ERAI-SWAN

**F i g. 1.** Bottom relief (m) on the area under study (area 2). White circles – location of the points where the data from the ERAI-SWAN array were analyzed

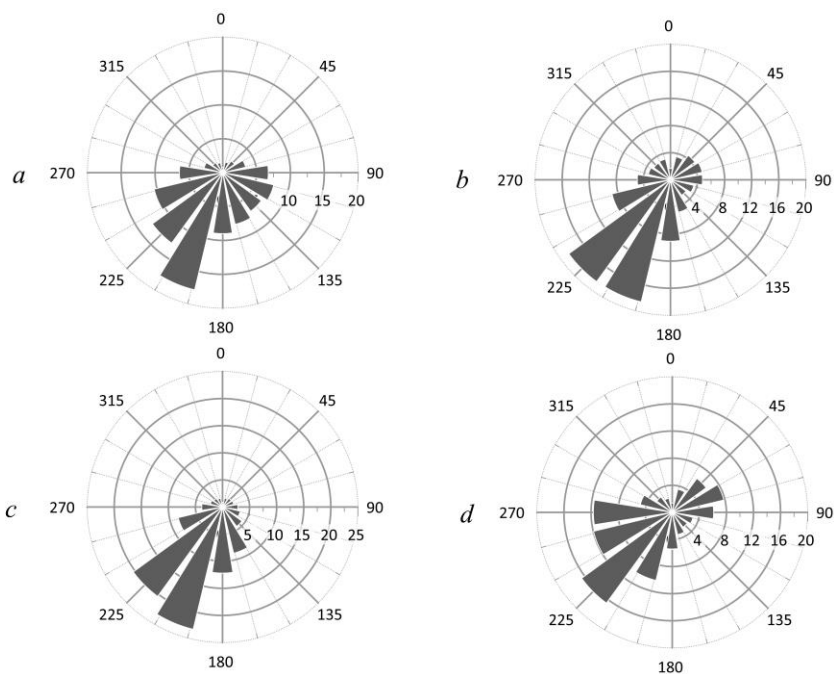
Как показал анализ, характеристики ветра ERAI в точках 1–4 исследуемого района имеют незначительные отличия.

Как видно (рис. 2, a), со стороны моря наибольшую повторяемость (6%) имеет юго-западный ветер. В распределении средних многолетних значений скорости ветра по направлениям прослеживается та же тенденция (рис. 2, b) – со стороны моря наибольшие скорости ветра соответствуют юго-западному направлению.



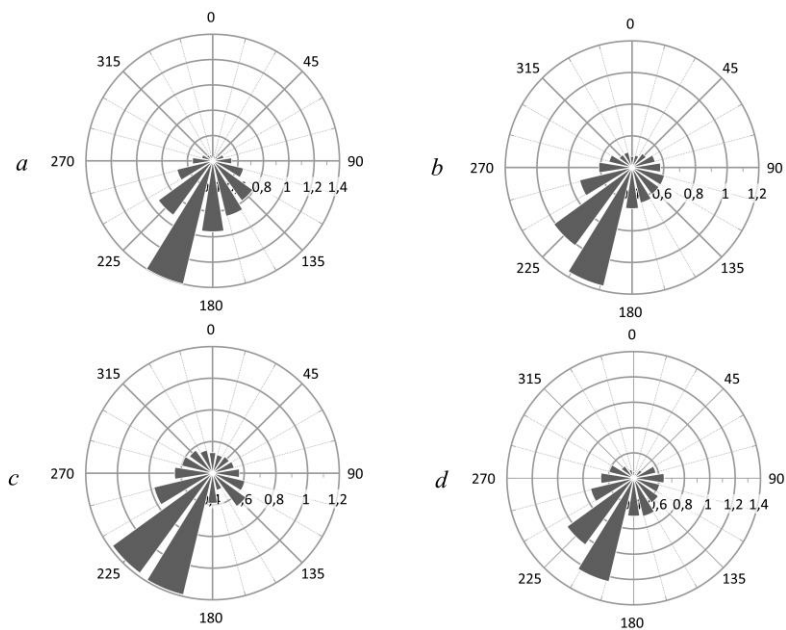
**Р и с. 2.** Характеристики ветра ERAI в точке 3: a – повторяемость ветра по направлениям (%); b – распределение по направлениям средних многолетних значений скорости ветра (м/с)

**F i g. 2.** Wind characteristics from the ERAI data in point 3: a – repeatability of wind directions (%); b – distribution by directions of the average multi-year values of wind speed (m/s)



**Р и с. 3.** Повторяемость среднего направления волнения (%) по данным *ERA1-SWAN*: *a* – в точке 1; *b* – в точке 2; *c* – в точке 3; *d* – в точке 4

**Fig. 3.** Repeatability the wave mean direction (%) based on the *ERA1-SWAN* data: *a* – in point 1; *b* – in point 2; *c* – in point 3; *d* – in point 4



**Р и с. 4.** Распределение по направлениям средних многолетних высот значительных волн (м) по данным *ERA1-SWAN*: *a* – в точке 1; *b* – в точке 2; *c* – в точке 3; *d* – в точке 4

**Fig. 4.** Distribution by directions of the mean multi-year values of the significant wave heights (m) based on the *ERA1-SWAN* data: *a* – in point 1; *b* – in point 2; *c* – in point 3; *d* – in point 4

Средняя высота волн  $\bar{h}$ , средний период волн  $\bar{\tau}$ , средняя длина волн  $\bar{\lambda}$ , высота значительных волн  $h_s$  и высоты волн 50-, 13-, 3-, 1-процентной обеспеченности в точках 1–4, возможные 1 раз в год, в 5, 10, 25 и 50 лет

Waves' mean height  $\bar{h}$ , mean period  $\bar{\tau}$ , and mean length  $\bar{\lambda}$ ; significant wave heights  $h_s$ , and wave heights with 50%-, 13%-, 3%- and 1%-cumulative probability in points 1–4 occurring once per 1, 5, 10, 25 and 50 years

$T$ , год / $T$ , year	$\bar{h}$ , м / $\bar{h}$ , m	$\bar{\tau}$ , с / $\bar{\tau}$ , s	$\bar{\lambda}$ , м / $\bar{\lambda}$ , m	$h_s$ , м / $h_s$ , m	$h_{50\%}$ , м / $h_{50\%}$ , m	$h_{13\%}$ , м / $h_{13\%}$ , m	$h_{3\%}$ , м / $h_{3\%}$ , m	$h_{1\%}$ , м / $h_{1\%}$ , m
Точка 1 / Point 1								
1	2,9	9,2	114	4,7	2,8	4,5	5,7	6,5
5	3,6	10,1	130	5,9	3,5	5,5	6,9	7,7
10	3,9	10,6	139	6,4	3,8	5,9	7,5	8,4
25	4,3	11,2	149	7,0	4,2	6,5	8,2	9,1
50	4,6	11,6	156	7,5	4,5	7,0	8,7	9,7
Точка 2 / Point 2								
1	2,8	9,1	110	4,5	2,7	4,4	5,5	6,2
5	3,4	10,0	125	5,4	3,3	5,2	6,6	7,4
10	3,7	10,5	133	5,9	3,6	5,7	7,1	8,0
25	4,1	11,1	142	6,5	4,0	6,2	7,7	8,6
50	4,4	11,5	149	7,0	4,3	6,6	8,2	9,1
Точка 3 / Point 3								
1	3,2	9,3	124	5,2	3,1	5,1	6,4	7,3
5	3,9	10,1	142	6,4	3,8	6,1	7,7	8,7
10	4,3	10,6	151	7,0	4,1	6,6	8,4	9,4
25	4,7	11,1	162	7,7	4,6	7,3	9,1	10,3
50	5,0	11,5	171	8,2	4,9	7,7	9,7	10,9
Точка 4 / Point 4								
1	2,7	9,1	108	4,4	2,6	4,1	5,2	5,9
5	3,3	10,1	124	5,4	3,2	5,0	6,3	7,0
10	3,5	10,6	132	5,7	3,5	5,4	6,8	7,6
25	3,9	11,2	141	6,4	3,8	5,9	7,4	8,3
50	4,2	11,6	149	6,8	4,1	6,3	7,9	8,8

На рис. 3 приведены диаграммы повторяемости среднего направления волнения в точках 1–4. Видно, что в точках 1–3 наиболее вероятным направлением подхода волн к берегу является юго-западное и юго-юго-западное, в точке 4 – юго-западное и западно-юго-западное. Эти максимумы повторяемости направления волн вызваны повторяемостью направления ветра, распределением глубин, а также влиянием рефракции, которая с приближением к берегу заставляет волновые фронты ориентироваться параллельно изобатам.

Согласно рис. 4, можно сделать вывод, что наиболее волноопасными направлениями для исследуемого района являются юго-западное и юго-юго-западное.

Для оценки экстремальных характеристик ветрового волнения в исследуемом районе применялся метод годовых максимумов [5]. В таблице для каждой точки приведены параметры волн из системы штормов различной повторяемости ( $T$  – период повторяемости шторма). Эти данные характеризуют волновой режим на глубинах  $\sim 20$  м и могут быть использованы в качестве входной информации при проектировании берегозащитных сооружений и расчетах изменения конфигурации береговой линии в исследуемом районе. Как видно, для штормов, возможных 1 раз в год, значения  $h_s$  составляют 4,4–5,2 м. Значения максимумов  $h_s$  в исходных рядах показывают, что известный экстремальный шторм 11 ноября 2007 г. можно классифицировать как шторм, возможный 1 раз в 25 лет.

### **Анализ существующих представлений о литодинамике исследуемого района**

Изучение рассматриваемого участка побережья началось в августе 1945 г. с экспедиции Лаборатории океанологии, впоследствии реорганизованной в Институт океанологии Академии наук СССР. Собственно отсюда начались регулярные научные исследования морских берегов в СССР, а затем в Российской Федерации. Тем не менее научных публикаций, посвященных этому району, относительно немного. Описание пересыпей многочисленных на этом побережье соленых озер впервые было приведено в [6]. Первые результаты исследования строения берегов и соображения по их возможной динамике, полученные по данным вышеупомянутой экспедиции, содержатся в [7, 8]. Впоследствии вышло обобщение исследований, выполненных в 1945–1949 гг. [9]. В районе оз. Донузлав в 60-х годах прошлого века существовала эстакада, построенная для изучения процессов в береговой зоне. С использованием полученных там данных в [10] рассмотрено вертикальное распределение концентрации и состав взвешенных наносов в зоне разрушения волн, в [11] обсуждалась динамика рельефа подводного берегового склона, сложенного ракушечным материалом. На основании многолетних наблюдений во время полевых практик геолого-географического факультета Одесского университета им. И. И. Мечникова в [12] приводятся выявленные закономерности морфологии и динамики берега Западного Крыма, в том числе и рассматриваемого района. Наиболее полные на сегодняшний день сведения о природных условиях и межгодовой изменчивости береговой линии содержатся в недавних работах [1, 13], там же подробно рассмотрены геолого-геоморфологические условия. Отметим наиболее важные черты, имеющие значение для дальнейшего анализа.

Современные литодинамические процессы на побережье представлены донной и береговой абразией, перемещением, размывом и аккумуляцией наносов. Их интенсивность определяется главным образом режимом и интенсивностью волнения. По всему берегу региона тянется полоса песчаных пляжей. Их типичная ширина на пересыпях озер – до 100 м, в других местах – 10–50 м. В целом ширина пляжей уменьшается в юго-восточном направлении. Наиболее крупная геоморфологическая форма побережья – донузлавская пересыпь длиной около 10 км, которая после прорытия в ее теле канала

(1962 г.) разделена на южную и северную косы. Здесь наблюдается максимальная мощность наносов (ракушечные пески с примесью оолитов, гравия коренных известняковых пород и кварцевых зерен).

Наносы участка берега между оз. Донузлав и м. Евпаторийский образуют пляжи и покрывают верхнюю часть подводного склона, это аккумулятивная зона, в которой поток по большей части насыщен. У м. Евпаторийский он доходит до глубины 2 м, в сторону оз. Донузлав он расширяется и доходит до изобаты 8 м. Типичная протяженность песков на дне в районе южной косы оз. Донузлав – до 300 м от уреза, у м. Евпаторийский – 10–20 м. У пересыпей озер протяженность песков резко возрастает до 1,0–1,5 км и, как свидетельствуют спутниковые снимки, мало меняется во времени [13].

Глубже аккумулятивной зоны наносы скапливаются только в понижениях известняковой плиты, а еще глубже они отсутствуют вовсе, соответственно отсутствует и их поток. Такая особенность тесно связана с уклоном поверхности дна. Как было показано в [9], при уклонах 0,003–0,007 (которые преимущественно наблюдаются в рассматриваемом районе) наносы выбрасываются на берег, а аккумуляция происходит только в узкой прибрежной полосе. Не случайно зона аккумуляции расширяется в районе соленых озер, где понижения рельефа прослеживаются и на дне.

В настоящее время можно говорить о нескольких существующих схемах динамики наносов в рассматриваемом районе. Впервые такая схема была предложена В. П. Зенковичем [7]. Он указывал, что на участке Тарханкутский п-ов – м. Урет (Ойрат) поверхность коренных пород наклонена довольно сильно. Берег образует высокие обрывы и медленно абрадируется, при этом все наносы уходят на дно. Восточнее, между м. Урет и оз. Донузлав, уклоны уменьшаются, а поверхность коренных пород значительно понижена. Абразия происходит здесь быстрее, но высоких клифов при этом не образуется, и море «срезает» незначительный слой породы. У берега создаются иногда галечные, иногда песчаные пляжи. За оз. Донузлав условия резко меняются, уклон поверхности коренных пород очень мал. Берег совершенно не абрадируется и превращается в аккумулятивный. В прибрежной зоне образовано довольно мощное накопление песков. В работе указывается, что источник песков – подводный склон берега от м. Евпаторийский до оз. Донузлав, где поток наносов направлен с востока на запад, встречный поток направлен от м. Урет к оз. Донузлав.

Позже В. П. Зенкович пересмотрел свою точку зрения. В [9] он подтверждает, что происхождение песков по-прежнему не вызывает сомнения, однако в настоящее время (50-е гг. XX в.) признаков современного значительного перемещения наносов на участке м. Урет – м. Евпаторийский не имеется. Здесь же отмечается, что залегание наносов находится в равновесии с гидродинамическим режимом, что не исключает их двухсторонних кратковременных миграций. Представляется важным вывод, что современное поступление наносов крайне мало, а большая часть песков поступила в более ранние эпохи в процессе перемещений с востока от м. Евпаторийский.

Ю. Д. Шуйский [12] определил направления вдольбереговых потоков энергии для 5 характерных точек побережья, от м. Евпаторийский до м. Тарханкут, на основе волноэнергетического метода Кнапса [14]. Эти расчеты по-



казали, что в среднем за многолетний период (1946–1976 гг.) по направлению от м. Тарханкут к м. Евпаторийский произошел постепенный рост результирующего вектора ветро-волновой энергии. Аналогичная зависимость получена и для «прибойной силы», отражающей степень лобового воздействия волн. Отмечалось отсутствие преобладания поперечного или продольного перемещения наносов. Также отмечено увеличение почти в 4 раза в этом направлении вдольбереговой наносодвижущей силы, что говорит о четко выраженном переносе энергии от м. Урет к пересыпи оз. Донузлав и далее – к м. Евпаторийский. Размах миграции к м. Евпаторийский возрастает в 2,6 раза.

Ю. Д. Шуйский отмечает, что новая схема отличается от схемы В. П. Зенковича, однако, по его мнению, имеет большую достоверность, так как во многом подтверждается строением рельефа и распределением гранулометрического и минералогического состава, в частности, характером распределения терригенных и карбонатных наносов. Кроме того, в расчетах использовался ряд данных по ветру продолжительностью 30 лет. Мощность потока оценивалась небольшой – порядка нескольких десятков тысяч кубических метров в год, ввиду чего для региона характерен дефицит наносов.

В более поздней работе [20] этот же автор выделяет литодинамическую ячейку, расположенную от м. Урет до м. Евпаторийский, где в береговую зону поступает около 60 тыс. м<sup>3</sup>/год наносов, в основном ракуши. Расчет направления вдольберегового потока энергии показал, что от м. Урет он направлен в сторону пересыпи оз. Донузлав. В сторону этой пересыпи направлен и результирующий поток на участке м. Евпаторийский – пересыпь лагуны оз. Соленое (западнее м. Евпаторийский). От него же часть наносов во второстепенных подвижках во время действия западных и северо-западных волнений (в сумме около 15%) может огибать м. Евпаторийский и проникать в одноименную бухту до мола Евпаторийского торгового порта. Автор оставляет открытым вопрос об интегральной направленности переноса наносов на участке м. Евпаторийский – оз. Донузлав.

Ветро-волновой метод использовал Е. И. Игнатов для расчета направленности суммарных потоков энергии [15]. В результате были получены характеристики энергетических треугольников и результирующий вектор ветро-волновой энергии, который указывает на относительные годовые запасы такой энергии в среднем за многолетний период. Величина запаса увеличивается от м. Тарханкут до пересыпи оз. Донузлав с 9 до 10 усл. ед. Далее на юго-восток она уменьшается до 6–7 усл. ед. и до м. Евпаторийский не изменяется.

Вдольбереговая наносодвижущая сила в пределах района между м. Тарханкут и пересыпью оз. Донузлав является величиной положительной и направлена на восток. Восточнее отмечено чередование направлений вектора, при этом абсолютные значения не превышают 3 усл. ед. для берегов, экспонированных на юго-запад, и 5 усл. ед. – для берегов южной экспозиции. На участке восточнее м. Евпаторийский наносодвижущая сила интенсифицируется и формирует поток, направленный в сторону м. Карантинный. Автор заключает: вдольбереговой поток направлен на восток от м. Тарханкут до пересыпи оз. Донузлав (северная коса), где проявляется зона схождения

с юго-восточным потоком. От пересыпи оз. Донузлав (южная коса) до самого м. Евпаторийский поток становится неустойчивым и разделяется на несколько литодинамических ячеек с областями конвергенции, расположенными у пересыпей.

### Моделирование потока наносов для разных направлений ветра

Численное моделирование ветрового волнения, волновых течений и потока наносов в береговой зоне исследуемого района выполнялось в три этапа. На первом этапе для заданного поля ветра рассчитывались характеристики волнения с помощью модели *SWAN*. Для повышения точности расчетов применялся двухшаговый метод вложенных сеток. На первом шаге моделировалось волнение для всего Азово-Черноморского бассейна с горизонтальным разрешением 4,5 км (область 1). Далее проводился расчет волнения в области 2, показанной на рис. 1, с горизонтальным разрешением 200 м. На жидкой границе области 2 использовались результаты *SWAN*, полученные для области 1. Разрешение модели по угловой координате составляло  $10^\circ$ , частотный интервал равнялся 0,04–2 Гц.

На втором этапе в области 2 определялись волновые течения, вызванные действием волновых напряжений  $(\tau_x, \tau_y)$ , на основе численного решения уравнений мелкой воды

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x}{H} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y}{H} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Hu) + \frac{\partial}{\partial y}(Hv) = 0, \quad (3)$$

$$\tau_x = -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}, \quad \tau_y = -\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}, \quad (4)$$

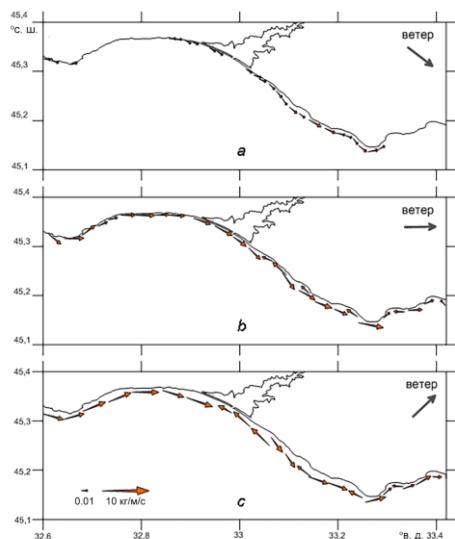
где  $u, v$  – осредненные по глубине горизонтальные компоненты скорости течений;  $\eta$  – уровень моря;  $S_{xx}, S_{xy}, S_{yy}$  – компоненты тензора радиационных напряжений [17], определяемые через высоту значительных волн и среднее направление волнения из модели *SWAN*.

На третьем этапе по методике Михинова – Иванова [18, 19] в области 2 рассчитывались компоненты вектора удельных расходов наносов  $(q_x, q_y)$ . В качестве входных данных использовались компоненты скорости волновых течений  $u, v$  из модели (2) – (4), а также  $h_s, \theta, \bar{\tau}$  из модели *SWAN* (формула (1)). Предполагалось, что дно в береговой зоне исследуемого района сложено из песка средней крупности с медианным диаметром 0,5 мм [20].

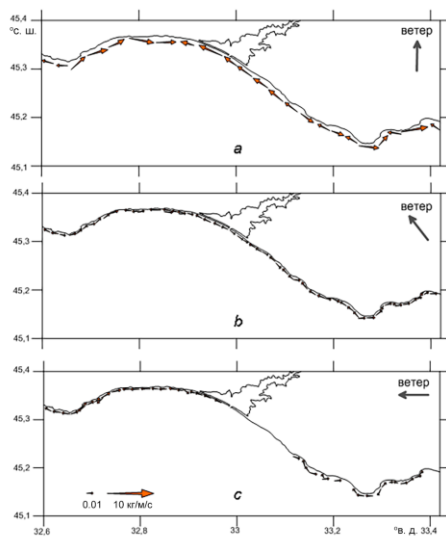
Для упрощения интерпретации результатов моделирования ветер задавался однородным по пространству и постоянным по времени. Расчеты проводились для 6 направлений ветра (северо-западное, западное, юго-западное, южное, юго-восточное, восточное) и трех значений скорости: 7,5; 10; 15 м/с.

Во всех вариантах расчетов длительность действия ветра составляла 1 сут, что соответствует типичной продолжительности штормов в этом районе.

Было установлено, что для указанных скоростей ветра результаты модельных расчетов качественно не отличаются. Поэтому более подробно рассмотрим результаты для скорости ветра 15 м/с. На рис. 5 и 6 приведены схемы движения наносов в исследуемом районе для разных направлений ветра. На рис. 7 и 8 показано пространственное распределение удельного расхода наносов  $q = \sqrt{q_x^2 + q_y^2}$ , характеризующее интенсивность вдольбереговых потоков.

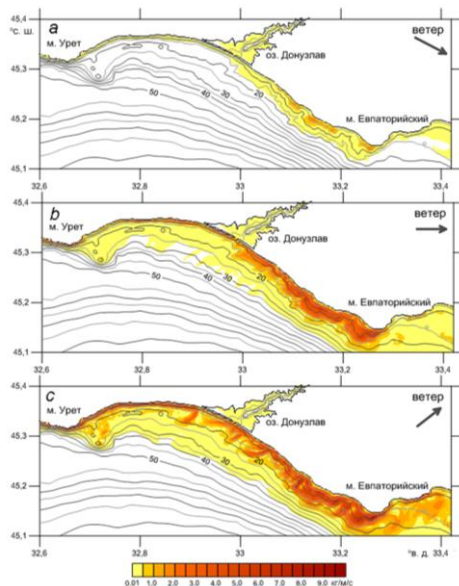


**Р и с. 5.** Распределение вектора удельного расхода наносов при действии северо-западного (а), западного (б) и юго-западного (с) ветра, имеющего скорость 15 м/с  
**Fig. 5.** Distribution of the sediment specific load vector at the northwestern (a), western (b) and southwestern (c) winds with the 15 m/s speed



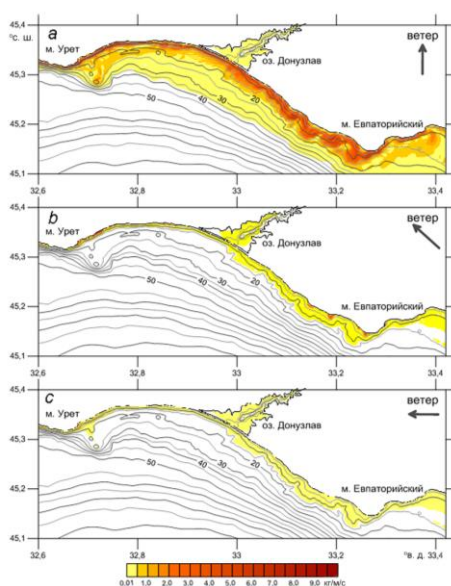
**Р и с. 6.** Распределение вектора удельного расхода наносов при действии южного (а), юго-восточного (б) и восточного (с) ветра, имеющего скорость 15 м/с  
**Fig. 6.** Distribution of the sediment specific load vector at the southern (a), southeastern (b) and eastern (c) winds with the 15 m/s speed

Анализ результатов моделирования показал, что **при северо-западном ветре** (рис. 5, а; 7, а) в береговой зоне рассматриваемого района перемещение донного материала осуществляется в восточном направлении. При этом единого вдольберегового потока наносов на протяжении всего участка не возникает. Локальное перемещение материала прослеживается у м. Урет. Значения  $q$  здесь составляют 50–60 г/м/с. Также прослеживается незначительное перемещение материала вдоль северной косы оз. Донузлав ( $q \sim 50$  г/м/с). На участке береговой зоны от южной оконечности пересыпи оз. Донузлав до м. Евпаторийский формируется единый поток наносов. Здесь на глубинах 3–5 м значения  $q$  возрастают в 30 раз и достигают 1,5–2 кг/м/с. В районе изобат 10–15 м значения  $q$  уменьшаются до 50 г/м/с.



**Р и с. 7.** Распределение удельного расхода наносов  $q$  при действии северо-западного (а), западного (b) и юго-западного (c) ветра, имеющего скорость 15 м/с

**F i g. 7.** Distribution of the sediment specific load vector  $q$  at the northwestern (a), western (b) and southwestern (c) winds with the 15 m/s speed



**Р и с. 8.** Распределение удельного расхода наносов  $q$  при действии южного (а), юго-восточного (b) и восточного (c) ветра, имеющего скорость 15 м/с

**F i g. 8.** Distribution of the sediment specific load vector  $q$  at the southern (a), southeastern (b) and eastern (c) winds with the 15 m/s speed

**При западном ветре** (рис. 5, b; 7, b) формируется генеральный поток наносов, направленный на восток. При этом юго-восточнее пересыпи оз. Донузлав в вогнутостях берега перемещение материала происходит в противоположном направлении. Наши наблюдения показывают, что при этом иногда здесь временно возникают береговые валы, расположенные перпендикулярно, или под некоторым углом к береговой линии [12]. Восточнее м. Евпаторийский поток наносов ослабевает. Основное перемещение донного материала происходит до глубин 10–15 м вдоль всего участка от м. Урет до м. Евпаторийский. Максимальные расчетные значения  $q$  при действии западного ветра достигают 5–6 кг/м/с у выступов берега. При этом наблюдается уменьшение  $q$  у вогнутостей, что способствует отложению в них материала и в целом – спрямлению береговой линии.

**При юго-западном ветре** (рис. 5, c; 7, c) вдольбереговой поток наносов направлен от м. Урет к северной косе оз. Донузлав, где встречается с потоком противоположного направления. Восточнее оз. Донузлав возникают разнонаправленные вдольбереговые потоки, при этом в вогнутостях берега формируются зоны их конвергенции. Перемещение материала происходит до глубин 20 м вдоль всего участка от м. Урет до м. Евпаторийский со значениями  $q$  в диапазоне 1–4 кг/м/с. У выступов берега к западу от м. Евпаторийский  $q$  достигает 5–6 кг/м/с. Восточнее м. Евпаторийский значения  $q$  резко уменьшаются до 0,5 кг/м/с в районе Майнакской пересыпи, а еще восточнее вновь увеличиваются до 3–6 кг/м/с.

**При южном ветре** (рис. 6, *a*; 8, *a*) в структуре вдольбереговых потоков наносов выделяется несколько зон, где потоки разнонаправлены. Два наиболее крупных потока (один – от м. Урет, другой – от п. Витино) встречаются западнее пересыпи оз. Донузлав в районе урочища Беляус. В восточной части, как и при действии юго-западного ветра, образуются разнонаправленные потоки наносов с зонами конвергенции в вогнутостях берега. Для рассматриваемого направления ветра значения  $q$  в среднем составляют 3–5 кг/м/с.

**При юго-восточном и восточном ветрах** (рис. 6, *b, c*; 8, *b, c*) мощность вдольбереговых потоков наносов резко уменьшается, а сами они имеют разнонаправленное движение, не образуя единого потока на каком-либо протяженном участке береговой линии. Характерная величина  $q$  составляет 50–60 г/м/с. При восточном ветре значительные районы побережья находятся в волновой тени. Как и в других случаях, характерная особенность здесь – образование зон конвергенции потоков в вогнутостях берега и зон дивергенции – в его выступах. В районе входного канала оз. Донузлав при действии юго-восточного ветра потоки наносов расходятся в противоположных направлениях.

Сравнительный анализ результатов численного моделирования показывает, что наиболее интенсивные потоки наносов на участке м. Урет – м. Евпаторийский возникают под воздействием волнения, сформированного ветрами западного, юго-западного и южного направлений. Поскольку наибольшую повторяемость имеют ветры и волнение юго-западного направления, то наиболее характерной схемой движения наносов является схема, представленная на рис. 5, *c*.

Основное перемещение материала происходит до глубин 10–15 м. Для наиболее волноопасных направлений ветра в секторе запад – юг модельные значения удельного расхода наносов составляют: при скорости ветра 7,5 м/с – 10–25 г/м/с (у выступов берега 50–100 г/м/с); при скорости ветра 10 м/с расход наносов 200–400 г/м/с (у выступов берега 700–800 г/м/с); при скорости ветра 15 м/с – 1–4 кг/м/с (5–6 кг/м/с). Увеличение значений расхода потока наносов на подводном склоне напротив выступов берега и их уменьшение у вогнутостей приводит к перемещению и отложению материала в береговой зоне последних.

Сравнение полученных схем движения наносов с ранее существовавшими, проанализированными выше, показывает, что наиболее близки к полученной нами характерной схеме движения наносов представления, изложенные Е. И. Игнатовым в [15]. Это в общем и не удивительно, так как наибольшую в рассматриваемом районе повторяемость имеют ветры и волнение юго-западного направления, что, естественно, и отразилось в расчетах, сделанных им для преобладающего ветра за многолетний период. Вместе с тем частично не подтверждается схема движения наносов, предложенная Ю. Д. Шуйским [12], согласно которой в сторону пересыпи оз. Донузлав направлен результирующий поток на участке м. Евпаторийский – пересыпь лагуны оз. Солёное. Тем более не подтверждаются и более ранние представления, согласно которым существует единый поток, направленный на восток от м. Урет до м. Евпаторийский. Можно согласиться с тем, что часть наносов во второстепенных подвижках огибают м. Евпаторийский и проникают в одноименную бухту,

что подтверждают и наши расчеты. В. П. Зенкович 60 лет назад писал, что признаков современного значительного перемещения наносов на участке м. Урет – м. Евпаторийский не имеется. Видимых признаков нет и в настоящее время. Прямые наблюдения на створах и анализ космических снимков показывают, что изменчивость конфигурации берега на масштабе десятилетий связана с накоплением наносов в вогнутостях берега и размывах мысов, а на сезонных масштабах – с временными подвижками, вызванными отдельными штормами [13]. Последние при этом могут размывать или, наоборот, выдвигать береговую линию максимально до 25–30 м. Особенно большие изменения происходят в районах, где наносы аккумулируются и их запасы на пляже и подводном береговом склоне наиболее велики (юго-восточнее южной косы оз. Донузлав и у пересыпей соленых озер), что косвенно подтверждает полученные нами результаты математического моделирования.

### Заключение

На основе статистического анализа результатов ретроспективных расчетов ветрового волнения за 1979–2018 гг. и численного моделирования выполнено исследование волнового режима и литодинамических процессов в районе аккумулятивных берегов Западного Крыма на участке м. Урет – м. Евпаторийский. Получены следующие основные результаты:

- для волногенерирующих направлений наибольшую повторяемость (6%) имеет юго-западный ветер. Средние многолетние значения скорости ветра и высоты значительных волн равны 7,3 м/с и 0,87 м соответственно;
- максимальные значения скорости ветра составляют 24,5–25,9 м/с, высоты значительных волн 6,5–7,8 м, среднего периода волн 11,2–11,4 с;
- наиболее вероятными и волноопасными являются волны юго-западного и юго-юго-западного направлений;
- наиболее интенсивные вдольбереговые потоки наносов на исследуемом участке возникают под воздействием волнения, сформированного ветрами западного, юго-западного и южного направлений;
- при северо-западном и западном ветрах формируется генеральный поток наносов, направленный на восток. При действии западного ветра юго-восточнее пересыпи оз. Донузлав в вогнутостях берега перемещение материала происходит в противоположном направлении;
- при юго-западном и южном ветрах вдольбереговой поток наносов направлен от м. Урет к северной косе оз. Донузлав, где встречается с потоком противоположного направления. Юго-восточнее оз. Донузлав возникают разнонаправленные вдольбереговые потоки, при этом в вогнутостях берега формируются зоны их конвергенции;
- при юго-восточных и восточных ветрах мощность вдольбереговых потоков наносов резко уменьшается, а сами они имеют разнонаправленное движение, не образуя единого потока на каком-либо протяженном участке береговой линии;
- для наиболее волноопасных направлений ветра в секторе запад – юг модельные значения удельного расхода наносов составляют: при скорости ветра 7,5 м/с – 10–25 г/м<sup>2</sup> (у выступов берега 50–100 г/м<sup>2</sup>); при скорости

ветра 10 м/с расход наносов 200–400 г/м/с (у выступов берега 700–800 г/м/с); при скорости ветра 15 м/с – 1–4 кг/м/с (5–6 кг/м/с);

– увеличение значений расхода потока наносов на подводном склоне напротив выступов берега и уменьшение у вогнутостей приводит к перемещению и отложению материала в береговой зоне последних;

– определены параметры ветровых волн, возможные 1 раз в год, в 5, 10, 25 и 50 лет.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горячкин Ю. Н., Долотов В. В.* Морские берега Крыма. Севастополь : Колорит, 2019. 254 с. URL: <http://coast-crimea.ru/index.php/research/monograph> (дата обращения: 15.06.2020).
2. *Горячкин Ю. Н.* Апвеллинг у берегов Западного Крыма // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 5. С. 399–411. doi:10.22449/0233-7584-2018-5-399-411
3. *Booij N., Ris R. C., Holthuijsen L. H.* A third-generation wave model for coastal regions. 1. Model description and validation. // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1999. Vol. 104, iss. C4. P. 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
4. Maximum Waves in the Black Sea / B. Divinskii [et al.] // Proceedings of the Fourteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation. MEDCOAST 2019, 22–26 October 2019, Marmaris, Turkey / Ed. E. Özhan. Ortica, Müğla, Turkey : Mediterranean Coastal Foundation, 2019. Vol. 2. P. 799–810
5. Extreme wind waves in the Black Sea / B. V. Divinsky [et al.] // Oceanologia, Vol. 62, iss. 1. P. 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2019.06.003>
6. *Дзенс-Литовский А. И.* Пересыпи и косы крымских соляных озер // Известия Государственного географического общества. 1933. Т. 65, вып. 6. С. 585–595.
7. *Зенкович В. П.* Изучение динамики берегов Западного Крыма // Вопросы географии. Вып. 3. 1947. С. 205–206.
8. *Зенкович В. П.* Строение берега Западного Крыма у Евпатории // Вопросы географии. Вып. 7. 1948. С. 179–186.
9. *Зенкович В. П.* Морфология и динамика советских берегов Черного моря. Т. 2. М. : Издательство Академии наук СССР, 1960. 216 с.
10. *Косьян Р. Д., Пыхов Н. В., Филиппов А. П.* Вертикальное распределение концентрации и состава взвешенных наносов в зоне разрушения волн // Океанология. 1978. Т. XVIII, вып. 6. С. 1064–1069.
11. *Долотов Ю. С., Шадрин И. Ф., Юркевич М. Г.* О динамике рельефа подводного берегового склона, сложенного ракушечным материалом // Новые исследования береговых процессов / Отв. ред. В. П. Зенкович. М. : Наука, 1971. С. 110–119.
12. *Шуйский Ю. Д.* Основные закономерности морфологии и динамики западного берега Крымского полуострова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. Вып. 13. С. 62–72.
13. *Горячкин Ю. Н.* Межгодовая изменчивость береговой линии участка аккумулятивного берега Западного Крыма (мыс Евпаторийский – озеро Донузлав) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. Вып. 3. С. 25–36. doi:10.22449/2413-5577-2019-3-25-36
14. *Кнапс Р. Я.* О расчете мощности вдольбереговых потоков песчаных наносов в море // Океанология. 1968. Т. VIII, вып. 5. С. 848–857.
15. *Игнатов Е. И.* Современное состояние береговой зоны Черного моря вдоль юго-западного Крыма // Причорноморский экологический бюллетень. 2010. № 1 (35). С. 60–73.

16. *Лонгинов В. В.* Обзор методов расчета вдольберегового перемещения наносов в береговой зоне моря // Труды Союзморниипроекта. 1966. № 14 (20). С. 40–41.
17. *Иванов В. А., Фомин В. В.* Математическое моделирование динамических процессов в зоне море – суша. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 364 с.
18. *Иванов В. А., Михинов А. Е.* Прогноз динамики наносов в прибрежной зоне моря (практические рекомендации и примеры расчетов) // Препринт. Севастополь : МГИ АН УССР, 1991. 50 с.
19. Динамика наносов в прибрежной зоне Южного берега Крыма / В. А. Иванов [и др.] // Препринт. Севастополь : МГИ АН Украины, 1993. 36 с.
20. *Шуйский Ю. Д.* Механический состав пляжевых наносов на западных берегах Крымского полуострова // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. Вып. 15. С. 370–385.

*Об авторах:*

**Горячкин Юрий Николаевич**, главный научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2807-201X**, **ResearcherID: I-3062-2015**, *yngor@mhi-ras.ru*

**Фомин Владимир Владимирович**, заведующий отделом вычислительной техники и математического моделирования, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, *v.fomin@ukr.net*