

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-4-103-110>

УДК 627.41: 551.466, 551.465.5(477.75)



МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕМКОСТИ ПОТОКА НАНОСОВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕРЕГОЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА УЧАСТКЕ ТУАПСЕ-АДЛЕР СКЖД

Г.В. Тлявли́на^{1,2✉}, К.Н. Мака́ров³, Р.М. Тлявлин¹

¹ Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт транспортного строительства», Научно-исследовательский центр «Морские берега»; 354002, г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, 1, Россия

² Российский университет транспорта (МИИТ); 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, Россия

³ Сочинский государственный университет; 354003, г. Сочи, ул. Пластунская, 94, Россия

Аннотация. Объектом исследований, представленных в статье, являются литодинамические процессы в береговой зоне моря. Рассматривается проблема оценки транспорта наносов под воздействием штормовых волн с целью выбора метода инженерной защиты. Рассмотрен участок между реками Куапсе и Свирская Лазаревского района г. Сочи, вдоль которого проходит железнодорожное полотно. Для этого участка выполнено математическое моделирование емкости потока наносов в береговой зоне. Исследования проведены с использованием метода математического моделирования. Математическое моделирование выполнено на основе цифровых моделей местности по методикам, которые использованы авторами в качестве основы нормативных методов расчета литодинамических характеристик морской береговой зоны в СП 277.125800.2016. Даны результаты расчетов транспортирующей способности водного потока (емкости) вдольберегового потока наносов в среднемноголетнем разрезе на исследуемом участке. Приведены результаты моделирования транспорта наносов в штормах обеспеченностью 2%. В процессе моделирования исследована ситуация, когда волногасящая полоса полного профиля отсыпана из материала со средней крупностью 70 мм.

Ключевые слова: берегозащита, емкость потока наносов, инженерная защита, литодинамические исследования, математическое моделирование, морские волны

Формат цитирования: Тлявли́на Г.В., Мака́ров К.Н., Тлявлин Р.М. Моделирование емкости потока наносов для проектирования берегозащитных сооружений на участке Туапсе-Адлер СКЖД // Природообустройство. 2025. № 4. С. 103-110. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-4-103-110>

Scientific article

MODELING OF SEDIMENT FLOW CAPACITY FOR DESIGNING COASTAL PROTECTION STRUCTURES ON THE TUAPSE-ADLER SECTION OF THE NORTH CAUCASUS RAILWAY

G.V. Tlyavlina^{1,2✉}, K.N. Makarov³, R.M. Tlyavlin¹

¹ Joint Stock Company «Central Scientific Research Institute of Transport Construction», R&D Centre «Morskie berega»; 354002, Sochi, Yana Fabritciusa str., 1, Russia

² Russian University of Transport (MIIT); 127994, GSP-4, Moscow, Obraztsova St, 9, B. 9, Russia

³ Sochi State University; 354003, Sochi, Plastunskaya st, 94, Russia

Abstract. In this article, the object of research is the lithodynamic processes in the coastal zone of the sea. The problem of assessing sediment transport under the influence of storm waves is considered in order to select a method of engineering protection. The section between the Kuapse and Svirskaya rivers of the Lazarevsky district of Sochi, along which the railway line runs, is considered. Mathematical modeling of sediment flow capacity in the coastal zone was performed for this site. The research was carried out using mathematical modeling. Mathematical modeling was performed based on digital terrain models using the methods used by the authors as the basis for regulatory methods for calculating the lithodynamic characteristics of the marine coastal zone in SP 277.125800.2016. The results of calculations of the transport capacity of the water flow (capacity) of the alongshore sediment flow in the average annual section of the study area are presented. The results of modeling the transport of sediment in storms with a 2% probability are also presented. During the modeling process, the situation was studied when the full-profile wave-absorbing strip was filled with material with an average grain size of 70 mm.

Keywords: coastal protection, sediment flow capacity, engineering protection, lithodynamic studies, mathematical modeling, sea waves

Format of citation: Tlyavlina G.V., Makarov K.N., Tlyavlin R.M. Modeling of sediment flow capacity for the design of coastal protection structures on the Tuapse-Adler section of the North Caucasus Railway // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 4. P. 103-110. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-4-103-110>

Введение. При проектировании морских берегозащитных сооружений одной из наиболее сложных задач является правильная оценка существующих литодинамических процессов в береговой зоне [1-3]. Литодинамические исследования являются составной частью гидрометеорологических изысканий, при выполнении которых в общем случае необходимо выполнить следующие виды работ: выделить литодинамические системы, оценить интенсивность литодинамических процессов, изучить динамику наносов и спрогнозировать возможные деформации берегов и дна.

Основной характеристикой динамики наносов в морской береговой зоне в свою очередь является емкость потока наносов (то есть максимальное количество наносов, которое волны и течения способны перемещать вдоль рассматриваемого участка берега). В зависимости от направления перемещения наносов относительно берега различают поперечное и продольное перемещение наносов [4, 5].

В работе на примере конкретного участка берега исследованы процессы возможного перемещения наносов волнами.

Участок расположен на Черноморском побережье Краснодарского края, в Лазаревском районе г. Сочи между реками Куапсе и Свирская. Участок является частью бухты, образованной аккумулятивными выступами рек Аше и Псезуапсе. В плане он представляет собой относительно ровный берег, азимут которого в среднем составляет 145° . Средний уклон дна – $i = 0,022$. Вдоль всего рассматриваемого участка проходит линия железной дороги. Полотно железнодорожного пути проходит полувыемкой в непосредственной близости от берега моря. Искусственные сооружения на рассматриваемом участке представлены малыми мостами, водопропускными трубами и лотками, волноотбойными и подпорными стенами [6-8].

В связи с сокращением твердого стока р. Аше и перехватом системой бун, расположенной на участке берега между устьями рек Аше и Куапсе, рассматриваемый участок берега находится в зоне низовых размывов. В настоящее время пляжный материал из вдольберегового потока наносов на участок берега, расположенный на 1910-1911 км СКЖД, не поступает, то есть мощность потока наносов практически равна нулю [7].

Для оценки исходного объема отсыпок выполнено математическое моделирование емкости вдольберегового потока наносов (транспортирующей способности водного потока) на участке.

Цель исследований: изучение литодинамических процессов в береговой зоне моря, проблем оценки транспорта наносов под воздействием штормовых волн с целью выбора метода инженерной защиты; математическое моделирование емкости потока наносов в береговой зоне.

Материалы и методы исследований. Метод исследований – математическое моделирование. Используемая математическая модель основана на методах расчета, содержащихся в СП 277.125800.2016 и реализованных в программных комплексах профессора К.Н. Макарова, а именно на методиках расчетов морского волнения, воздействия волн на берегозащитные сооружения и пляжи, перемещения инертных материалов, а также использованы оригинальные разработки авторов по динамике галечных пляжей [4, 8].

При выполнении математического моделирования на предварительном этапе разрабатывались цифровые модели местности акватории [8]. По этим моделям рассчитывался также вдольбереговой транспорт наносов.

Результаты и их обсуждение. Объемы перемещаемых наносов меняются от шторма к шторму. Это обусловлено вариациями силы и направления волнения и течений в различных штормах, которые вызывают подвижки наносов различных величин и направлений (миграции наносов). Сумма миграций за некоторый (обычно годовой) период времени называется вдольбереговым потоком наносов.

Различают емкость (транспортирующую способность водного потока), то есть предельно возможный перенос наносов во вдольбереговом потоке, и мощность (расход) – реально транспортируемый объем наносов.

В работах [4, 9-12] представлены различные методы расчета емкости вдольберегового транспорта наносов, показывающие в некоторой степени теоретико-эмпирическую природу. Тем не менее основная часть авторов ориентируется на построение зависимостей, характерных видов, полученных в источниках [4, 13, 14]:

$$Q = f(h_{cr}, d_{cr}, d_{50}, A_{cr}, tg\varphi_0), \quad (1)$$

где Q – емкость потока наносов; h_{cr} – высота волны, зарегистрированной на линии последнего обрушения; d_{50} – средний диаметр частиц наносов, характеризующий средний размер взвешенных компонентов; A_{cr} – угол, под которым волны расположены точно к линии обрушения, влияющие на динамику переноса материала; $tg\varphi_0$ – уклон, отражающий устойчивый баланс между депозиционными и абразионными процессами в прибрежной зоне.

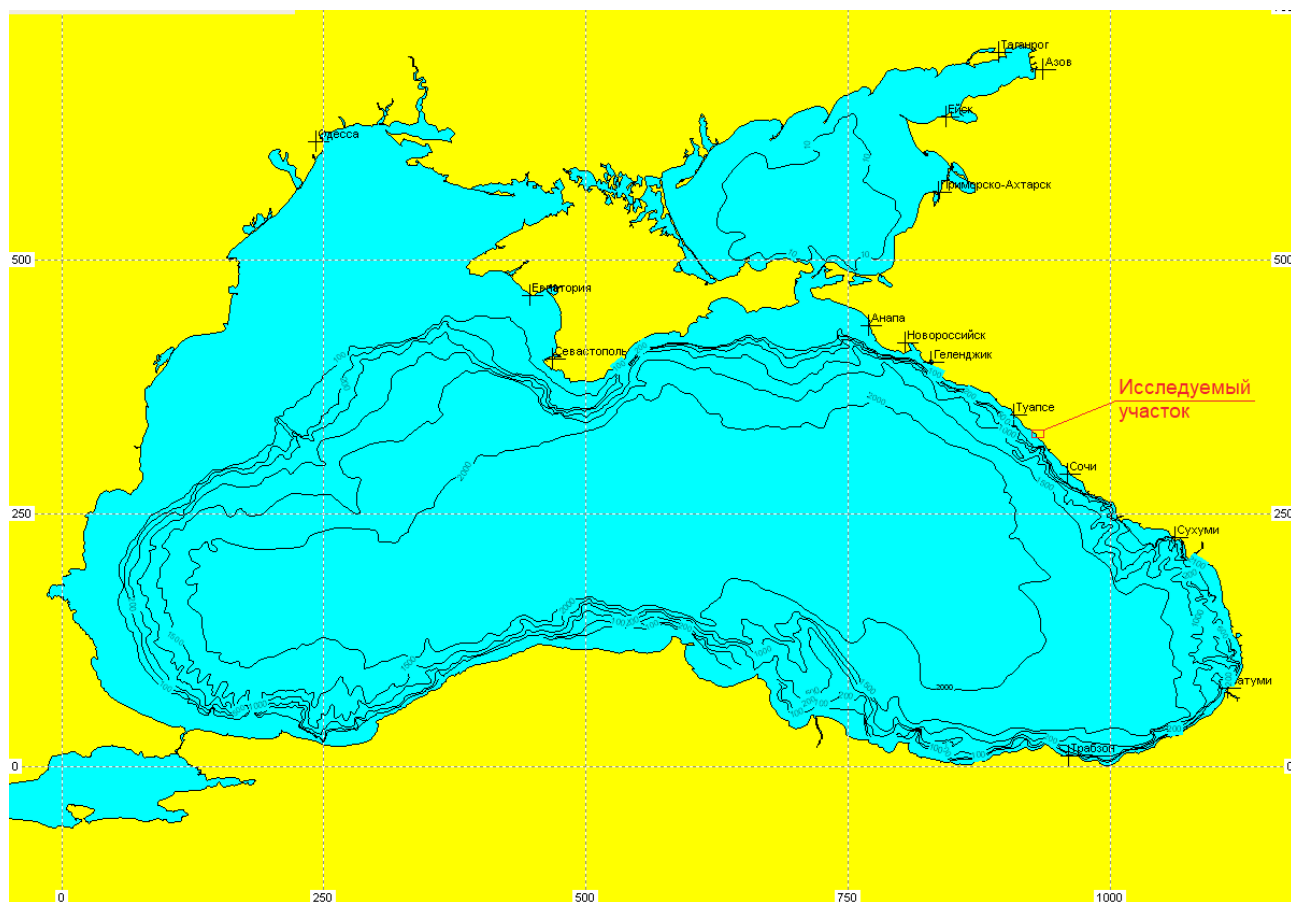


Рис. 1. Отображение цифровой модели Черного моря

Fig. 1. Display of the digital model of the Black Se

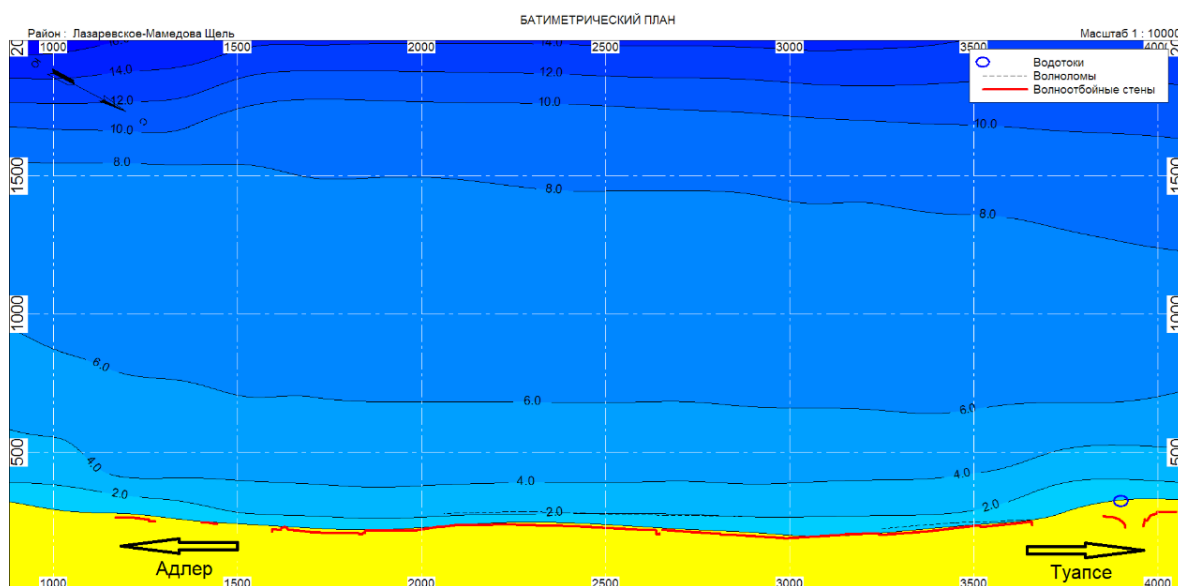


Рис. 2. Отображение цифровой модели участка исследований

Fig. 2. Display of a digital model of the research area

Таблица 1. Расположение расчетных створов

Table 1. Location of the design cross-sections

№	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Коорд. по оси X X-axis coord.	680	850	1020	1190	1360	1530	1700	1870	2040	2210	2380	2550	2720	2890	3060	3230

Фактическая мощность вдольберегового потока наносов рассчитывается по следующей формуле:

$$Q_m = Q K_{red} \quad (2)$$

где Q_m – фактическая мощность потока наносов; K_{red} – коэффициент, отражающий влияние на дефицит наносного материала на подводном береговом склоне, а также наличие инженерных сооружений, изменяющих природные условия транспортировки.

Данные зависимости применимы к песчаным наносам и выражаются через формулу:

$$Q = 0,0023g \left(\frac{v}{D_{50\%}} \right)^{0,5} (h_{cr13\%} \bar{T})^{1,5} \sin 2\Theta, \quad (3)$$

где v – коэффициент кинематический вязкости воды, m^2/c ; $D_{50\%}$ – типичный диаметр зерен песка, который отражает преобладающий класс размеров фракций, м; $h_{cr13\%}$ – высота волн, фиксируемая по линии первого обрушения, обеспеченностью 13% в системе, м; Θ – угол между направлением волнового луча на линии первого обрушения и нормалью к береговой линии, град.

Для галечных наносов с диаметром частиц, превышающим 2 мм, вычисление емкости потока наносов производится на основании следующей зависимости:

$$Q = 0,087 \frac{\rho}{\rho_n} g \frac{h_{cr}^3 \bar{T} \Delta t}{k_{ок} d_{50\%}} \sin 2\alpha_{cr}, \quad m^3/сут., \quad (4)$$

где h_{cr} – высота волны по линии последнего обрушения, м; \bar{T} – средний период волн, с; $d_{50\%}$ – медианный диаметр пляжеобразующего материала, м; ρ_n – объемный вес наносов, $кг/м^3$; ρ – объемный вес воды, $кг/м^3$; α_{cr} – угол подхода волн к линии последнего обрушения, град.; Δt – время действия данного волнения, сут.; $k_{ок}$ – коэффициент, учитывающий влияние степени окатанности пляжевого материала на интенсивность его перемещения.

Известно, что при подходе морских волн к берегу под некоторым углом направление движения жидкости не совпадает с направлением силы тяжести, которая всегда направлена по нормали к берегу (по линии наибольшего ската) [4, 5].

Этим обусловлено то, что частицы наносов движутся по неким криволинейным траекториям, не совпадающим с направлением распространения волн. При этом наибольший объем перемещения наблюдается в узкой приустьевой полосе. Для условий Черноморского побережья Кавказа при сильных штормах скорость перемещения гальки достигает $0,9 \div 1,0$ км/сут., а мощность – до $4 \div 5$ тыс. $m^3/сут.$

Расчетные скорости ветра от волноопасных для исследуемого участка направлений повторяемостью 1 раз за 50 лет составляют 24 м/с.

Для моделирования литодинамических процессов на данном участке берега приняты следующие параметры волнения обеспеченностью 1%, полученные в работе [8]:

- высота волн на глубокой воде – $11,2 \div 11,7$ м;
- высота волн по линии последнего (второго) обрушения – $h_{cr1\%} = 4,2$ м;
- глубина обрушения волн – $d_{cr1\%} = 5,3$ м;
- средний период волн – $T = 9,8$ с;
- средняя длина волн – $\lambda = 53$ м;
- угол между лучом волны и нормалью к линии берега – 8° .

Также в работе [8] получены параметры волнения обеспеченностью 5 и 30%:

- высота волн по линии последнего обрушения – $h_{cr5\%} = 3,7$ м; $h_{cr30\%} = 2,8$ м;
- глубина последнего обрушения – $d_{cr5\%} = 4,6$ м; $d_{cr30\%} = 3,5$ м.

Среднегодовое роза волнений для района исследований представлена на рисунке 3.

На участке Туапсе-Адлер пляжи в естественных условиях представлены галькой средней крупности. Поэтому математическое моделирование литодинамических процессов на этом участке выполнено для полнопрофильной волногасящей полосы из материала со средней крупностью 70 мм (табл. 2).

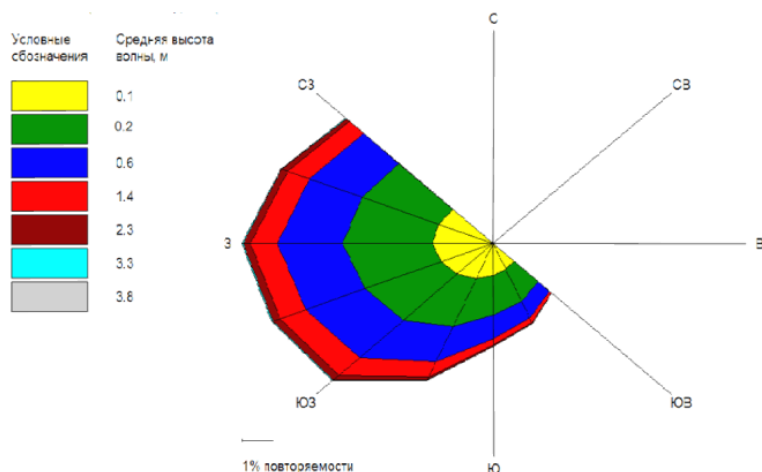


Рис. 3. Среднегодовое роза волнений для района исследований

Fig. 3. The average long-term rose of wave for the research area

Таблица 2. Результаты расчета емкости среднемноголетнего вдоль берегового потока наносов по створам ЦММ участка проектирования

Table 2. The results of the calculation of the capacity of the average long-term coastal sediment flow along the cross-sections of the CMM design site

№ створа ЦММ No CMM cross-section	Азимут участка берега, градус Azimuth of the seashore section, degree	Емкость среднемноголетнего вдольберегового потока наносов со средней крупностью 70 мм, м ³ /год Capacity of the average long-term sediment flow along the seashore with an average particle size of 70 mm, m ³ /year		
		на СЗ	на ЮВ	Результирующий
5	330	15198	24423	9225
6	334	16397	21489	5092
7	333	16167	22195	6028
8	331	15538	23749	8211
9	332	15780	23204	7424
10	330	15299	24232	8933
11	328	14765	25158	10393
12	324	13159	27090	13931
13	321	11608	28232	16624
14	323	12527	27619	15092
15	327	14237	25911	11674
16	329	15028	24726	9698
17	329	15018	24743	9725
18	329	15056	24677	9621
19	325	13874	26354	12480
20	320	11225	28443	17218
Среднее Average	328	14430	25140	10710

Таблица 3. Емкость штормовых потоков наносов (1 раз за 50 лет) в тыс. м³/сутки на участке проектирования по створам ЦММ

Table 3. The capacity of storm sediment flows (1 time in 50 years) in thousand m³/day at the design site along the CMM cross-sections

№ створа ЦММ No CMM cross-section	Направление шторма / Storm direction						
	ЮЮВ / SSE	Ю / S	ЮЮЗ / SSW	ЮЗ / SW	ЗЮЗ / WSW	З / W	ЗСЗ / WNW
5	7,4	11,9	17,3	12,5	-9,2	-26,9	-17,2
6	6,8	11,3	17,6	15,2	-4,2	-25,0	-17,5
7	6,9	11,5	17,6	14,6	-5,4	-25,5	-17,5
8	7,3	11,7	17,4	13,2	-8,0	-26,5	-17,3
9	7,1	11,6	17,5	13,8	-7,1	-26,1	-17,4
10	7,4	11,8	17,3	12,7	-8,9	-26,8	-17,3
11	7,6	12,0	17,2	11,6	-10,6	-27,4	-17,1
12	8,2	12,4	16,5	8,5	-14,4	-28,5	-16,6
13	8,6	12,6	15,7	5,6	-17,0	-29,0	-16,1
14	8,4	12,4	16,2	7,3	-15,5	-28,8	-16,4
15	7,8	12,1	17,0	10,6	-12,0	-27,8	-16,9
16	7,5	11,9	17,3	12,2	-9,8	-27,1	-17,2
17	7,5	11,9	17,3	12,1	-9,8	-27,1	-17,2
18	7,5	11,9	17,3	12,2	-9,7	-27,1	-17,2
19	7,9	12,2	16,8	9,9	-12,9	-28,1	-16,8
20	8,7	12,6	15,5	5,0	-17,5	-29,1	-16,0
Среднее	7,7	12,0	17,0	11,1	-10,8	-27,3	-17,0

Примечание: положительный поток наносов направлен в сторону г. Туапсе, отрицательный – в сторону Адлера

Note: the positive flow of sediment is directed towards the city of Tuapse, the negative flow is directed towards Adler

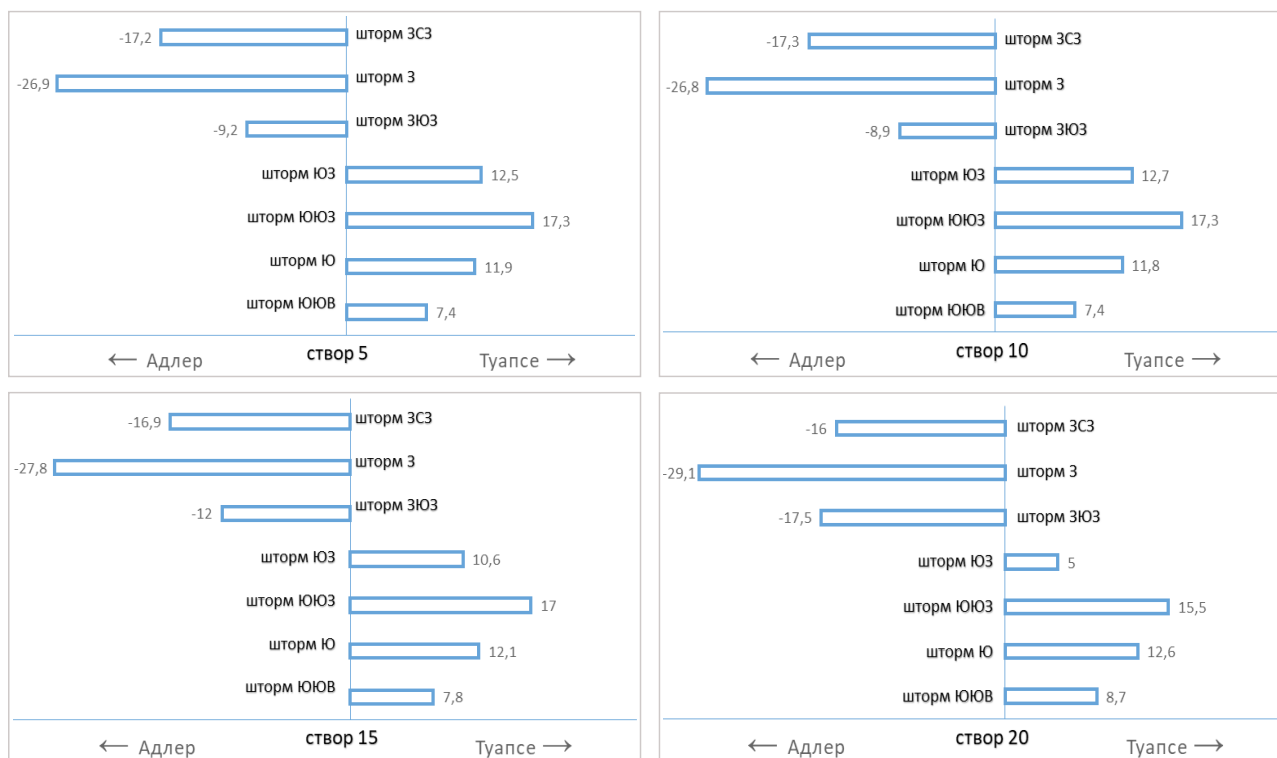


Рис. 4. Емкость потока наносов по расчетным створам 5, 10, 15 и 20 в штормах повторяемостью 1 раз в 50 лет, м³/сутки

Fig. 4. Sediment flow capacity according to design cross-sections 5, 10, 15 and 20 in storms repeatability 1 time in 50 years, m³/day

Из данных таблицы 2 следует, что в случае отсыпки на проектном участке пляжа полного профиля из материала со средней крупностью 70 мм среднегоголетний вдольбереговой поток наносов будет направлен на ЮВ. Его среднегоголетняя емкость составляет 10,71 тыс. м³/год.

Размах миграций наносов весьма значителен и составляет порядка 14,43 тыс. м³/год на СЗ и 25,14 тыс. м³/год на ЮВ.

В таблице 3 приведены результаты расчета транспорта наносов в штормах повторяемостью 1 раз за 50 лет.

Емкость потока наносов по четырем расчетным створам в штормах повторяемостью 1 раз в 50 лет представлена на рисунках 4, 5.

По результатам выполненных расчетов можно сделать вывод о том, что с точки зрения размыва пляжа наиболее опасными на рассмотренном участке являются штормы от ЮЮЗ и З направлений.

Выводы

По результатам выполненного математического моделирования получено, что среднегоголетний вдольбереговой поток наносов на данном участке направлен с СЗ на ЮВ. В случае отсыпки на проектном участке полнопрофильной волногасящей полосы

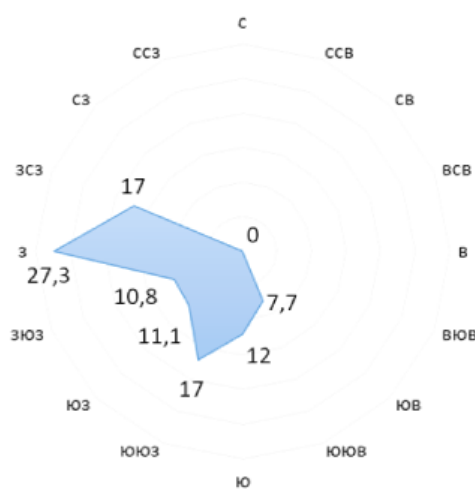


Рис. 5. Результирующая емкость потока наносов в штормах волноопасных направлений повторяемостью 1 раз в 50 лет, м³/сутки

Fig. 5. The resulting sediment flow capacity in storms of wave-prone directions, recurrence of 1 time every 50 years, m³/day

из материала со средней крупностью 70 мм его среднегоголетняя емкость составляет 10,7 тыс. м³/год. При таких значительных объемах в условиях отсутствия естественного вдольберегового потока наносов для защиты берега на данном участке необходимы либо

строительство защитной бермы из камня или фасонных массивов (что неприемлемо для рекреационных зон), либо отсыпка здесь волногасящего пляжа.

Подход равнодействующей волнового режима под углом к берегу на данном участке обуславливает вовлечение отсыпаемого пляжного материала во вдольбереговое перемещение и его смещение в юго-восточном направлении в сторону Адлера. В этих условиях сохранность

создаваемого волногасящего галечного пляжа можно обеспечить только под прикрытием пляжеудерживающих сооружений. Вариант постоянных пополнений с верховой стороны размытых пляжей при отсутствии в настоящее время вдольберегового потока наносов является экономически невыгодным.

Полученные результаты согласуются с материалами предыдущих исследований для данного участка берега.

Список использованных источников

1. Powell E.J. A Review of Coastal Management Approaches to Support the Integration of Ecological and Human Community Planning for Climate Change / E.J. Powell, M.C. Tyrrell, A. Milliken, J.M. Tirpak, M.D. Staudinger // *Journal of Coastal Conservation*. 2019. Vol. 23. Iss. 1. P. 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11852-018-0632-y>
2. Rangel-Buitrago N. Risk Assessment as Tool for Coastal Erosion Management / N. Rangel-Buitrago W.J. Neal, V.N. De Jonge // *Ocean and Coastal Management*. 2020. Vol. 186. P. 105088-105099. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105099>
3. Stokes K. Forecasting Coastal Overtopping at Engineered and Naturally Defended Coastlines / K. Stokes, T. Poate, G. Masselink, E. King, A. Saulters, N. Ely // *Coastal Engineering*. 2021. Vol. 164. P. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103827>
4. Макаров К.Н. Научно-методическое обоснование Генеральной схемы берегозащиты Сочинской агломерации «Морской Фасад» / К.Н. Макаров, Г.В. Тлявлиная, Р.М. Тлявлин. Сочи: Сочинский государственный университет, 2019. 213 с.
5. Смирнов Г.Н. Океанология / Г.Н. Смирнов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1987. 406 с.
6. Ashpiz E., Savin A., Tlyavlin R., Tlyavlina G. Urgent Issues of Anti-Deformation Measures to Protect Coastal Railways // *Proceedings of the 14th MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation (Marmaris, 22-26 October 2019)*. Marmaris, 2019. Vol. 2. p. 841-852.
7. Тлявлиная Г.В. Влияние литодинамики береговой зоны на безопасность эксплуатации железнодорожного полотна на участке Туапсе-Адлер Северо-Кавказской железной дороги / Г.В. Тлявлиная Г.В., Р.М. Тлявлин, Е.С. Ашпиз // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2024. Т. 14. № 3. С. 580-591. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-3-580-591>
8. Тлявлиная Г.В. Математическое моделирование мероприятий по инженерной защите мостовых переходов от гидродинамических воздействий морской водной среды / Г.В. Тлявлиная, К.Н. Макаров, Р.М. Тлявлин // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. 2024. № S4(71). С. 27-34. DOI: 10.52170/18159265_2024_71_34.
9. Saengsupavanich Ch. Flaws in Coastal Erosion Vulnerability Assessment: Physical and Geomorphological Parameters // *Arabian Journal of Geosciences*. 2021. Vol. 15. Iss. 57. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09368-2>
10. Dean R.G. Beach nourishment: theory and practice. World Scientific Inc. / R.G. Dean. 2002. 399 p.
11. Divinsky B.V. Bottom Sediment Suspension under Irregular Surface Wave Conditions / B.V. Divinsky,

References

1. Powell E.J. A Review of Coastal Management Approaches to Support the Integration of Ecological and Human Community Planning for Climate Change / E.J. Powell, M.C. Tyrrell, A. Milliken, J.M. Tirpak, M.D. Staudinger // *Journal of Coastal Conservation*. 2019. Vol. 23. Iss. 1. P. 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11852-018-0632-y>
2. Rangel-Buitrago N. Risk Assessment as Tool for Coastal Erosion Management / N. Rangel-Buitrago W.J. Neal, V.N. De Jonge // *Ocean and Coastal Management*. 2020. Vol. 186. P. 105088-105099. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105099>
3. Stokes K. Forecasting Coastal Overtopping at Engineered and Naturally Defended Coastlines / K. Stokes, T. Poate, G. Masselink, E. King, A. Saulters, N. Ely // *Coastal Engineering*. 2021. Vol. 164. P. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103827>
4. Makarov K.N. Scientific and methodological substantiation of the general scheme of coastal protection of the Sochi agglomeration "Marine facade" / K.N. Makarov, G.V. Tlyavlina, R.M. Tlyavlin. Sochi: Sochi State University, 2019. 207 p.
5. Smirnov G.N. *Oceanology* / G.N. Smirnov. 2nd ed., revised. and add. Moscow: Higher School, 1987. 406 p.
6. Ashpiz E., Savin A., Tlyavlin R., Tlyavlina G. Urgent Issues of Anti-Deformation Measures to Protect Coastal Railways // *Proceedings of the 14th MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation (Marmaris, 22-26 October 2019)*. Marmaris, 2019. Vol. 2. P. 841-852.
7. Tlyavlina G.V., Tlyavlin R.M., Ashpiz E.S. Influence of lithodynamics of coastal area on the safety of railway operation on the Tuapse-Adler section of the North Caucasus Railway. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2024;14(3):580-591. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2024-3-580-591>
8. Tlyavlina G.V., Makarov K.N., Tlyavlin R.M. Mathematical modeling of engineering protection measures for bridge crossings from hydrodynamic effects of the maritime environment. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2024;(71):27-34. DOI: 10.52170/1815-9265_2024_71_27.
9. Saengsupavanich Ch. Flaws in Coastal Erosion Vulnerability Assessment: Physical and Geomorphological Parameters // *Arabian Journal of Geosciences*. 2021. Vol. 15. Iss. 57. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09368-2>
10. Dean R.G. Beach nourishment: theory and practice. World Scientific Inc. / R.G. Dean. 2002. 399 p.
11. Divinsky B.V. Bottom Sediment Suspension under Irregular Surface Wave Conditions / B.V. Divinsky, R.D. Kosyan // *Oceanology*. 2019. Vol. 59, No. 4. P. 482-490. DOI: 10.1134/S0001437019040039.
12. Dohmen-Janssen C. Sheet flow and suspended sediment due to wave groups in a large wave flume

R.D. Kosyan // *Oceanology*. 2019. Vol. 59, No. 4. P. 482-490. DOI: 10.1134/S0001437019040039.

12. Dohmen-Janssen C. Sheet flow and suspended sediment due to wave groups in a large wave flume / C. Dohmen-Janssen D. Hanes // *Continental Shelf Research*. 2005. 25. P. 333-347. DOI: 10.1016/j.csr.2004.10.009.

13. Leont'yev I.O. Evaluation of depth of closure on a sandy coast / I.O. Leont'yev // *Oceanology*. 2022. T. 62. № 2. C. 258-264.

14. Kos'yan R. Nowadays Problems of Sediment Transport Modelling in the coastal zone / R. Kos'yan, J. Grune, B. Divinskiy, I. Podymov // *Proceedings of 34th Conference on Coastal Engineering*, Seoul, South Korea. 2015. No. 34. Sediment.

15. Петров В.А. Оценка величины вдольберегового потока наносов в литодинамических системах (на примере участка берега между Туапсе и Адлером) / В.А. Петров, Н.А. Ярославцев // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2020. № 4. С. 60-67. DOI: 10.31857/S0869780920040074.

16. Тлявлиная Г.В. Сравнение показателей различных типов берегозащитных сооружений / Г.В. Тлявлиная, Р.М. Тлявлин, И.Ю. Мегрелишвили // *Транспортное строительство*. 2011. № 5. С. 10-12.

Об авторах

Галина Вячеславовна Тлявлиная, канд. техн. наук, заведующий лабораторией моделирования, расчетов и нормирования в гидротехническом строительстве; ORCID ID: 0000-0003-4083-9014, AuthorID: 604630, SPIN-код: 5516-9241, Scopus: 57215131371; TlyavlinaGV@Tsniiis.com

Константин Николаевич Макаров, д-р техн. наук, профессор кафедры Строительства и сервиса; ORCID ID: 0000-0002-6175-3618, AuthorID: 133366, Scopus: 70006042633; ktk99@mail.ru

Роман Маратович Тлявлин, канд. техн. наук, заместитель генерального директора АО ЦНИИТС – руководитель ОП АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега»; ORCID ID: 0000-0002-8648-0492, AuthorID: 123325, SPIN-код: 3365-3637; TlyavlinRM@Tsniiis.com

Критерии авторства / Criteria of authorship

Тлявлиная Г.В., Макаров К.Н., Тлявлин Р.М. провели теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых выполнили обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interest

Вклад авторов / Contribution of authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All the authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 19.03.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Received after peer review and revision 05.09.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 05.09.2025

/ C. Dohmen-Janssen D. Hanes // *Continental Shelf Research*. 2005. 25. P. 333-347. DOI: 10.1016/j.csr.2004.10.009.

13. Leont'yev I.O. Evaluation of depth of closure on a sandy coast / I.O. Leont'yev // *Oceanology*. 2022. T. 62. № 2. C. 258-264.

14. Kos'yan R. Nowadays Problems of Sediment Transport Modelling in the coastal zone / R. Kos'yan, J. Grune, B. Divinskiy, I. Podymov // *Proceedings of 34th Conference on Coastal Engineering*, Seoul, South Korea. 2015. No. 34. Sediment.

15. Petrov V.A., Yaroslavtsev N.A. Evaluation of longshore transport of sediments in lithodynamic systems (by the example of the coast section between Tuapse and Adler). *Geoekologiya journal*. 2020. № 4. P. 60-67.

16. Tlyavlina G.V., Tlyavlin R.M., Megrelishvili I.Yu. Comparison of the indices of various coast-protection structures // *Transport Construction*. 2011. № 5. P. 10-12.

About the authors

Galina V. Tlyavlina, CSs (Tech), head of the laboratory of modeling, calculations and standardization in hydraulic engineering, ORCID ID: 0000-0003-4083-9014, AuthorID: 604630, SPIN-code: 5516-9241, Scopus: 57215131371; TlyavlinaGV@Tsniiis.com

Konstantin N. Makarov, DSs (Tech), professor, head of the Department of Construction and Service, Sochi State University. ORCID ID: 0000-0002-6175-3618, AuthorID: 133366, Scopus: 70006042633; ktk99@mail.ru

Roman M. Tlyavlin, CSs (Tech), deputy general director of the Joint Stock Company «Central research institute of Transport Construction», head of R&D Centre «Seashores», ORCID ID: 0000-0002-8648-0492, AuthorID: 123325, SPIN-code: 3365-3637; TlyavlinRM@Tsniiis.com

Tlyavlina G.V., Makarov K.N., Tlyavlin R. M conducted theoretical and experimental studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism.