

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ
ПРОЦЕССЫ

УДК 551.417

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ВДОЛЬБЕРЕГОВОГО ПОТОКА НАНОСОВ
В ЛИТОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ (НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА БЕРЕГА
МЕЖДУ ТУАПСЕ И АДЛЕРОМ)

© 2020 г. В. А. Петров^{1,*}, Н. А. Ярославцев¹

¹ Филиал АО ЦНИИС Научно-исследовательский центр “Морские берега”,
ул. Яна Фабрициуса, 1, г. Сочи, 354002 Россия

*E-mail: detmi8@mail.ru

Поступила в редакцию 09.12.2019 г.

После доработки 26.03.2020 г.

Принята к публикации 22.04.2020 г.

Берег Черного моря между Туапсе и Адлером является частью литодинамической системы, протянувшейся на 160 км от Туапсе до мыса Пицунда в Абхазии, выделенной по наличию единого вдольберегового потока галечных наносов. Учитывая природные факторы, влияющие на интенсивность береговых процессов и меняющиеся по простирацию этой системы и, в ее пределах выделяются более мелкие литодинамические элементы: подсистемы, районы и участки, границы которых определяются положением устьев рек региона и конфигурацией береговой линии. В пределах рассматриваемого участка берега по устьям крупных рек – основных источников поступления на пляжи крупнообломочного материала, выделено шесть литодинамических подсистем. В настоящее время в связи с возведением оградительных молов Сочинского и Имеретинского портов, прервавших вдольбереговую поток галечных наносов, две из них оказались автономными. Вдольбереговую поток галечных наносов – один из ведущих факторов, определяющий состояние пляжей. Существующие методики по определению его расхода сопряжены с большим объемом вычислений. Предлагается его величину оценивать по зависимости, включающей параметры волны, рассчитанной по энергетической равнодействующей установившегося волнения на глубокой воде, полученной по потокам энергии волн каждого волноопасного направления. Параметры равнодействующей волны на глубокой воде будут одинаковы для участков берега с неизменными направлениями подхода волн. Комплексный анализ природных условий в пределах мелких литодинамических элементов позволит более достоверно оценить морфо-литодинамические процессы, протекающие в пределах береговой зоны на участке восстановления утраченных галечных пляжей, что повысит эффективность проводимых мероприятий.

Ключевые слова: *высота и период волн, литодинамическая система, поток энергии волн*

DOI: 10.31857/S0869780920040074

ВВЕДЕНИЕ

Берег между Туапсе и Адлером, как никакой другой из российских берегов Черного и Азовского морей, испытывает антропогенную нагрузку. Здесь, на относительно небольшом протяжении, расположены Туапсинский и Сочинский порты, грузовой терминал порта Сочи в Адлере – Имеретинский порт, парусный центр. Вдоль всего побережья протянулось полотно железной дороги, для защиты которого от воздействия волн возведены берегозащитные сооружения. Построено большое количество рекреационных комплексов. Все это накладывает определенные требования к пляжам, окаймляющим берег, не только как к рекреационному объекту, но и как к выполняющему берегозащитные функции.

Снижение в последнее время объемов берегозащитного строительства привело к интенсификации абразионных процессов, что создает угрозу нормальной эксплуатации расположенных вдоль побережья транспортных магистралей и объектов оздоровительного предназначения. В 1914 г. до начала строительства железной дороги средняя ширина пляжа на участке берега от Туапсе до р. Мзымта, впадающей в море в центре пос. Адлер, составляла 32 м, и участки берега без пляжа отсутствовали. К 1956 г. вследствие интенсивного вывоза материала с пляжей средняя их ширина сократилась до 17 м, а на протяжении 11 км пляжи были полностью смыты.

В настоящее время общая площадь пляжей, расположенных между Туапсе и р. Мзымта, составляет 211 га, а их средняя ширина – 19.8 м. При

этом на 14.5 км пляж полностью отсутствует, а на 5 км его ширина не превышает 5 м. Это предопределяет проведение мероприятий по защите берега и возведенных объектов от разрушительного воздействия волн, отвечающих современному научно-техническому уровню и соответствующих экологическим и природоохранным требованиям. При условии почти сплошного использования рассматриваемого участка побережья в рекреационных целях этим требованиям наиболее полно отвечают мероприятия по восстановлению или созданию пляжей полного профиля. Максимальная эффективность от берегозащитных мероприятий достигается при их выполнении в пределах всей литодинамической системы, когда в полной мере учитываются протекающие на побережье природные процессы.

Пляж между Туапсе и Адлером сложен преимущественно гравийно-галечными наносами, поставляемыми реками и отчасти поступающими в береговую зону в результате абразии пород коренного дна. Ранее незначительная часть обломочного материала, не имеющая решающего значения, пополняла пляжи от абразии пород берегового уступа. С 1960-х гг. из-за возведения вдоль почти всей протяженности рассматриваемого участка берега подпорно-волноотбойной стены этим поступлением можно пренебречь.

Основным при оценке состояния пляжей и назначении мероприятий по их восстановлению является определение величины вдольберегового потока наносов. Вдольбереговое перемещение наносов определяется воздействием на них волн разных направлений, а точнее вдольбереговыми составляющими волновой энергии. Сгонно-нагонные явления и ветровые (дрейфовые) течения на перемещение галечного материала не оказывают существенного влияния. В пределах рассматриваемого фрагмента побережья со сложной орографией объемы, перемещаемых вдоль берега наносов, распределяются весьма неравномерно и зависят от экспозиции конкретного участка берега. Под воздействием штормовых волн, подходящих к берегу под разными углами, пляжный материал может смещаться в противоположных направлениях. В силу особенностей гидродинамического режима моря результирующее перемещение галечного пляжного материала на рассматриваемом участке берега за длительный период времени направлено с северо-запада на юго-восток, т.е. от Туапсе в сторону Адлера. Это результирующее перемещение наносов под воздействием всего спектра волн за длительный период времени (обычно за год) и является вдольбереговым потоком [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В структуре вдольберегового потока наносов выделяют три составных части, каждая из которых характеризуется доминированием определенных процессов развития:

1) участок зарождения потока наносов, в пределах которого преобладают процессы абразии и размыва;

2) участок транзита вдольберегового потока наносов, где процессы абразии и размыва чередуются с процессами отложения пляжного материала;

3) участок разгрузки, где происходит аккумуляция материала, перемещаемого под воздействием волн.

На участке берега от Туапсе до Адлера нет классического деления вдольберегового потока наносов на зону зарождения, транзита и разгрузки (аккумуляции). В сложных орографических условиях, обуславливающих наличие постоянных и многочисленных небольших ручьев и временных водотоков, зоны зарождения вдольберегового потока наносов и его транзита слились в единую зону — зону насыщения вдольберегового потока наносов.

В относительно чистом виде зоны разгрузки вдольберегового потока наносов (аккумуляции пляжного материала) на рассматриваемом участке берега приурочены к северо-западным флангам аккумулятивных выступов таких рек, как Аше, Псезуапсе, Сочи, Мзымта (рис. 1). Участки аккумуляции пляжного материала также можно наблюдать у мысов, например, Уч-Дере или Видный. В зависимости от поступления пляжеобразующего материала и изменения углов подхода волн к берегу величина вдольберегового потока может меняться.

Как любое природное образование вдольбереговой поток наносов должен иметь начало и окончание. Ранее до возведения портов Туапсе и Сочи от мыса Кодош, расположенного северо-западнее г. Туапсе, и до мыса Пицунда на протяжении 160 км был выражен единый вдольбереговой поток наносов [6]. Это дает основание для выделения этого участка берега в единую литодинамическую систему. Согласно современным представлениям, *литодинамическая система* — это участок береговой зоны, в пределах которого выражен вдольбереговой поток наносов, а его литодинамический режим относительно независим от смежных участков [10]. Следовательно, вдольбереговой поток наносов является основным фактором при выделении литодинамической системы. При этом внутри этой системы может меняться транспортирующая способность волн, зависящая от соотношения их направления с контуром береговой линии. На рассматриваемом

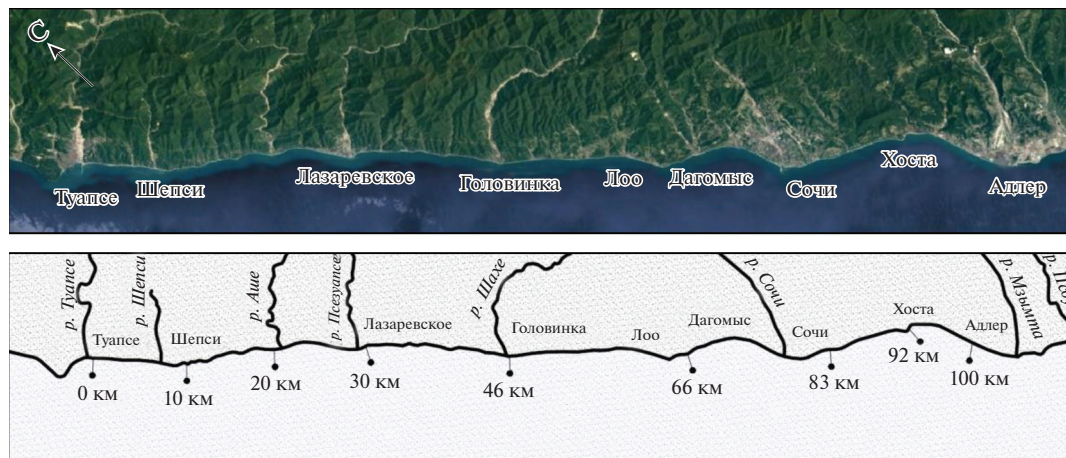


Рис. 1. Карта-схема участка берега Черного моря между Туапсе и Адлером. Цифрами указаны расстояния от Туапсе.

фрагменте берега (Туапсе—Адлер) в выделенной литодинамической системе нет единой зоны зарождения вдольберегового потока наносов и его транзита, так как на всем его протяжении расположены многочисленные источники поступления пляжного материала в береговую зону. В процессе продвижения в юго-восточном направлении по мере своего истощения в основном в результате истирания наносов поток постоянно пополняется галечным материалом от твердого стока крупных и малых рек, а также ручьев и временных водотоков.

На участке берега от Туапсе до Адлера с учетом основных источников поступления материала, каковыми являются крупные реки рассматриваемого региона (Аше, Псеуапсе, Шахе, Сочи и Мзымта), в пределах единой Кодош-Пицундской литодинамической системы по мере пополнения вдольберегового потока наносами можно выделить ее составные части — *литодинамические подсистемы*: Аше-Туапсинскую, Аше-Псеуапсинскую, Шахе-Псеуапсинскую, Шахе-Сочинскую, Сочинско-Мзымтинскую и Псоу-Мзымтинскую. Общее в этих литодинамических подсистемах — наличие вдольберегового потока наносов, направленного с северо-запада на юго-восток. Вдольбереговой поток наносов обходит устья указанных выше рек и выдвинутые в море мысы. Поэтому рассматриваемые подсистемы являются не замкнутыми. Таким образом, на этом участке берега границами литодинамических подсистем являются устья наиболее значимых по величине твердого стока крупных рек.

Внутри выделенных подсистем дополнительное поступление галечного материала происходит в результате твердого стока более мелких рек — Кудепста, Хоста, Псахе, Дагомыс, Лoo, Хобза и ряд других, а также временных водотоков. Внутри литодинамических подсистем, учитывая

поступление пляжного материала от менее значимых рек и влияние на вдольбереговую поток наносов контура береговой линии, можно выделить *литодинамические районы*. Таким образом, литодинамические районы внутри подсистем выделяются с учетом контура береговой линии и поступления в береговую зону пляжного материала из менее значимых, чем для литодинамических подсистем рек. При более подробном анализе внутри литодинамических районов, исходя из конфигурации береговой линии, можно выделить *литодинамические участки*.

Начиная с середины 1930-х гг., после возведения оградительных молв Сочинского порта, ставших преградой для потока наносов, Сочинско-Мзымтинская литодинамическая подсистема оказалась автономной. Оградительные молы Сочинского порта прервали вдольбереговую поток наносов. В связи с этим, на расположенном южнее порта участке берега стали преобладать процессы абразии, и пляжи начали размываться. Пополнение пляжей происходило только за счет наносов, выносимых реками Бзугу, Мацеста, Агура, Хоста, Кудепста и рядом более мелких постоянных или временных водотоков, а также в результате искусственных отсыпок материала.

Аналогичная ситуация возникла и при возведении в 2008 г. Имеретинского порта, расположенного южнее устья р. Мзымта, оградительные молы которого прервали вдольбереговую поток наносов, что явилось причиной размыва пляжа, распространившегося в настоящее время до мыса Константиновского [12]. После строительства Имеретинского порта Псоу-Мзымтинская литодинамическая подсистема также стала автономной.

Существующие эмпирические зависимости позволяют оценить объем пляжного материала, перемещаемого вдоль берега под воздействием

волн с учетом их параметров и продолжительности воздействия. Величина вдольберегового потока наносов, как результирующее перемещение от воздействия штормов всех направлений, обычно определяется как алгебраическая сумма объемов, рассчитанных по грациям высот волн каждого волноопасного направления, предварительно трансформированных с глубокой воды до зоны их обрушения, что предопределяет большой объем вычислений.

В настоящей работе предлагается величину вдольберегового потока наносов определять по параметрам волн, рассчитанных по *энергетической равнодействующей волнения*, под которой понимается векторная сумма среднесезонных годовых румбовых потоков волновой энергии, каждый из которых представляет собой осредненную за длительное время скалярную сумму потоков энергии [4]. Следовательно, величина энергетической равнодействующей определяет интегральную высоту волны и соответствующий ей период от совокупного воздействия на конкретный участок берега волн всех направлений, которые могут быть использованы для определения величины вдольберегового потока наносов. При этом, если в эмпирические зависимости по определению объемов перемещаемого под воздействием волн материала входят параметры волн по их обрушению, то необходимо полученные значения волн на глубокой воде трансформировать до зоны их обрушения.

Идея оценки тенденций развития берега, включая и определение направления движения пляжного материала по волновой энергии, поступающей на рассматриваемый участок берега не нова [1]. При этом энергия может быть рассчитана как по параметрам волн [7], так и по данным о ветре [2]. По обоим этим методам можно получить распределение волновой энергии вдоль рассматриваемого участка берега, которое отражает качественную, но не количественную оценку, протекающим литодинамическим процессам. Разработанные методы не позволяют рассчитать параметры волн, необходимые для определения величины вдольберегового потока наносов.

В качестве примера энергетическая равнодействующая волнения на глубокой воде определена для участка берега от Туапсе до Адлера, входящего во второй район Черного моря, охватывающий акваторию от Крымского полуострова до Абхазии, данные по волновому режиму которого представлены в документе [11]. Следует учитывать, что на конкретных фрагментах берега внутри рассматриваемого района при разной конфигурации береговой линии возможны различия в назначении волноопасных направлений. Так для восточных берегов Крыма, входящих во второй район, перечень волноопасных направлений бу-

дет несколько отличаться от участков берега, расположенных южнее Анапы.

Энергетическая равнодействующая установившегося волнения на глубокой воде определяется по потокам энергии волн каждого волноопасного направления, рассчитанных по высоте и периоду волн.

На участке берега между Туапсе и Адлером расчет потоков энергии в секторе от северо-запада до юго-востока выполнен для пяти волноопасных направлений. Для чего использовались данные о волновых режимах, содержащихся в источнике [11], в котором по грациям с шагом в 1 м для выбранных направлений штормов содержатся сведения о повторяемости и направлении высот волн 3% обеспеченности в системе. При волновых исследованиях обычно используют среднюю в системе шторма высоту волн. В связи с чем, для каждой грации по коэффициенту перехода от волн 3% обеспеченности [3] определены средние высоты волн h_{cp} . Для каждого волноопасного направления с учетом скорости ветра (V) средний период волн по грациям τ определен по безразмерным соотношениям между gh_{cp}/V^2 и $g\tau/V$ [3].

По полученным средним значениям высот и периодам волн вычислен секундный поток энергии [4] по зависимости:

$$\Theta = \frac{\rho g^2}{32\pi} h^2 \tau, \quad (1)$$

где Θ – секундный поток энергии волн, кгм/с³; ρ – плотность морской воды, кг/м³; g – ускорение силы тяжести, м/с²; h и τ – соответственно средние значения высот (м) и периодов волн (с); π – число, равное 3.14.

По вычисленным секундным потокам энергии с учетом их повторяемости (продолжительности) определялись потоки волновой энергии каждой грации волн, суммирование которых давало общий годовой поток волновой энергии по данному волноопасному направлению. В табл. 1 в качестве примера для участка берега от Туапсе до Адлера представлен расчет годового потока волновой энергии штормов юго-западного волноопасного направления.

Значения потоков энергии, полученные по каждому волноопасному направлению, могут быть представлены в виде векторов, по которым в принятом масштабе в соответствующей последовательности с учетом их направления строится энергетический многоугольник [4], показанный на рис. 2. Замыкающая этого энергетического многоугольника представляет собой суммарный вектор волновой энергии или равнодействующую установившегося волнения на глубокой воде для участка берега от Туапсе до Адлера, вектор кото-

Таблица 1. Расчет годового потока энергии волн в штормах юго-западного направления

Диапазоны высот волн, h , м	Средние значения по каждому диапазону наблюдаемых высот волн 3% обеспеченности в системе, $h_{3\%}$, м	Средняя высота волн в диапазоне, $h_{ср}$, м	Средний период волн, τ , с	Повторяемость высот волн		Годовой поток волновой энергии, \mathcal{E} , кгм/с ² (Н)
				%	Время действия волнения, t , с	
0-1	0.50	0.23	2.29	7.5	2365200	282511
1-2	1.50	0.70	4.00	6.5	2049840	3961439
2-3	2.50	1.17	5.16	3.1	977616	6808738
3-4	3.50	1.64	6.17	1.1	346896	5676087
4-5	4.50	2.11	6.97	0.4	126144	3859590
5-6	5.50	2.58	7.66	0.13	40997	2061091
6-7	6.50	3.05	8.36	0.04	12614	967243
>7	7.50	3.52	8.84	0.01	3154	340625
						$\Sigma = 23957324$

рой соответствует величине энергии и ее направлению.

По величине энергетической равнодействующей (см. рис. 2) с учетом повторяемости волнений всех направлений равной 61.2% [11] определено секундное значение равнодействующей потока энергии. По полученной величине энергетической равнодействующей методом итерации подобраны значения высоты волны и ее периода. При этом соблюдены их соотношения в установившемся волнении [3].

Согласно выполненным расчетам, средняя высота волны энергетической равнодействующей волнения на глубокой воде для рассматриваемого участка Черного моря для установившегося волнения $h_{ср}$ составит 0.76 м, а ее средний период $T_{ср}$ – 4.2 с. Направление луча волны будет соответствовать азимуту энергетической равнодействующей и составит 248.5°. Для установившегося волнения полученные параметры равнодействующей волны на глубокой воде будут одинаковыми в пределах выбранного участка берега и будут являться исходными данными для расчета вдольберегового потока наносов.

В береговой зоне от Туапсе до Адлера в основном распространены галечные пляжи. Объем галечного материала, перемещаемый вдоль берега под воздействием волн, может быть определен по зависимости [5, 8]:

$$Q = 0.087 \frac{\rho}{\rho_n} g \frac{h_{ср,1\%}^3}{D_{50\%}} \tau \sin 2\alpha_{ср}, \quad (2)$$

где Q – объем материала, перемещаемый под воздействием волн, м³/сут; ρ и ρ_n – соответственно плотность морской воды и наносов, кг/м³; g – ускорение силы тяжести; $h_{ср,1\%}$ – высота волны по линии ее последнего обрушения 1% обеспеченности в системе шторма, м; τ – средний период

волн, с; $D_{50\%}$ – крупность наносов, соответствующая 50% обеспеченности по кумулятивной кривой их гранулометрического состава, м; $\alpha_{ср}$ – угол между направлением берега и фронтом разрушающейся волны.

Как видно, в зависимости по определению объема материала, перемещаемого под воздействием волн, наряду с другими параметрами входит высота волн 1% обеспеченности в системе расчетного шторма по линии последнего обрушения. Если средний период волн не изменяется при их продвижении к берегу, то для получения высоты волны по линии последнего обрушения необходимо ее значение, определенное по энергетической равнодействующей волнения на глубокой воде, трансформировать в береговую зону с учетом азимута берега и подводного рельефа.

Для осредненной между Туапсе и Адлером линии берега средняя высота волн в последнем об-

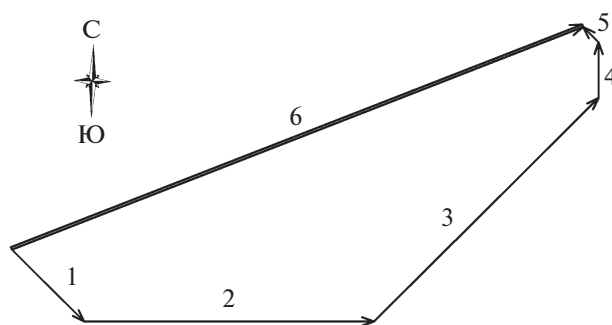


Рис. 2. Построение энергетической равнодействующей волнения для участка берега Туапсе-Адлер. 1–5 – векторы волновой энергии различных волноопасных направлений: 1 – северо-западного, 2 – западного, 3 – юго-западного, 4 – южного, 5 – юго-восточного; 6 – энергетическая равнодействующая волнения азимутом 248.5°.

рушении согласно выполненным расчетам составит 0.73 м, а высота волн 1% обеспеченности в системе, с учетом коэффициента перехода от средней высоты волны к 1% [3] – 1.20 м. Полученные данные по высоте и периоду волн в зоне их последнего обрушения являются исходными данными для расчета величины вдольберегового потока.

При движении волн к берегу наряду с высотой волны меняется и направление их луча или фронта волны. Для выбранного фрагмента берега в результате трансформации азимут луча равнодействующей волны с 248.5° на глубокой воде уменьшается до 237° по линии их обрушения. Исходя из этого, угол между фронтом волн, подходящих к зоне их обрушения (147°), и берегом, осредненный азимут которого равен 136° , будет составлять 11° . Средняя крупность галечных наносов, слагающих пляж на рассматриваемом участке берега, по данным натурных измерений, равняется 0.035 м. Тогда величина вдольберегового потока галечных наносов, рассчитанная по зависимости (2), составит $27.3 \text{ м}^3/\text{сут}$, а с учетом годовой повторяемости (продолжительности) действия волн по всем волноопасным направлениям равной 61.2% – $6.1 \text{ тыс. м}^3/\text{год}$.

В пределах выделенных литодинамических подсистем средние азимуты береговых линий составляют в: Аше-Туапсинской – 133° , Аше-Псеуапсинской – 137° , Шахе-Псеуапсинской – 139° , Шахе-Сочинской – 137° , Сочинско-Мзымтинской – 136° и Псоу-Мзымтинской – 113° . Полученные средние значения азимутов береговой линии в пределах четырех литодинамических подсистем совпадают или близки к азимуту берега осредненного между Туапсе и устьем р. Мзымта равного 136° . Следовательно, и величина вдольбереговых потоков наносов в этих подсистемах будет близка к $6 \text{ тыс. м}^3/\text{год}$, полученной для азимута берега, осредненного между Туапсе и устьем р. Мзымта. Несколько отличается азимут береговой линии в первой Аше-Туапсинской литодинамической подсистеме, где он составляет 133° , в связи с чем, на этом участке берега величина вдольберегового потока галечных наносов составит $7.6 \text{ тыс. м}^3/\text{год}$. Существенное различие в азимуте береговой линии отмечается для Псоу-Мзымтинской литодинамической подсистемы. Здесь угол между осредненным направлением береговой линии и подходящим к берегу фронтом равнодействующей волны составляет $20^\circ\text{--}22^\circ$. При этом угле подхода величина вдольберегового потока наносов увеличивается до $11 \text{ тыс. м}^3/\text{год}$.

Внутри литодинамических подсистем на конкретных фрагментах берега с отличными азимутами береговой линии расчетные величины вдольбереговых потоков наносов могут отличаться от представленных выше. В Аше-Туапсинской

литодинамической подсистеме на участке берега от Туапсе до мыса Магри при азимуте береговой линии равном 140° величина вдольберегового потока наносов составляет $3.9 \text{ тыс. м}^3/\text{год}$, а на участке от мыса до устья р. Аше при азимуте берега 125° увеличивается до $11.3 \text{ тыс. м}^3/\text{год}$. Во второй литодинамической подсистеме восточнее устья р. Аше при азимуте береговой линии равном 115° величина вдольберегового потока галечных наносов возрастает до $14.5 \text{ тыс. м}^3/\text{год}$. В Шахе-Сочинской литодинамической подсистеме западный фланг приустьевого участка берега р. Шахе развернут почти параллельно фронту равнодействующей волны, поэтому ожидать здесь больших объемов материала, перемещаемого вдоль берега, не приходится. Восточнее устья реки, где азимут берега 128° , величина вдольберегового потока увеличивается до $10.0 \text{ тыс. м}^3/\text{год}$. В середине этой подсистемы на участке берега между поселками Якорная Щель и Лоо, где азимут берега равняется 135° , величина потока уменьшается до $6.6 \text{ тыс. м}^3/\text{год}$.

Интерес представляют участки берега и фланги аккумулятивных выступов, расположенные западнее устьев крупных рек. Так азимут береговой линии западного фланга аккумулятивного выступа р. Аше – 146° , аналогичный фланг на р. Псеуапсе – 149° , а р. Шахе – 157° . Азимут линии уреза моря пляжа, расположенного между Лоо и мысом Уч-Дере – 153° . Как видно западные фланги аккумулятивных мысов и свободные галечные пляжи, восточные фланги которых ограждены естественными препятствиями (мысами), под воздействием всего спектра волн разворачиваются параллельно фронту равнодействующей волны. Вследствие чего, величина вдольберегового потока галечного материала здесь снижается.

Максимальная величина вдольберегового потока галечных наносов для приглубых берегов, к которым относится и рассматриваемый участок берега, возможна при угле подхода волн близких к 45° [6]. При этом угле максимально возможная величина вдольберегового потока галечных наносов на участке берега от Туапсе до Адлера может составить $16.3 \text{ тыс. м}^3/\text{год}$. Следует обратить внимание, что полученная величина отражает поток наносов, как результирующее перемещение наносов под воздействием волн разных направлений. Объемы миграций галечных наносов, перемещаемых волнами разных направлений, могут существенно превосходить это значение.

ВЫВОДЫ

Наибольшая эффективность от берегозащитных мероприятий достигается при их осуществлении в пределах литодинамической системы, выделенной до начала выполнения необходимых

разработок. Основная характеристика при оценке процессов, протекающих в литодинамической системе, — расход вдольберегового потока наносов, величина которого определяется интегральным воздействием штормовых волн разных направлений.

Существующие методики по его определению громоздки и трудоемки. Предлагается расход вдольберегового потока наносов оценивать по параметрам волны, рассчитанной по энергетической равнодействующей установившегося волнения на глубокой воде, полученной из потоков энергии волн каждого волноопасного направления.

Для участка берега от Туапсе до Адлера средняя высота равнодействующей волны на глубокой воде для установившегося волнения h_{cp} составит 0.76 м, а ее средний период T_{cp} — 4.2 с. При необходимости параметры равнодействующей волны на глубокой воде могут быть трансформированы в береговую зону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Жданов А.М.* Определение энергетической равнодействующей волнового режима. Изд-во АН СССР, сер. географ. и геофиз., Т. 15. Вып. 1. 1951. 17 с.
2. *Кнапс Р.Я.* О методике определения характеристик движения наносов на бесприливных морях // Науч. сообщ. Института геологии и географии АН Лат. ССР. 1956. Т. 3. С. 34—45.
3. *Ланно Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К.* Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Л.: ВНИИГ им. Веденеева, 1990. 432 с.
4. *Морская геоморфология // Терминологический справочник. Береговая зона: процессы, понятия, определения / Ред. В.П. Зенкович и Б.А. Попов. М.: Мысль, 1980. 280 с.*
5. *Петров В.А., Ярославцев Н.А.* Исследование вдольберегового транспорта галечных наносов // Водные ресурсы. 1985. № 2. С. 79—85.
6. *Пешков В.М.* Галечные пляжи неприливных морей (основные проблемы теории и практики). Краснодар: Эд Арт Принт, 2005. 444 с.
7. *Попов Б.А.* Об определении энергетической равнодействующей волнового режима // Тр. Океанограф. комис. АН СССР. 1956. Т. 1. С. 73—86.
8. *Рекомендации по проектированию и строительству свободных галечных пляжей. М.: ЦНИИС, 1988. 85 с.*
9. *Сафьянов Г.А.* Геоморфология морских берегов. М.: МГУ, 1996. 400 с.
10. *Сафьянов Г.А.* Инженерно-геоморфологические исследования на берегах морей. М.: МГУ, 1987. 150 с.
11. *Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Каспийского морей. СПб: Российский морской регистр судоходства, 2006. 450 с. URL: https://standardgost.ru/g/pkey-14293747775*
12. *Ярославцев Н.А., Сафьянов Г.А., Петров В.А.* Динамика пляжей морского края Имеретинской низменности в междуречье Мзымта — Псоу (Черное море) // Сложные системы. 2018. № 1 (26). С. 37—54.

EVALUATION OF LONGSHORE TRANSPORT OF SEDIMENTS IN LITHODYNAMIC SYSTEMS (BY THE EXAMPLE OF THE COAST SECTION BETWEEN TUAPSE AND ADLER)

V. A. Petrov^{a,#} and N. A. Yaroslavtsev^a

^a TsNIIS Joint Stock Co. Branch, "Sea shores" Research Center, ul. Yana Fabritsiusa 1, Sochi, 354002 Russia

[#]E-mail: demmi8@mail.ru

The coast between Tuapse and Adler is a part of a lithodynamic system that stretches for 160 km from Tuapse to Cape Pitsunda in Abkhazia, distinguished by the presence of a single longshore transport of pebble beds. Taking into account the natural factors that affect the intensity of coastal processes changing along the stretch of this system, smaller lithodynamic elements are distinguished within it: the lithodynamic subsystems, areas and sections, their borders being determined by the position of the river mouths and the coastline configuration. Six lithodynamic subsystems are identified within the considered coastal section along the mouths of large rivers, which are the main sources of coarse blocky rock fragments coming to beaches. Two of them became autonomous currently due to the construction of protective breakwaters in the Sochi and Imereti seaports, which interrupted the longshore flow of pebble sediments. The longshore flow of pebble sediments is one of the leading factors controlling the state of beaches. The existing procedures for determining its discharge involve a large amount of calculations. We proposed to estimate this value according to the dependence that includes the wave parameters calculated from the energy resultant of a steady wave in deep water obtained from the energy flows of waves in each wave-dangerous direction. The parameters of the resultant wave in deep water will be the same for sections of the coast with the same directions of wave approach. To calculate the sediment flow rate based on the parameters of the active wave after the collapse, its values in deep water are transferred to the coastal zone.

A comprehensive analysis of natural conditions within small lithodynamic elements will allow a more reliable assessment of morpho-lithodynamic processes occurring within the coastal zone at the site of restoration of lost pebble beaches, which will increase the effectiveness of the measures taken.

Keywords: *height and period of waves, lithodynamic system, flux of wave energy*

REFERENCES

- Zhdanov, A.M. *Opređenje energeticheskoj ravnodeistvuyushhei volnovogo režima* [Determination of energy resultant of wave regime]. AN SSSR Publishers, ser. geograf. i geofiz. 1951, vol. 15, issue 1, 17 p. (in Russian)
- Knaps, R.Ya. *O metodike opredeleniya kharakteristik dvizheniya nanosov na besprilivnykh moryakh* [On the methodology of determining the characteristics of sediment movement on tideless seas]. AS Lat. SSR Publ., 1956, vol. 3, pp. 34–45. (in Russian)
- Lappo, D.D., Strekalov, S.S., Zav'yalov, V.K. *Nagruzki i vozdeistviya vetrovykh voln na gidrotekhnicheskie sooruzheniya* [Loads and effects of wind waves on hydraulic structures]. Leningrad, Vedenev VNIIG Publ., 1990, 432 p. (in Russian)
- Morskaya geomorfologiya. Terminologicheskii spravochnik. Beregovaya zona: protsessy, ponyatiya, opredeleniya* [Marine geomorphology. Terminological reference. Coastal zone: processes, concepts, definitions]. Moscow, Mysl' Publ., 1980, 280 p. (in Russian)
- Petrov, V.A., Yaroslavtsev, N.A. *Issledovanie vdol'beregovogo transporta galechnykh nanosov* [Study of coastal transport of pebble deposits]. *Vodnye resursy* [Water Resources], no. 2, 1985, pp. 79–85. (in Russian)
- Peshkov V.M. *Galechnye plyazhi neprilivnykh morei. Osnovnye problemy teorii i praktiki* [Pebble beaches of non-tidal seas (the main problems in theory and practice)]. Krasnodar, EdArtPrint Publ., 2005, 444 p. (in Russian)
- Popov, B.A. *Ob opredelenii energeticheskoj ravnodeistvuyushhei volnovogo režima* [On the determination of the energy resultant wave regime]. AN SSSR Publ., 1956, vol. 1, pp.73–86. (in Russian)
- Rekomendatsii po proektirovaniyu i stroitel'stvu svobodnykh galechnykh plyazhei* [Recommendations for the design and construction of free pebble beaches]. Moscow, TsNIIS Publ., 1988, 85 p. (in Russian)
- Saf'yanov, G.A. *Geomorfologiya morskikh beregov* [Geomorphology of sea shores]. Moscow, MSU Publ., 1996, 400 p. (in Russian)
- Saf'yanov, G.A. *Inzhenerno-geomorfologicheskie issledovaniya na beregakh morei* [Engineering geomorphological studies on the sea shores]. Moscow, MSU Publ., 1987, 150 p. (in Russian)
- Spravochny'e danny'e po režimu vetra i volneniya Baltiskogo, Severnogo, Chyornogo, Azovskogo i Kaspiiskogo morei* [Russian Maritime Register of Shipping. Reference data on the regime of wind and waves of the Baltic, Northern, Black, Azov and Caspian Seas]. St. Petersburg, Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva. 2006, 450 p. (in Russian)
- Yaroslavtsev, N.A., Saf'yanov, G.A., Petrov, V.A. *Dinamika plyazhei morskogo kraya Imeretinskoi nizmennosti v mezhdurech'e Mzymta-Psou (Chernoe more)* [Beach dynamics in sea area of Imeretinskaya Lowland in the Mzymta-Psou interflue (the Black Sea)]. *Slozhnye sistemy*, 2018, no. 1 (26), pp. 37–54 (in Russian)