

УДК 551.435.32 + 551.351.2

Ю. Д. Шуйский<sup>1</sup>, д-р геогр. наук, проф., Г. В. Выхованец<sup>1</sup>, д-р геогр. наук, проф., Лабуз Томаш А.<sup>2</sup>, ст. науч. сотр.

<sup>1</sup> Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова, кафедра физической географии и природопользования ул. Дворянская 2, Одесса-26, 65026, Украина

<sup>2</sup> Институт Морских наук, Щецинский гос. университет, ул. Фельчака 3а, г. Щецин, 71-412, Польша

## УСЛОВИЯ И ЧИСЛЕННЫЕ ВЕЛИЧИНЫ ЭОЛОВОГО ПЕРЕНОСА ПЕСКА НА ЮЖНЫХ БЕРЕГАХ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Береговые эоловые формы рельефа широко распространены на Юго-восточном побережье Балтийского моря, в том числе и Гданьского залива между Пуцкой бухтой и дисталью Вислинской косы. Берега залива образуют дугу, которая удобна для исследования эоловых процессов в условиях изменения экспозиции береговой линии по отношению к направлению действия вектора ветрового потока. Экспозиция вектора меняется от 3–6° до 70–90°. В итоге геометрическая длина разгона ветрового потока над пляжем меняется от 1D до 37D, а динамическая — от 0,7D до 2,5D. Во время штормовых ветров средний ветровой перенос составляет от 1,360 до 2,510 кг/м<sup>2</sup>·мин. В течение времени действия скоростей ветра >20 м/сек (27 час) было перемещено до 4 тыс. т на 1 км длины берега Гданьского залива, с учетом всех факторов. Максимальные размеры береговых дюн сформировались на том участке, где экспозиция береговой линии относительно вектора ветрового потока равна 35–45°.

**Ключевые слова:** дюна, пляж, ветер, песок, бар, эоловый поток, Балтийское море.

### Введение

Эоловый морфогенез включает в себя возникновение и развитие эолового рельефа и эоловых отложений как в пустынях, на обнаженных песчаных аренах всех географических широтных зон, так и на песчаных берегах морей и океанов. В Европе песчаные берега с дюнными системами встречаются достаточно часто, особенно на побережьях Балтийского, Белого и Северного морей, а также Бискайского залива. На них эоловые процессы изучены относительно полно, однако, совершенно недостаточно исследовано влияние длины разгона ветрового потока на формирование береговых дюн. Это заметно затрудняет оценку эолового процесса при различных видах природопользования в разных регионах, в том числе и на территории Украины. В этой связи тема статьи, *цель* которой состоит в изучении условий формиро-

вания и определения численных величин ветрового потока и его влияния на состав и количество перенесенных наносов вдоль берега и по вертикали этого потока при штормовых ветрах, является *актуальной*. В качестве *основных задач* выступают: а) природные условия района побережья Гданьского залива Балтийского моря; б) условия выполнения эолового эксперимента; в) особенности влияния угла подхода ветрового потока к берегу на эоловый перенос; г) основные характеристики распределения наносов под влиянием ветропесчаного потока.

Южное и восточное побережья Балтийского моря являются регионом распространения классических береговых дюн разных типов, возраста и свойств, в том числе на берегах Польши, России и Литвы [4, 9]. В этой связи во время экспедиционных береговых исследований осенью 2004 г. значительное место было уделено исследованиям эолового морфогенеза, эоловому переносу песка во время действия штормовых и ураганных ветров. На Черном море такие ветры повторяются намного реже, и очень трудно уловить такую синоптическую ситуацию. Вместе с тем, на морских берегах Украины широко распространены береговые дюны, и знание экстремально редких состояний эолового переноса оказывается весьма полезным при оптимизации природопользования на морском берегу.

Одновременно информация о влиянии сильных ветров на транспорт наносов на песчаных берегах дает дополнительные данные о разных сторонах эолового морфогенеза, что имеет и *теоретическое значение*. Береговые дюнные системы представляют собой уникальные, больше нигде не повторяющиеся очаги высочайшей биологической продуктивности и необыкновенного состава и разнообразия. Они являются важнейшим элементом сохранности песчаных кос, пересыпей, баров и террас, которые защищают от деградации большинство приморских озер — лиманов, лагун, рiasов. В этой связи *практическая значимость исследования* эолового движения береговых наносов сомнения не вызывает.

#### **Фактический материал, природные условия и методы исследования**

Для написания данной статьи были использованы материалы натурных маршрутно-экспедиционных полевых исследований эоловых процессов и форм рельефа на побережье Гданьского залива (Балтийское море) в пределах Польши и России в течение ноября 2004 г. Они выполнялись на 8 участках, где было отобрано 62 пробы наносов на надводной части пляжа и на мористом склоне дюнной гряды (рис. 1). Кривые поперечного профиля были получены методом нивелирования.

В данном случае речь идет не о тех пылеватых фракциях, выносимых в моря и океаны, которые обычно учитываются морскими геологами [7, 8, 10]. Обычно эти фракции являются транзитными для береговой зоны, как и пылевые потоки местного происхождения (рис. 2). Все они нетипичны для береговой зоны морей, в т. ч. и Балтийского

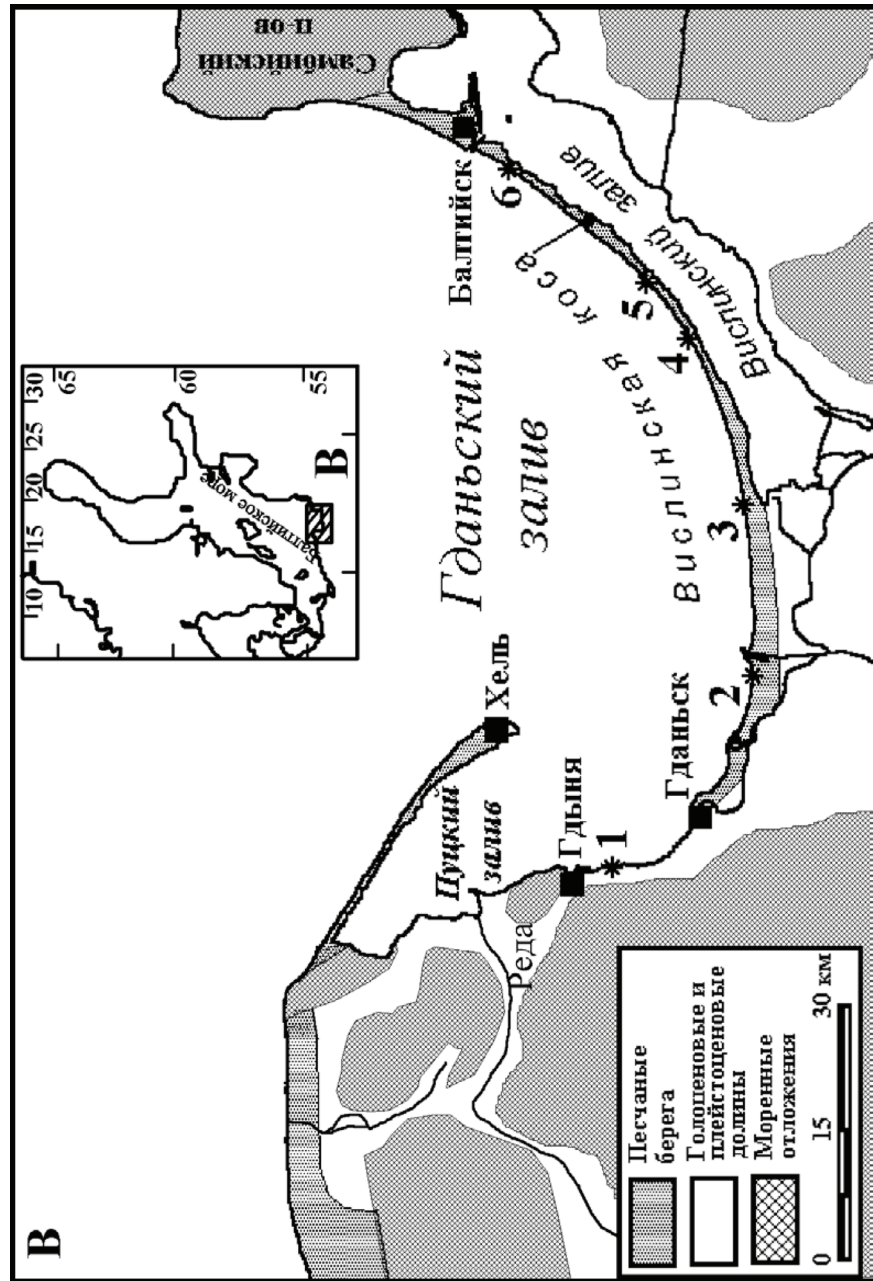


Рис. 1. Расположение участков исследования эолового движения береговых наносов на южных берегах Балтийского моря. Во врезке В — географическое положение района исследований; Участки: 1 — Гдыня; 2 — Гданьск-Свибно; 3 — Каты Рыбацкие; 4 — Курница Морская; 5 — Пяски Висляные; 6 — Балтийско-Щучинский

[1]. Поэтому в сфере нашего исследования находятся пляжеобразующие фракции "волнового поля", крупность которых превышает 0,1 мм. Именно эти фракции принимают участие в прибрежно-морских литодинамических процессах вообще и эоловых — в частности в береговой зоне.

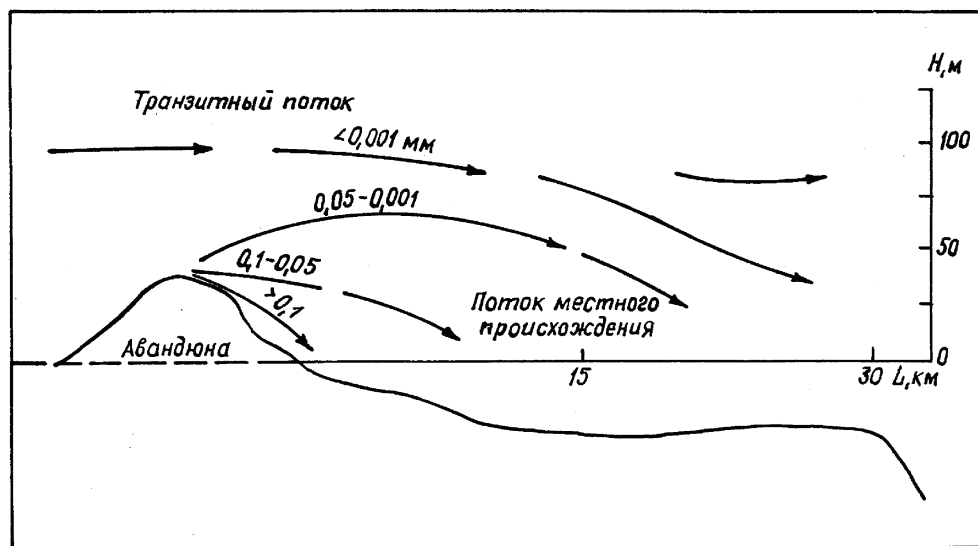


Рис. 2. Схема эолового выноса частиц разных фракций с берега в сторону моря (из книги Н. А. Айбулатова [1]).

Скорость ветра измерялась ручным электронным анемометром непрерывного действия. В результате были получены количественные данные о скоростях ветра непосредственно на всех изученных участках синхронно (17–25 м/с, порывы до 32 м/с), и при разной экспозиции береговой линии Вислинской косы по отношению к дующему ветру. Общая ветровая ситуация стала известной по данным гидрометеорологических станций "Гданьск-порт" и "Балтийск". Направление ветра было западным-северо-западным, со средним румбом NW280°: SE100°. Значит, для западного берега залива ветер был в общем береговым, для южного — вдольбереговым, а для восточного — морским, во время действия которого вектор ветрового потока был направлен под острым углом к касательной в данной точке, но не более 67–72°.

Число участков определялось таким образом, чтобы на каждой экспозиция вектора ветрового потока по отношению к береговой линии существенно отличалась бы от остальных, и каждый участок отражал бы черты остального берега за его пределами. Везде измерялась ширина, высота, форма поперечного профиля пляжей.

Количество перемещаемого материала улавливалось пластиковыми пакетами, с отверстием 0,2 м<sup>2</sup> и закрепленных у самой поверхности пляжа, на высотах 10 см и 50 см от поверхности. Измерения произ-

водились в трех точках на поперечном профиле пляжа и у подножья авандюны. Продолжительность одного измерения на всех точках длилась 1 мин. Наносы, попавшие в ловушки, взвешивались ( $\text{г}/0,2\text{м}^2\cdot\text{мин}$ ) и подвергались гранулометрическому анализу с помощью 10-фракционных сит. Распределение наносов, которое устанавливалось после действия штормового ветра, было выявлено путем опробования штилевой поверхности пляжей и авандюн. В характерных точках бралось большое количество наносов (до 5–6 кг). Оно расстилалось слоем 1–2 см на листе картона. Затем квартованием проба доводилась до веса 300–500 г, которые и помещались в пакет для последующего ситового анализа, фракционного анализа и статистической обработки [6, 11].

Материал натурных исследований получен инструментальными методами, в натуральных условиях, с повторными проверками результатов, а потому является достоверным, способным предоставить достоверные результаты и выводы. Его теоретическая интерпретация выполнялась путем применения методов анализа, систематизации, сравнительно-географического, литологического, системного, базировалась на теоретических основах и принципах береговедения [6, 8]. Полученные результаты будут использоваться при природном обосновании различных видов природопользования на песчаных берегах Украины.

### **Анализ материалов исследований**

Первичный полевой и вторичный материал камеральной обработки данных послужил основой для теоретической интерпретации результатов экспериментальных исследований. Поэтому вначале поясним окружающие природные условия, в которых выполнялся эксперимент, а затем проанализируем полученный фактический материал.

**Общая характеристика берега Гданьского залива.** Этот берег является песчаным и располагается в юго-восточной части Балтийского моря (рис. 1). Вислинская коса отгораживает от моря одноименный залив. Ее длина от Вислинского канала до оголовка равна 62 км. Сложена коса средне- и мелкозернистыми песками, фракции 0,1–0,5 мм составляют до 90–95%, встречаются и монофракционные пробы. По всей длине она окаймлена пляжем, шириной 25–40 м, нередко — до 60 м, высотой до 1,4–2,4 м (рис. 3). В направлении от моря в сторону залива на поперечном профиле четко выделяется три генерации дюн. Самые молодые "белые" дюны (авандюны), высотой не более 12–14 м, располагаются в тыльной части пляжа. Они не имеют сплошного простираения вдоль всей косы. У их подножья иногда может располагаться первичная авандюна, высотой до 3 м. Она встречается только там, где отмечается современная волновая аккумуляция и прогрессивное выдвижение береговой линии, а также на немногочисленных динамически устойчивых участках. На некоторых участках, где отсутствуют авандюны и белые дюны, абразии подвержены "желтые" дюны. Белые дюны сменяются полосой самых высоких "желтых" дюн высотой до 35 м в центральной части Вислинской косы.

На отдельных участках, как например у пос. Криница Морская и Пяски Висляные, встречаются дюны и более высокие — до 49 м. На этом участке располагаются самые высокие эоловые формы рельефа на Гданьском побережье, а вектор интегрального ветрового потока экспонирован под углами  $40-45^\circ$  относительно простирания береговой линии. Эти дюны протянулись сплошной полосой, шириной от 800 до 2100 м. Самыми старыми и дальше всего удаленными от моря являются "коричневые" дюны.

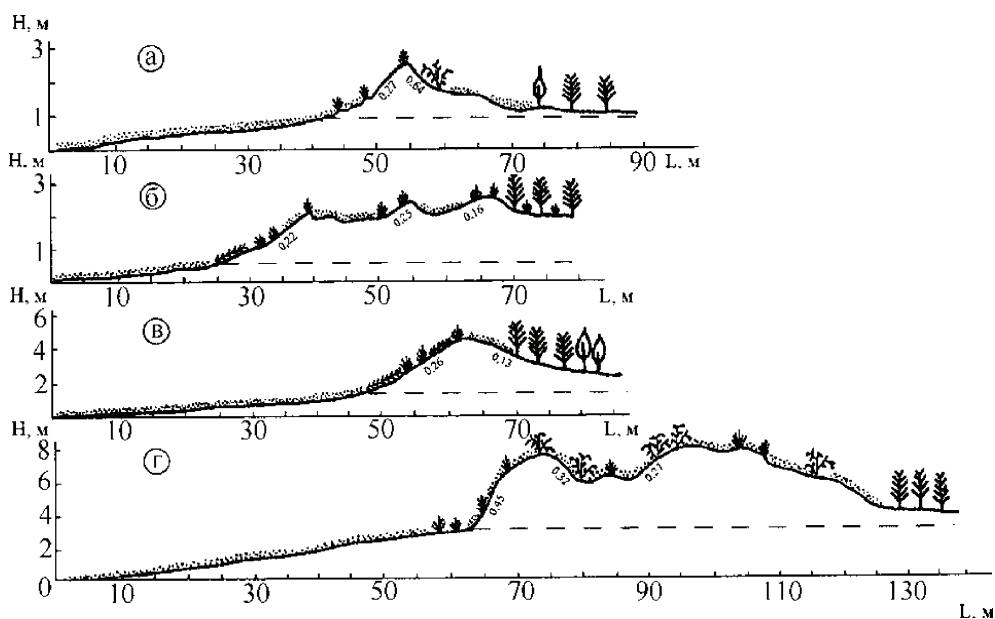


Рис. 3. Различные размеры береговых авандюн под влиянием пляжей разной ширины: а — широкий пляж при доминирующих береговых ветрах; б — узкий пляж при доминировании ветров под острым углом, близким  $\varphi = 45^\circ$ ; в — широкий пляж на участке зарождения вдольберегового потока наносов и доминировании морских ветров с вектором близким  $\varphi = 90^\circ$ ; г — широкий пляж на участке разгрузки вдольберегового потока наносов и доминированием ветров с вектором  $\varphi = 30-50^\circ$ . Цифры на склонах авандюн указывают на средние значения уклонов

Береговая динамика характеризуется дифференциацией во времени и вдоль всей песчаной косы. На большем протяжении морской берег Вислинской косы отстает со скоростями до  $0,7$  м/год, и только на небольших отрезках отмечается аккумуляция до  $0,15$  м/год, в основном вдоль южного берега залива. Самая сильная аккумуляция отмечается недалеко от устья Вислы, где нарастание берега является самым скорым на всем побережье залива. Береговая линия представляет собой плавную вогнутую дугу и поэтому по-разному

экспонирована к преобладающим сильным ветрам западного и северо-западного направления. Простираение береговой линии меняется от NW344:SE164 на западном берегу до NE22:SW202, что раскрывает широкие возможности экспериментального исследования береговых дуг и влияния волн и ветров на берега различной экспозиции.

Самыми узкими пляжи являются вдоль западного берега Пуцкой бухты. Здесь же они сложены самыми крупными и хуже всего отсортированными наносами (ведущая фракция 0,5–1,0 мм), с примесью гравийно-галечных фракций (до 25%), как результат поступления наносов от абразии моренных и флювиогляциальных отложений плейстоцена. На этом берегу господствующими являются береговые ветры (рис. 4–1). Подавляющее количество береговых дюн находится на южном и восточном берегах, на участках частичной или полной разгрузки вдольбереговых потоков наносов, и в их составе содержится наибольшее количество эоловых наносов.

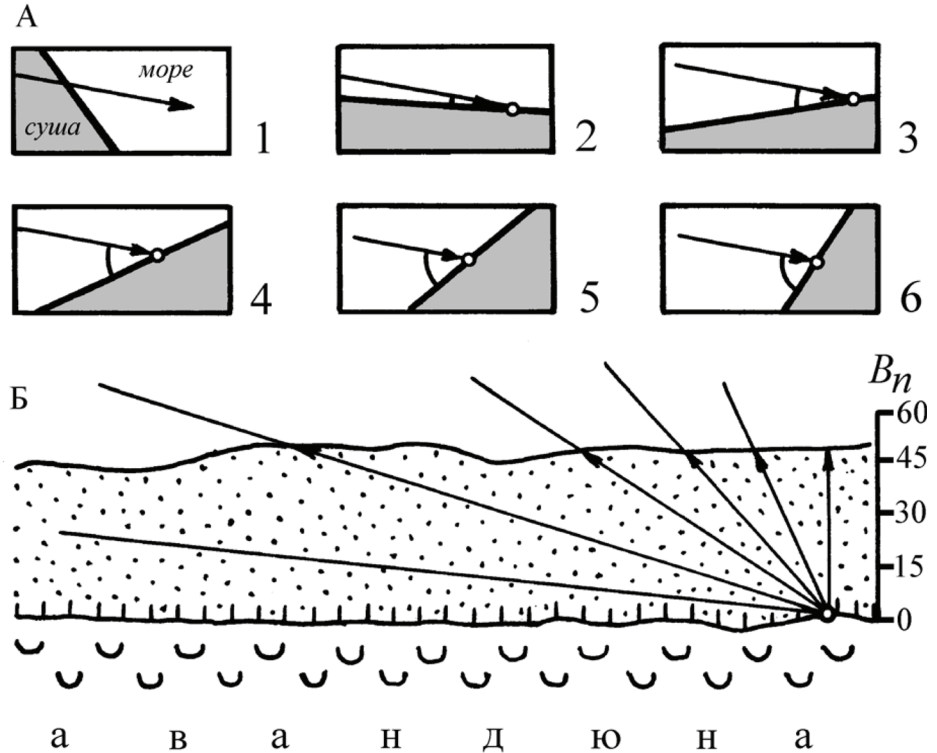


Рис. 4. Направление действия штормового ветра по отношению к касательной в точке на береговой линии (А) и соответствующая длина разгона ветрового потока над поверхностью песчаного пляжа (Б) на различных участках берега Гданьского залива Балтийского моря (показаны на рис. 1):

- 1 — Сопот (ветер береговой); 2 — Гданьск-Свибно (угол  $\varphi = 6^\circ$ ); 3 — Каты Рыбацкие ( $\varphi = 18^\circ$ ); 4 — Криница Морская ( $\varphi = 34^\circ$ ); 5 — Пяски Висляные ( $\varphi = 49^\circ$ ); 6 — Балтийский-Щучинский ( $\varphi = 66-72^\circ$ );  $B_n$  — ширина пляжа, м

**Условия проведения эксперимента.** Эоловое перемещение наносов на пляже представляет собой сложное явление и зависит от многих природных факторов. Ветровой поток, взаимодействуя с подстилающей поверхностью пляжа и косы в целом, формирует ветропесчаный поток, от параметров которого зависят размеры эоловых форм. Главными параметрами ветропесчаного является мощность, дискретность и направление его действия по отношению к простирающему аккумулятивной формы. Эти параметры зависят с одной стороны от скорости и направления ветра, а с другой стороны — от состава, запасов и влажности наносов, длины разгона ветрового потока над песчаным пляжем, рельефа поверхности, наличия растительности [3–5, 11, 12]. Поэтому при проведении эксперимента нами уделялось внимание именно этим факторам.

Накануне проведения эксперимента 18.11.2004 г. ночью шел дождь, но к утру он прекратился. В результате поверхность косы была влажной. Мощность слоя влажного песка на поверхности авандюны и дюны составляла всего 1–2 см, а это обусловило очень быстрое сдувание (в течение от 2 до 3 час на разных участках) сухого слоя. После дождя поверхностный слой песка быстро высыхал под влиянием иссушающего действия сильного ветра, согласно формуле Дальтона, пока не установилась ветроустойчивая поверхность. Ветер дул от западного направления с переходом на запад-северо-запад со скоростью 17–25 м/с. Этот ветер породил сильный шторм и волновой нагон морских вод. В результате штормового влияния пляж заливался морской водой до середины, а местами до авандюны, особенно на участке от Пяски Висляные до Балтийска. Поэтому остающаяся сухой поверхность пляжа быстро выдувалась: действие штормового ветра происходило в течение около 30 час, а сухой слой песка выдулся за 3 час ( $\approx 10\%$  продолжительности). Поэтому последующее влияние ветра почти не сопровождалось перемещением песка на пляже, вынос происходил с поверхности авандюны в сторону суши. Эту закономерность можно считать всеобщей, поскольку она наблюдалась нами на берегах различных морей [4].

Так как береговая линия косы представляет собой плавную дугу, то направление ветра и волнения по отношению к продольной оси было разным. Так, на Щучинском участке оно было почти лобовым ( $\varphi = 66-72^\circ$ ), а у пос. Гданьск-Свибно — близким к вдольбереговому (рис. 4А). Максимальный нагон и заплеск штормовых вод был от пос. Пяски Висляные до Балтийска. В соответствии с изменением простирающей косы по отношению к действующему ветру менялась и длина разгона ветрового потока. На участке Свибно-Янтарь она была максимальной, ветровой поток разгонялся вдоль берега на максимальном протяжении пляжей, а потому здесь была наибольшая геометрическая длина разгона ветрового потока (рис. 4Б). На участке Щучинский-Балтийский ветровой поток разгонялся над пляжем, который наполовину, а иногда — и полностью, заливался морскими водами, и потому поступление песка в пределы дюнной полосы было минимальным.

**Результаты экспериментальных береговых исследований.** Проведенные эксперименты позволили получить следующие результаты.

А) Район Гдыни характеризуется узкими песчано-галечными пляжами (до 15–20 м), весьма крутыми (до 0,09–0,16), с примесью (до 45%) гравийно-галечных фракций. Здесь ведущими источниками наносов являются толщи морены и флювиогляциальных отложений. Волновой режим ослаблен тем, что акватория защищена от моря косой Хель, а дно мелководно. Господствующие по повторяемости и максимальные по скорости западные и северо-западные ветры являются береговыми. Интенсивность эолового процесса на берегу является небольшой, а распространение береговых дюн очень ограниченным. Аналогичная закономерность проявляется на подавляющем большинстве песчаных берегов Мирового океана.

Б) В районе устья Вислы (Вистулы), на участке "Гданьск-Свибно" береговая линия в общем ориентирована почти точно по линии "W-E", а потому испытывает преимущественно влияние вдольбереговых ветров (рис. 4), а также экспонированных по нормали от северных направлений. В отличие от района Гдыни, здесь развиты береговые дюны, однако, невысокие (до 3–7 м над уровнем пляжа). Во время действия штормовых ветров (скорость более 20 м/сек) на широких пляжах ( $B_n \leq 60$  м) песок перемещался преимущественно 2–4 полосами характерной поземки, и при этом они старались прижаться к подножью авандюны. Когда на пути встречался разрыв авандюны, в виде своеобразных "ворот", то песчаный поток втягивался в эти "ворота". Таким образом пополнялось песком пространство, расположенное с бережной тыльной стороны авандюны. Максимальное количество песка переносилось на горизонтах 0–20 см от поверхности — до 90%. Существенным является влияние антропогенного фактора, в общем сокращающее эоловый перенос песка и способствующий разрушению дюнных форм берегового рельефа.

В) У пос. Каты Рыбацкие ситуация была иной. У уреза моря в нижней части пляжа песок практически не переносился, несмотря на сильный ветер ( $> 20$  м/сек) [5]. Среднее значение вектора по отношению к касательной в точке линии берега составляло  $18^\circ$ , что значительно больше, чем в районе Свибно. В средней части пляжа величины переноса на разной высоте чаще всего составляли в общем значения, которые на порядок меньше измеренных в районе устья Вислы на участке (до 30–95 г/0,2 м<sup>2</sup>·мин). Одновременно перемещение отмечалось на склоне авандюны и поверхности дюн, лишенных растительности. Перенос песка происходил порывами, сплошной пеленой, высотой до 2,5 м над поверхностью дюны, как это бывает и на других песчаных берегах [3, 5]. На высоте 1,0 м и 1,5 м количество переносимого песка менялось от 5 до 20 г/0,2м<sup>2</sup> за 1 мин, при наибольших порывах штормового ветра — до 250 г/0,2м<sup>2</sup>·мин. На склоне песок перемещался поземкой, в виде отдельных локализованных струй песка, которые "ползли", извиваясь, от подножья к поверхности дюны. Особенно сильная концентрация песка отмечалась в местах, где отдыхаю-

щими рекреантами были протоптаны проходы и проложены подъезды к пляжу. В этих местах происходит сгущение струй ветрового потока и увеличение скорости ветра. Поэтому перемещение песка происходило даже во время дождя, который неоднократно усиливался или ослабевал. Как можно было убедиться, даже в указанных неблагоприятных условиях количества движущегося эолового песка было достаточно для роста авандюн

Г) Между поселками Криница Морская и Пяски Висляные, соответственно дальнейшему развороту береговой линии, во время действия сильного шторма 17–19 ноября 2004 г. ветровой поток подходил под углами от 34° до 49° (рис. 4). Перемещение песка отмечалось на пляже, склоне и поверхности дюн, но величина его была разной, в соответствии с разными условиями (разными: длиной разгона ветропесчаного потока, запасами пляжевых наносов, влажностью песка, рельефом берега). В отличие от предыдущих двух участков, ветер здесь дул под острыми углами, но направления лучей отдельных порывов составляли менее острый угол с касательной в данной точке берега (> 35°). В этих условиях перемещение песка происходило вдоль простирания пляжа и гряды авандюн. Оно было дифференцированным как на поперечном профиле пляжа, так и по вертикали. У уреза в нижней части пляжа, там, где происходило постоянное смачивание поверхности пляжа морской водой, перенос был очень слабым, он практически отсутствовал (табл. 1), как и на всех других участках. Поверхность пляжа ровная, на ней мокрым водонасыщенным песком сформирована ветроустойчивая поверхность. Именно эта поверхность сильно ограничивала общий эоловый перенос, в который вовлекался только тонкий поверхностный слой сухого пляжевого песка [2]. Соответственно, штормовым ветром распределялись наносы по своим параметрам (рис. 5).

Таблица 1

**Количество перенесенного песка в эоловом потоке во время действия штормового ветра (значения скорости, помеченные звездочкой, подвергались влиянию порывов ветра — до 32 м/с)**

№ п/п	Скорость ветра, м/с	Продолжительность отбора, мин	Высота над поверхностью пляжа, см	Место отбора	Вес пробы, г
1	17	1	10	у уреза моря	5,84
2	22*	1	50	у уреза моря	0,64
3	18	1	10	средняя часть пляжа	54,38
4	19	1	10	средняя часть пляжа	69,10
5	17	1	10	средняя часть пляжа	35,30
6	23*	1	10	средняя часть пляжа	196,7
7	22	1	10	средняя часть пляжа	99,62
8	24*	1	10	средняя часть пляжа	272,69
9	17	1	50	средняя часть пляжа	10,31
10	24	1	50	средняя часть пляжа	35,74
11	20*	1	50	подножье авандюны	301,62
12	17	1	10	подножье авандюны	41,02

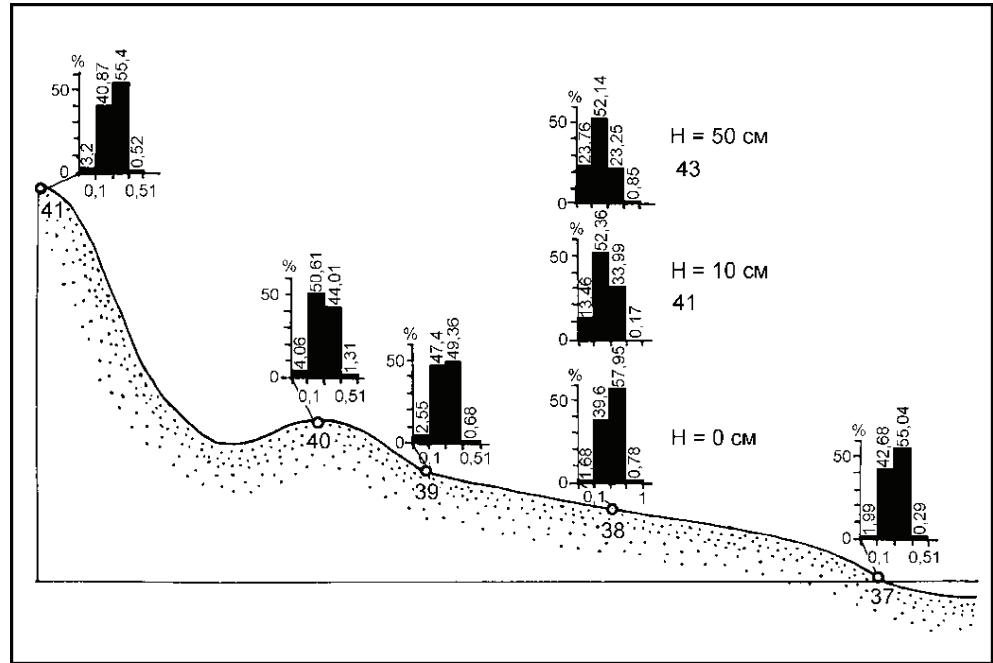


Рис. 5. Распределение фракционного состава наносов на поперечном профиле берега Вислинской косы и в ветропесчаном потоке, район Криница Морская, во время действия штормового ветра. Н — высота над поверхностью пляжа

В средней части поверхность пляжа частично осушалась под действием ветра. Перемещение песка происходило в виде поземки во время сильных (скорости в пределах 17–24 м/с) порывов ветра. Струи поземки отклонялись к подножью авандюны. В некоторых местах на поверхности пляжа начали формироваться зачатки распластанных закустовых бугорков высотой до 2–5 см, хотя растительность полностью отсутствовала. Возникновение таких бугорков было обусловлено неравномерностью (порывистостью) действия ветра и соответственно разной его наносодвижущей способностью, а также небольшими неровностями ветроустойчивой поверхности, хоть немного, но гасивших ветровой поток путем формирования турбулентного потока. В итоге намечался переход движения песка от монотонно равномерного к дискретному, отдельными толчками, импульсивному. Такой механизм схож с импульсивным движением песка при формировании рифелей в водном потоке после гладкой фазы.

Во время особенно сильных порывов наносодвижущая способность ветра была наибольшей. В перенос вовлекалось максимальное количество наносов. В перерывах между порывами скорость ветра и его наносодвижущая способность резко уменьшалась. В этой связи эоловое движение песка происходило рывками разной продолжительности и с разным количеством наносов. Наносы из ветропесчаного потока выпадали неравномерно, в виде отдельных скоплений на поверхности

пляжа. Во время последующих сильных порывов ветра эти накопления увеличивали шероховатость пляжевой подстилающей поверхности, что обуславливало сгущение силовых линий ветрового потока над вершинами и растяжку между этими формами [4, 10, 11]. А это вело к снижению транспортирующей способности ветра над ними и дальнейшему накоплению наносов. Со временем эти скопления песка становились преградой, у которой происходила полновесная эоловая аккумуляция. Морской край авандюны тоже был покрыт подобными буграми, но только значительно больших размеров, чем на пляже.

В средней части пляжа, вдали от шероховатого мористого склона авандюны и мокрой ветроустойчивой поверхности в полосе волнового заплеска, во время сильного шторма (порывы ветра до 32 м/сек) отмечалась максимальная интенсивность перемещения наносов, в основном в виде характерной поземки. В зависимости от скорости ветров, в ее составе количество переносимого песка изменялось от 35,30 до 272,69 г/0,2м<sup>2</sup>·мин (табл. 1). В верхней части пляжа перемещалось в 3–5 раз меньше наносов по причине той же шероховатости мористого склона и произрастания там травянистой растительности, чем в средней (рис. 5). Перенос песка находился в зависимости от того, как близко к авандюне примыкал бугор в виде закустового возвышения: если близко примыкал, то перенос был максимальным, если далеко — то минимальным. На всех участках песчаного пляжа поземка исчезала по мере того, как песчаные струи приближались к растительному покрову и достигали растительности. Неравномерный перенос песчаного материала был обнаружен и по вертикали ветрового потока. Наибольшее количество (до 85–90% движущейся массы) песка перемещалось у поверхности на приземном горизонте пляжа (высота < 10 см), как это нами всегда наблюдалось на песчаных пляжах Черного и Азовского морей. С высотой оно резко уменьшалось, и на уровне 50 см от поверхности пляжа было малым или даже незначительным. Как было нами измерено в районе штормового уреза, перемещалось в 9–10 раз меньше, чем на самой поверхности, где песок мокрый и водонасыщенный. В средней части пляжа на высоте 50 см по сравнению с горизонтом 10 см перемещалось в 2,8–24,5 раза меньше песка. А вот у подножья дюны на поверхности пляжа двигалось в 7,4 раза больше наносов, чем на высоте 50 см (табл. 1). Перенос небольшого количества мелких песчинок отмечался на высоте 130–250 см во время порывов ветра разной скорости.

Д) Активный ветровой перенос распределяет песчаные наносы на пляже и авандюне, а после штормов — фиксирует состав наносов. Распределение состава подчиняется распространенной закономерности, как можно видеть на северо-восточной части Вислинской косы, как показал ситовой анализ и гранулометрический состав проб, отобранных в разных точках на кривой поперечного профиля во время штиля после влияния штормового ветра (рис. 6). Наносы на поверхности пляжа и авандюны состоят в основном из двух фракций: 0,1–0,25 и 0,25–0,5 мм. На их долю приходится от 44 до 98% всей массы. Значительно содержание (до 15%) и более крупных фракций.

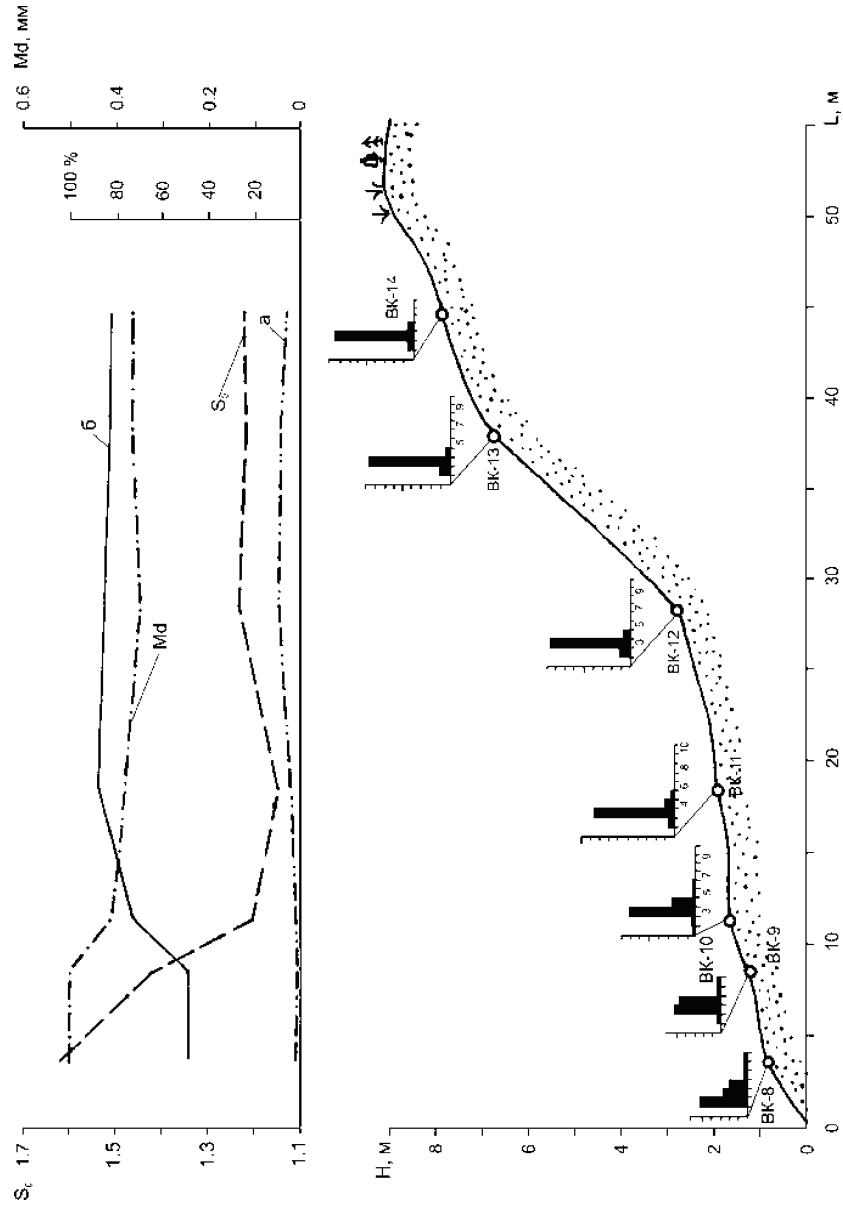


Рис. 6. Распределение фракционного состава на поперечном профиле песчаного берега Вислинской косы в районе Щучинский-Балтийский во время шторма: Md — медианный диаметр, мм; S<sub>0</sub> — коэффициент сортировки; а — содержание фракции крупнее 1,0 мм; б — содержание ведущей фракции 0,25–0,5 мм; Гистограммы показывают фракционный состав (мм) наносов по 10-фракционной шкале; Н и L — метры

Во время шторма при опробовании в районе уреза моря на первом штормовом валу типичным является присутствие трех фракций песка, причем, больше всего (на 15–20%) присутствует мелкозернистого песка 0,1–0,25 мм. В средней части пляжа совершается переход к ведущей фракции среднезернистого песка 0,25–0,5 мм: у подножья авандюны ее содержание достигает 85%, а на мористом склоне авандюны — уже до 89–92%. Одновременно снижается количество других фракций песка: 0,1–0,25 мм и 0,5–1,0 мм. Аналогично распределяются параметры наносов и в других районах, например на Куршской косе (рис. 7).

Далее по поперечному профилю происходит небольшое увеличение на вершине дюны до 97%. Снижение содержания мелкозернистого и крупнозернистого песка происходит за счет увеличения фракций < 0,1 мм с 1,68 до 4,06%. Такое изменение гранулометрического состава является закономерным [3, 5, 9] и обусловленным тем, что в средней части пляжа и поверхности дюны происходит выдувание мелкозернистых и пылеватых частиц и накопление их у подножья дюны и на тыльном склоне дюнной гряды. О том, что такой процесс существует, показывает также и соотношение фракций 0,1–0,25 мм и 0,25–0,5 мм. На урезе воды оно равно 0,76 и говорит, что фракции 0,25–0,5 мм больше почти на 25%. С продвижением вверх по склону пляжа доля фракции 0,25–0,5 мм увеличивается за счет одновременного уменьшения содержания фракции 0,1–0,25 мм, и соотношение между ними становится равным меньше, всего 0,68.

Затем, еще далее вверх по склону, ситуация меняется коренным образом. Соотношение между указанными основными фракциями сначала выравнивается, достигая здесь 0,96, а затем — наоборот, резко увеличивается содержание фракции 0,1–0,25 мм (рис. 5, 6). На поверхности дюны соотношение между основными рельефообразующими фракциями остается равным 0,76 и близко к таковому на урезе.

Как выяснилось в процессе выполнения нами натурного эксперимента, в ветропесчаном потоке перемещаются главным образом три фракции: < 0,1 мм, 0,1–0,25 и 0,25–0,5 мм, и соотношения между ними на разной высоте разные. В общем отмечается рост содержания мелкозернистых и особенно пылеватых фракций за счет уменьшения содержания среднезернистых. Так, из графика на рис. 6 видно, что на поверхности пляжа содержание фракций 0,25–0,5 мм равно 57,95%, а в ветропесчаном потоке на высоте 0,5 м — 23,25%, что в 2,49 раза меньше. Одновременно содержание пылеватых и мелкозернистых наносов возросло соответственно с 1,68 до 23,76 и с 39,6 до 52,14, что в 14 раз больше, чем на пляже.

## **Выводы**

Полученные нами материалы и их анализ позволили сформулировать ряд выводов.

1. Перемещение эоловых наносов в ветропесчаном потоке в большей мере зависит от длины разгона ветрового потока и запасов

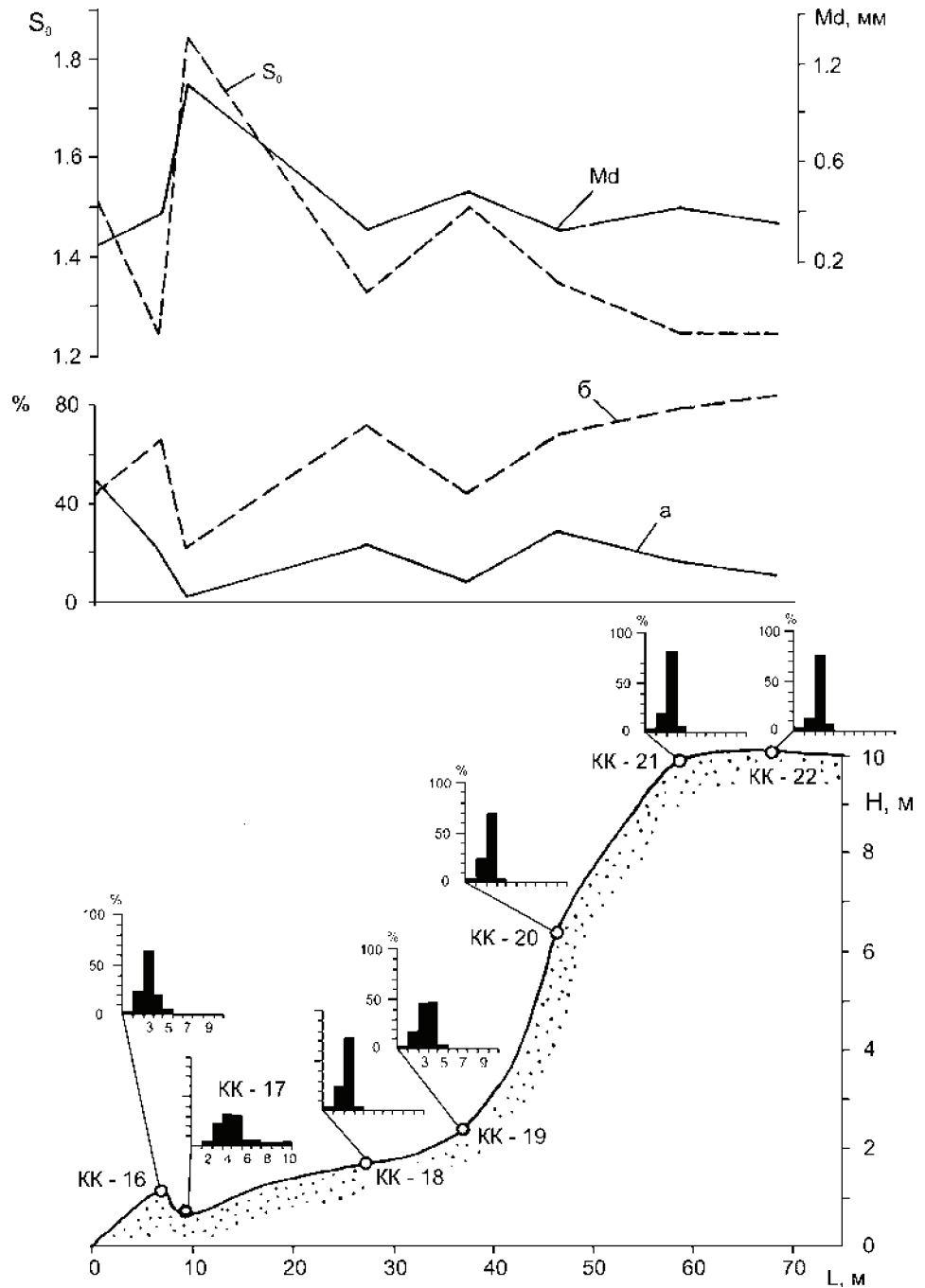


Рис. 7. Распределение фракционного состава наносов на поперечном профиле песчаного берега центральной части Куршской косы в районе Ниды при штилевой погоде. Условные обозначения см. на рис. 6

наносов на пляже, чем от влажности перемещаемых наносов. В условиях одинаковой влажности пляжевых наносов происходит их перемещение под действием вдольбереговых ветров. Если же ветры дуют под углом, близким нормали, "в лоб" берегу, то перемещение является небольшим или отсутствует полностью.

2. Для формирования и роста в высоту береговых дюн источником наносов является главным образом средняя часть пляжа. Даже во время действия вдольбереговых ветров отсюда наносы подаются к подножью пляжа и на авандюну, а уже оттуда в виде песчаных струй поземки — на поверхность дюны и далее к центру аккумулятивной формы. Вынесенное количество наносов компенсируется только после фазы затухания штормов, когда с подводного склона происходит интенсивная подача наносов на пляж.

3. При одном и том же направлении действия ветра на песчаном пляже береговой дуги вектор ветрового потока может быть экспонирован к касательной в данной точке береговой линии под разными углами  $\varphi$ , чаще всего от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Соответственно, длина разгона ветрового потока над песчаным пляжем может составить от величины, равной длине пляжа, до величины, равной ширине пляжа. Обнаружено, что наибольшее количество наносов с пляжа на авандюну движется тогда, когда длина разгона ветра  $D$  вызвана значениями  $\varphi = 35-45^\circ$ .

4. Чем больше отклоняется длина разгона ветрового потока над поверхностью пляжа от значений, вызванных ветрами, экспонированными по отношению к направлению береговой линии под углами от  $35^\circ$  до  $45^\circ$ , тем меньшее количество наносов перемещается в ветропесчаном потоке, тем хуже условия питания авандюн пляжевыми наносами.

5. В эоловом перемещении активное участие принимают наносы фракции 0,25–0,5 мм и менее 0,1 мм, хотя пляжи, дюны и авандюны могут быть сложены наносами, размером 0,1–1,0 мм. Алеврито-пелитовые частицы с диаметром менее 0,1 мм отсутствуют в составе аккумулятивных форм по той причине, что они являются более мобильными, легко и в первую очередь вовлекаются в эоловое перемещение даже слабыми ветрами, со скоростью 4–7 м/сек. Они могут находиться во взвешенном состоянии длительное время, а потому уносятся далеко в сторону тыльной части косы или террасы. Наносы крупнее 1,0 мм почти не вовлекаются в эоловый перенос в условиях южного побережья Балтийского моря. В подавляющем большинстве случаев, независимо от длины разгона ветрового потока над пляжем, ведущей является фракция 0,25–0,5 мм (содержание до 85–95%).

## **Литература**

1. Айбулатов Н. А. Динамика твердого вещества в шельфовой зоне. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1990. — 271 с.

2. Вихованець Г. В. Вплив вологості піску на пляжах Чорного моря на розвиток еолового процесу // Вісник Одеського держ. університету. Природознавчі науки. — 1999. — Т. 4. — Вип. 5. — С. 70–75.
3. Вихованець Г. В. Коэффициент эолового сноса и его рельефообразующее значение в береговой зоне морей // Доповіді НАН України. — 2001. — № 4. — С. 106–109.
4. Вихованець Г. В. Эоловый процесс на морском берегу. — Одесса: Астропринт, 2003. — 448 с.
5. Вихованець Г. В., Лабуз Т. А. Эоловое перемещение наносов во время действия сильного ветра на южных берегах Балтийского моря // Фальц-Фейнівські читання: Зб. наук. пр. / Відп. ред. С. В. Шмалей. — Херсон, 2005. — Т. 1. — С. 111–115.
6. Зенкович В. П. Основы учения о развитии морских берегов. — Мю: Изд-во АН СССР, 1962. — 710 с.
7. Игнатов Е. И. Береговые морфосистемы. — М.; Смоленск: Маджента, 2004. — 351 с.
8. Сафьянов Г. А. Геоморфология морских берегов. — М.: Изд-во Моск. унив., 1996. — 406 с.
9. Шуйський Ю. Д., Вихованець Г. В. Особенности динамики песчаных берегов Балтийского моря в пределах Польши // Исследования береговой зоны морей: Сб. научн. трудов. — К.: Карбон Лтд, 2001. — С. 134–143.
10. Carter R. W. G. Coastal Environment. — London: Academic Press, 1988. — 617 p.
11. Horikawa K. Nearshore Dynamics and Coastal Processes. — Tokyo: Univ. of Tokyo Press, 1988. — 522 p.
12. Tinley K. L. Coastal Dunes of South Africa. — Pretoria: Found. Research Develop. Press, 1985. — 300 p.

Ю. Д. Шуйський<sup>1</sup>, Г. В. Вихованець<sup>1</sup>, Т. А. Лабуз<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова,  
кафедра фізичної географії та природокористування  
вул. Дворянська 2, Одесса-26, 65026, Україна

<sup>2</sup> Щецинський держ. університет,  
Інститут морських наук,  
вул. Фельчака 3а, 71-412 Щецин, Польща

## УМОВИ ТА ЧИСЕЛЬНІ ПАРАМЕТРИ ЕОЛОВОГО РУХУ ПІСКІВ НА ПІВДЕННИХ БЕРЕГАХ БАЛТІЙСЬКОГО МОРЯ

### Резюме

Берегові еолові форми рельєфу широко розповсюджені на Південному узбережжі Балтійського моря, в т. ч. і Гданьської затоки між Пуцькою бухтою та дистальною віддальницею Вісляної коси. Береги затоки утворюють типовий кресент, який є зручним для досліджень еолових процесів в умовах зміни експозиції берегової лінії по відношенню до генерального напрямку дії вектору вітрового потоку. В умовах експерименту, що виконувався, експозиція вектору змінювалася від 3–6° до 70–90°. Відтак, геометрична довжина розбігу вітрового потоку над пляжем також змінювалася — відповідно від  $1 V_n$  до  $37 V_n$ , а динамічна — від  $0,7 V_n$  до  $2,5 V_n$ . Під час штормових вітрів на різних експериментальних ділянках пересічне вітрове переміщення дорівнювало від 1,360 до 2,510 кг/м<sup>2</sup>-мин. Протягом часу дії швидкостей вітру > 20 м/сек (27 год) було переміщене близько 4 тис. т піску на відтинку 1 км довжини берегу Гданьської затоки, з урахуванням всіх факторів руху.

Максимальні параметри берегових дюн поформувалися на тій ділянці, де експозиція берегової лінії відносно вектору вітрового потоку дорівнює 35–45°.

**Ключові слова:** дюна, пляж, вітер, пісок, бар, еоловий потік, Балтійське море.

**Shuisky Y. D.**<sup>1</sup>, **Vykhovanetz G.V.**<sup>1</sup>, **Labuz T. A.**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Mechnikov's University of Odessa,  
Physical Geography Department,  
Dvoryanskaya St. 2, Odessa-26, 65026, Ukraine

<sup>2</sup> Szczecin State University,  
Institute of Marine Sciences,  
Felchak St. 3a, Szczecin 71-412, Poland

## **ENVIRONMENT AND NUMERICAL VALUES OF AEOLIAN SAND TRANSPORT WITHIN SOUTHERN SAND COAST OF THE BALTIC SEA**

### **Summary**

Processes of beach drifts transportation were studied on Wistula sand bar during gales along southern shores of the Baltic Sea, by example of Gdansk Bay sand shores. This processes are formed big coastal dunes with maximal height of 49 m. The wind velocity was up to 32 m/sec, and in average 20–24 m/sec during NW280° gale in November 2004. Correspondingly, corners between wind flow vector and shoreline were from 3–6° to 70–90°. Quantity of moving sand in aeolian flow had maximums along middle part of beaches under impact of alongshore line wind direction, and in 0–10 cm horizon. The main mass of the sand is transported on nearland horizon 0–10 cm (up to 90%), if this sand was dry and corners between wind vector and shoreline are 35–45° under impact of all natural conditions.

**Keywords:** Dune, beach, wind, sand, bar, aeolian flow, Baltic Sea.