

УДК 551.435.3(261.24).

## СТРУКТУРА РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО ВДОЛЬБЕРЕГОВОГО ТРАНСПОРТА НАНОСОВ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ГДАНЬСКОГО ЗАЛИВА<sup>1</sup>

© 2019 г. А. Н. Бабаков<sup>1,\*</sup>, Б. В. Чубаренко<sup>1,\*\*</sup>,

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН  
Россия 236000 Калининград

e-mail: \*babakov\_temp@mail.ru, \*\*chubrois@mail.ru

Поступила в редакцию 24.03.2017 г.

После доработки 29.12.2017 г.

Принята к публикации 29.04.2018 г.

Проведена систематизация опубликованных схем результирующего вдольберегового транспорта наносов в пределах восточного побережья Гданьского залива. Отмечены существенные расхождения в его структуре и локализации зон конвергенции встречных потоков. На основе результатов стационарных измерений придонных течений в окрестностях Балтийского пролива в пределах глубин 6–16 м показано, что при ветрах >6 м/с вдольбереговые течения ориентируются по направлению вдольбереговой составляющей ветра. Обсуждены морфодинамический “аккумулятивный” (заполнение входящего угла и абразия в теневой зоне препятствия) и “абразионный” (ориентация абразионной котловины у оконечности молов) критерии. Сделан вывод о предпочтении “абразионного” критерия в сравнении с “аккумулятивным” для определения результирующего переноса наносов на участках побережья с нормальным или близким к нему углом подхода потока волновой энергии к берегу. Представлены особенности механизма переноса наносов с Ю на С в обход молов Балтийска — от абразионного к аккумулятивному участку берега. Предложены две схемы встречных Вислинского и Самбийского вдольбереговых потоков наносов: до построения входных молов Балтийского пролива с обширной зоной миграций в районе северной оконечности Вислинской косы, а также после строительства молов с сужением этой зоны и сдвигом ее южной границы на север на уровень этих молов.

*Ключевые слова:* интегральный поток наносов, морфодинамические критерии, придонные течения, ветро-волновой режим, измерения, береговая зона, Гданьский залив, Балтийское море.

DOI: 10.31857/S0321-0596464370-384

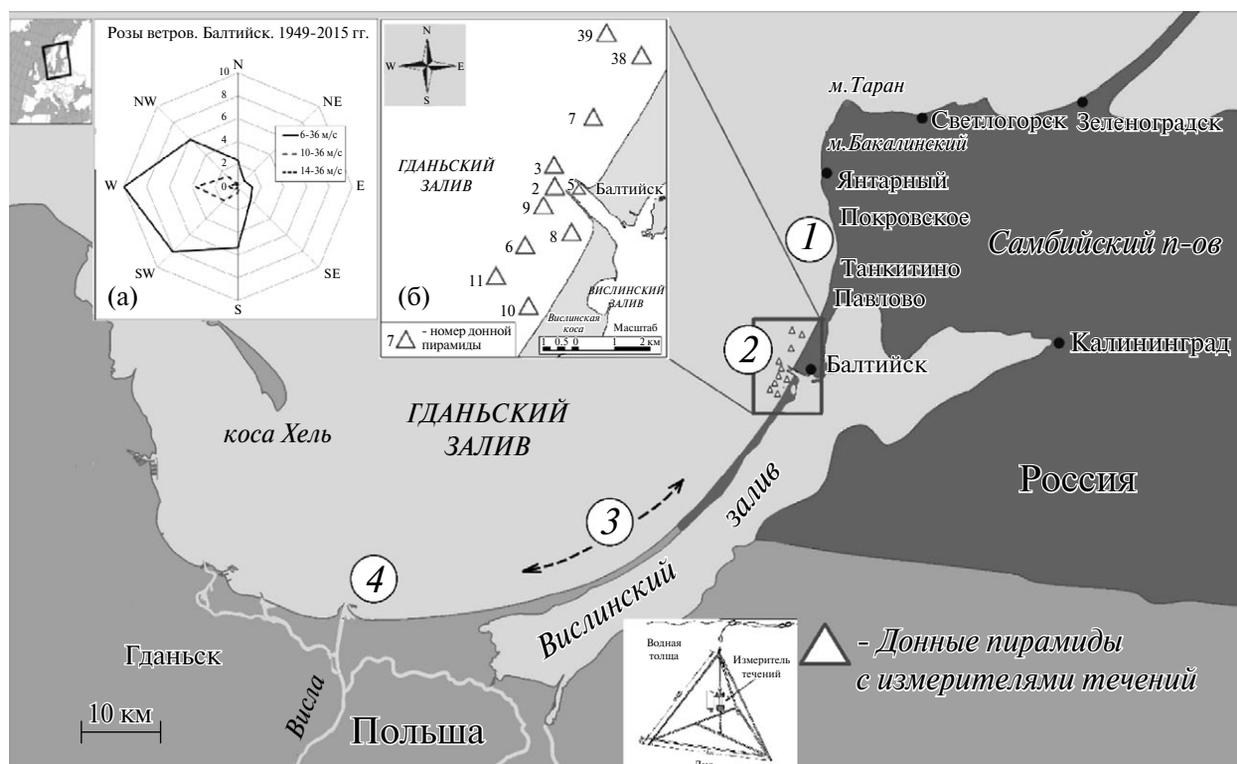
### ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемая в последние десятилетия активизация штормовой деятельности и нагонов [23, 47, 58] на фоне роста среднего уровня моря [38, 54] приводит к усилению размыва берегов [51] с разрушением береговой инфраструктуры и жилых построек. В центре восточного побережья Гданьского залива в пос. Коса (г. Балтийск) (рис. 1) почти полностью смыты фортификационные постройки XIX в., в период сильных осенне-зимних штормов неоднократно затапливало жилую зону поселка.

В отличие от большинства участков открытых песчаных берегов Балтийского моря для восточной части побережья Гданьского залива в настоящий момент отсутствует общепринятая схема вдольберегового транспорта наносов и расположения границы литодинамической системы. Это сдерживает разработку эффективных берегозащитных мероприятий, поскольку для участков зарождения, транзита и разгрузки потоков наносов должны применяться разные подходы и принципы по защите берега и, соответственно, различные конструктивные решения [16].

Цель данной работы — систематизировать существующие представления о структуре и направлении вдольберегового транспорта наносов в пределах литодинамической системы восточного побережья Гданьской бухты, и на основе обсуждения полученных ранее и имеющихся

<sup>1</sup> Сбор данных выполнен в рамках темы № 0149-2018-0012 / 149-2019-0013 Госзадания Института океанологии РАН, анализ структуры потоков наносов — при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-05-01145).



**Рис. 1.** Район исследований, многолетняя роза ветров (а) и схема расположения донных пирамид с измерителями течений в районе Балтийского пролива (б). Варианты простираения зоны конвергенции встречных потоков: 1 — в вершине Балтийско-Янтарной береговой вогнутости, 2 — в окрестности Балтийского пролива; 3 — в пределах средней и южной частей Вислинской косы, 4 — в районе устья р. Вислы.

у авторов результатов сделать заключение о результирующем транспорте наносов на этом участке в целом и наиболее вероятном месте смены направления этого транспорта.

Район исследования охватывает восточное побережье Гданьского залива — от устья Вислы до м. Таран, представляющее собой вогнутую Самбийско-Вислинскую дугу с ориентацией береговой линии, меняющейся от направления З–В у устья р. Вислы до Ю–С вдоль западного берега Самбийского п-ва, который в свою очередь имеет вогнутость на участке Балтийск-Янтарный (рис. 1). На изучаемом участке побережья имеется поперечное препятствие, простирающееся до глубин 10–11 м — ограждающие входные молы пролива, соединяющего Гданьский залив Балтийского моря и Вислинский залив (согласно [20], для всего залива будет использовано единое название — Вислинский залив, а для пролива, соединяющего залив с Балтийским морем, — Балтийский пролив). Господствующие ветры западных румбов [20, 40, 43] воздействуют на берег в районе устья Вислы под острым углом, а на западный берег Самбийского п-ова (рис. 1) — почти по нормали к берегу. Это создает предпосылки для смены режима

транспорта наносов в пределах Самбийско-Вислинской дуги. Именно в пределах этого участка побережья Гданьского залива осуществляется наиболее мощный транспорт наносов, направление и величина которого были предметом исследований многих ученых в последнее столетие. Но до сих пор не выработано единого представления о структуре результирующего вдольберегового переноса (потока) наносов.

Исследования морфологии и динамики берегов Самбийского п-ова начаты немецкими учеными в середине XIX в. В первой трети XX в. они приобрели систематический характер в связи с активным разрушением берегов и необходимостью разработки надежных методов их защиты. В числе широкого спектра исследуемых процессов изучался также вопрос о вдольбереговом перемещении наносов на северном и западном побережье Самбии. Несмотря на использование морфологических, литологических и минералогических методик исследования, единого мнения об итоговом транспорте наносов вдоль западного побережья, в отличие от северного, у немецких ученых не сформировалось. Часть из них считали, что преобладает перенос наносов с юга на север, вплоть до м. Таран [49, 60], тогда

как другие утверждали об итоговом транспорте осадков от Янтарного к Балтийску [57, 59], но никто из них не продлевал его далее на юг.

У отечественных исследователей первоначально также доминировало представление об однонаправленном переносе обломочного материала на Ю от м. Таран до устья р. Вислы [4]. Его последователи во главе с классиками береговых исследований советского периода В.П. Зенковичем и Р.Я. Кнапсом обосновывали свою точку зрения изменением морфологии берега [13, 14, 17, 26–28, 30, 39], увеличением количества подводных валов по мере насыщения потока наносов [15] и главное — эффектом аккумуляции наносов у северного мола порта Балтийск (с соответствующим выдвиганием линии уреза) и сопряженным с ним низовым размывом за южным молотом (табл. 1) [28, 30].

По мере накопления натуральных данных и результатов лабораторных исследований сформировалась концепция разнонаправленных потоков, утверждающая существование достаточно обособленных литодинамических систем, в пределах которых происходят основные подвижки материала, в том числе и встречные, на фоне активных поперечных миграций [1–3, 12, 25]. Имеющиеся схемы направления переноса наносов можно условно разделить [4] на 3 варианта

по локализации зоны конвергенции встречных потоков (табл. 1):

- в вершине Балтийско-Янтарной береговой вогнутости (1-й вариант);
- в окрестности Балтийского пролива, соединяющего Калининградский/Вислинский залив с Балтийским морем и оформленного входными молами (2-й вариант);
- в пределах средней и южной (польской) частей Вислинской косы (3-й вариант).

Авторы, поддерживающие 1-й вариант, обосновывали свою позицию расчетами волновых энергетических характеристик по методике Попова–Совершаева [36] и по модели CERC [10] за периоды 1947–1967 гг., в основе которых лежат данные о местном ветре. Сторонники 2-го варианта, т.е. встречи потоков в окрестностях Балтийска, ориентировались на морфометрические изменения берега и подводного склона в 1970–90-х гг. [14, 15, 17, 34, 35] и отчасти на данные сейсмоакустической съемки 1992 г. [35]. Следует заметить, что в данных работах кроме признания почти полной разгрузки потока наносов на подходе к Балтийску указывались также миграционный тип движения на этом участке побережья [4] и наличие распластанной зоны аккумуляции

**Таблица 1.** Систематизация взглядов о вдольбереговом потоке наносов для восточной части Гданьского залива

| Направление потока        | Точка конвергенции                                | Схемы потоков наносов   | Критерии оценки направления потока наносов   |
|---------------------------|---|-------------------------|--|
| Однонаправленный на север | Отсутствует                                       | [49, 60]                | Изменение морфологии берега [49, 60]   |
| Однонаправленный на юг    | Отсутствует                                       | [13, 26, 39]            | Изменение морфологии берега [13, 14, 26, 39], увеличение количества подводных валов, эффект “заполнения входящего угла” у северного мола порта Балтийск и низовой размыв за южным молотом [28, 29, 30]             |
| Встречные                 | Вершина Балтийско-Янтарной вогнутости             | [10, 36]                | по методике Попова–Совершаева [36] и по модели CERC [10] на основе данных по ветру за периоды 1947–1967 гг.  |
|                           | Балтийский пролив                                 | [17, 34, 35, 57, 59]    | Морфометрические изменения берега и подводного склона в 1970-90-х гг. [14, 15, 17, 34, 35] и, отчасти, данные сейсмоакустической съемки в 1992 г. [35], состав донных осадков [57, 59].                            |
|                           | В пределах средней и южной частей Вислинской косы | [6, 12, 33, 41, 45, 56] | Расчет результирующих потоков ветровой [6] и волновой [12, 33, 41, 45, 56] энергии на основе статистики ветра за период 1949–1976 гг. и 1958–2001 гг. и на вдольбереговом распределении минералов-индикаторов [12] |

материала ввиду вариаций угла подхода волн по отношению к нормали к линии берега.

Точка зрения приверженцев 3-го варианта, отстаивающих разгрузку потоков на Вислинской косе [4], базировалась главным образом на расчетах результирующих потоков ветровой [6] и волновой [12, 33, 41, 45, 55] энергии на основе статистики ветра за период 1949–1976 и 1958–2001 гг. и отчасти на анализе закономерностей вдольберегового распределения минералов-индикаторов [12].

Таким образом, отсутствует однозначный ответ на вопрос об итоговом направлении транспорта наносов в пределах Самбийско-Вислинской дуги. Остается также открытым вопрос о главном источнике питания Вислинской косы — аллювии Вислы, материале абразии западного берега Самбии или их совместном участии.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поскольку систематических измерений течений на восточном побережье Гданьского залива никогда не проводилось, в работе использовались единственные данные стационарных измерений придонных течений, проводившихся АО ИОРАН в 1991 и 2003–2005 гг. в окрестностях молов Балтийского пролива (рис. 1) в пределах изобат 5.5–16 м: на ст. 38, 39 (3.08.1991–15.10.1991) и ст. 2–11 (8.05.1991–8.06.2003; 2.04.1991–18.06.2004; 18.07.1991–13.09.2004; 6.05.1991–27.05.2005; 12.09.2005–18.11.2005). Измерения проводились посредством автономных самописцев “БПВ-2” и “Поток-3М” (частота отсчетов — 1 раз в 30 и 10 мин), крепившихся в 1 м от дна внутри донных пирамид на тресе с нижней оттяжкой с талрепом для выборки слабины, что исключало их волновые колебания. Пирамиды выставлялись вдоль поперечных к берегу створов в 3.5 км к С, в 1 и 3 км к Ю от молов Балтийска, а также напротив оконечностей молов и по фарватеру на подходе к молам (рис. 1) на глубинах 5.5 (ст. 8, 10), 8 (ст. 38), 10 (ст. 6, 7), 12 (ст. 9, 11), 14 (ст. 39) и 16 м (ст. 2, 3).

В итоге охвачена зона ненарушенных вдольбереговых течений и зона активного влияния на них молов и входных-выходных течений в Балтийском проливе.

В работе использованы данные гидрометеостанции (ГМС) г. Балтийска по ветру и волнению за 1949–2005 гг. в стандартные сроки наблюдений: по ветру 8 раз в сутки (03, 06, 09, 12, 15, 18, 21, 24 ч), по волнению — 4 раза (03, 09, 15

и 21 ч). Направления ветра и волнения объединялись в 8 основных румбов ( $\pm 22.5^\circ$ ).

Распределение направлений (роза) течений в период действия ветров каждого направления — С–СЗ–З–ЮЗ–Ю–ЮВ — определялось по выборкам течений, наблюдавшихся при ветре конкретного румба (рис. 2). При этом учитывались лишь течения при скорости ветра  $> 6$  м/с, поскольку именно при таких скоростях и косом подходе ветра к берегу начинает формироваться устойчивый вдольбереговой перенос вод [6].

Кроме того, для каждой станции построены обобщенные розы течений (рис. 3), объединяющие все периоды измерений, и розы ветров для тех же периодов (поэтому последние отличаются для соседних станций). Обобщенные розы течений представлены для всего диапазона скоростей ветра (рис. 3а, 3б) и для ветров со скоростью  $> 6$  м/с (рис. 3в, 3г).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### *Ветро-волновой режим*

#### *на восточном побережье Гданьского залива*

По данным ГМС Балтийск за 1949–1988 гг. [39], среднемноголетняя повторяемость ветров ЮЗ–З–СЗ румбов всех скоростей примерно одинакова (14.68, 14.95, 14.31% соответственно), и только для северных ветров она немного меньше (10.45%). Если не рассматривать слабые ветры скоростью до 6 м/с, то доля З–ЮЗ румбов увеличивается, а северных — заметно уменьшается (табл. 2). Подобное перераспределение повторяемости направлений для волноопасных ветров связано с сезонной перестройкой западного переноса воздушных масс, проявляющейся в активизации ветров со стороны ЮЗ четверти горизонта в осенне-зимний штормовой период [22]. Для штормовых ситуаций (табл. 2, скорость ветра  $\geq 14$  м/с) повторяемость З ветра (56.4%) превышает суммарную повторяемость остальных направлений (С, СЗ, ЮЗ, 43.6%), т.е. ветер западного румба господствует среди всех штормовых ветров. Еще сильнее превалирование штормовых ветров ЮЗ–З сектора (72.9 и 16.0%) в сравнении с СЗ–С (6.5 и 4.3%) выражено для второй части периода — 1975–1984 гг. [37] (табл. 2).

Для анализируемых волноопасных (ЮЗ–З–СЗ–С) направлений ветра со скоростью  $\geq 6$  и  $\geq 14$  м/с результирующие азимуты, рассчитанные с учетом повторяемости ветров каждого из этих направлений, совпадают и равны  $276^\circ$ . Аналогичный результирующий азимут для волн

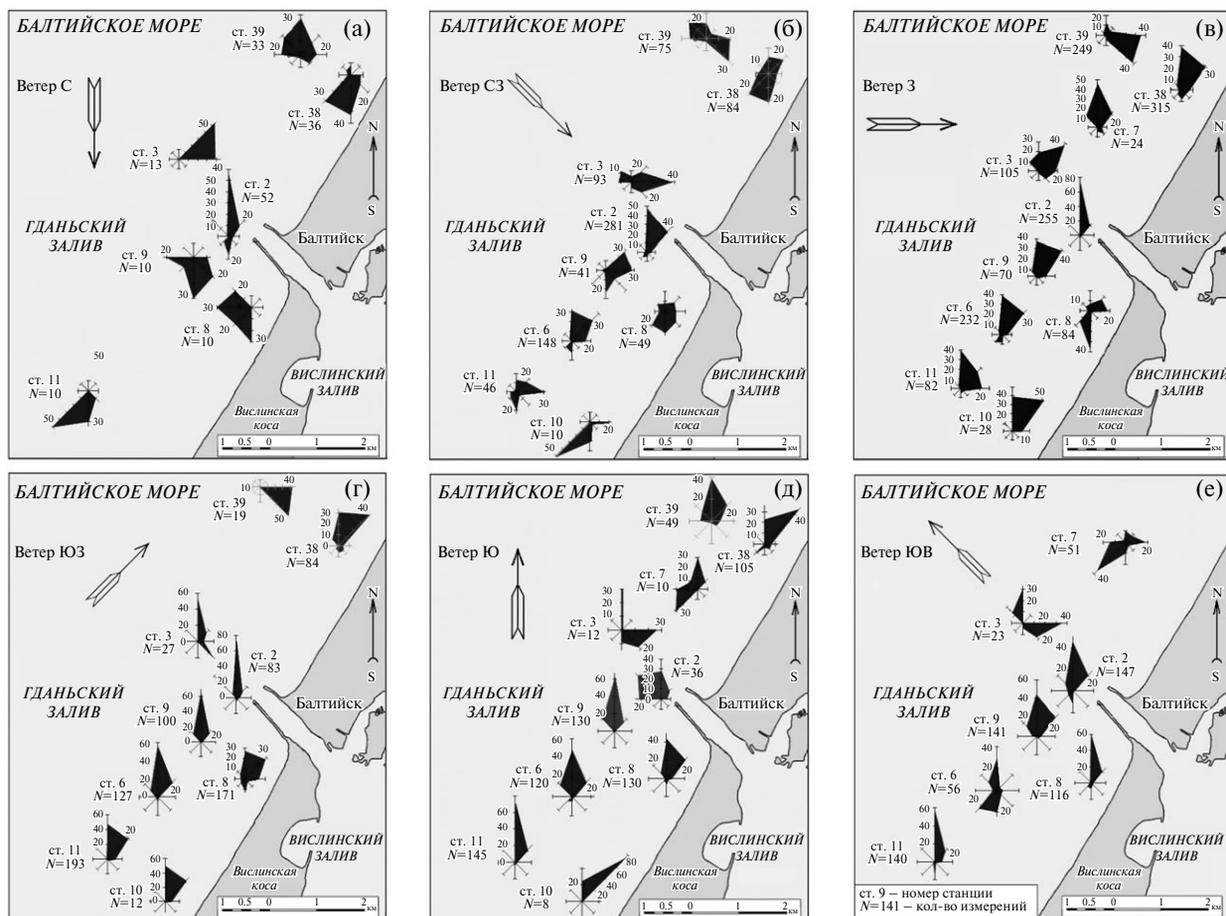


Рис. 2. Розы придонных течений по измерениям в 1991, 2003, 2004, 2005 гг. в окрестностях молв Балтийского пролива при ветрах конкретных румбов скоростью  $\geq 6$  м/с: (а) — С, (б) — СЗ, (в) — З, (г) — ЮЗ, (д) — Ю, (е) — ЮВ.  $N$  — количество отсчетов течений за период измерений.

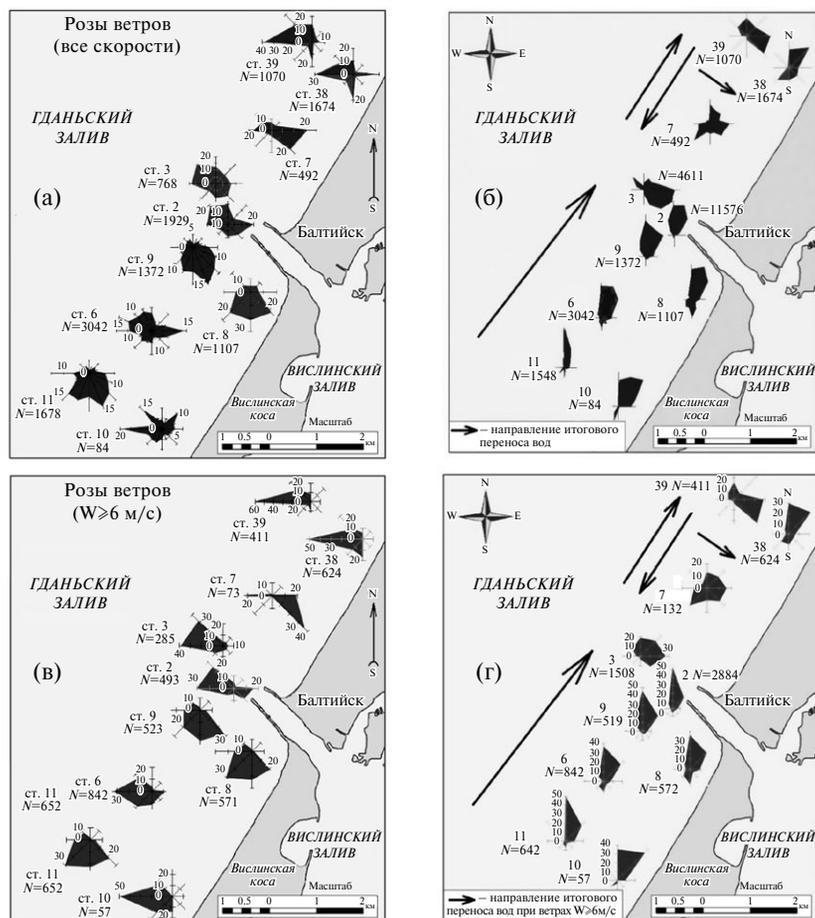
ЮЗ–С сектора высотой ( $h$ )  $\geq 1$  м —  $290^\circ$ ,  $h \geq 2$  м —  $284^\circ$ ,  $h \geq 3$  м —  $287^\circ$  (табл. 3).

Азимут нормали к берегу в районе Балтийска —  $300^\circ$ , и, следовательно, результирующие среднееголетние направления ветра и под-

хода волн имеют некоторую вдольбереговую составляющую, благоприятствующую преобладающему направлению транспорта наносов с ЮЗ на СВ, т.е. вдоль косы в сторону Балтийско-Янтарной береговой вогнутости.

Таблица 2. Повторяемость ветра волноопасных направлений (% всех направлений ветра) для свежих (6–13 м/с) и штормовых (14–28 м/с) ветров ЮЗ–З–СЗ–С направлений по данным ГМС “Балтийск” за 1949–1988 [40] и 1975–1984 гг. [37]. В скобках — повторяемость в пределах сектора волноопасных направлений (С–ЮЗ), принятого за 100%

| Градации, м/с        | ЮЗ           | З             | СЗ           | С            | $\Sigma$    | Источник |
|----------------------|--------------|---------------|--------------|--------------|-------------|----------|
| 6–9                  | 7.19         | 6.38          | 5.55         | 2.54         | 21.66       | [40]     |
| 10–13                | 1.38         | 2.76          | 1.06         | 0.22         | 5.42        | [40]     |
| 14–17                | 0.24         | 0.74          | 0.30         | 0.06         | 1.34        | [40]     |
| 18–20                | 0.06         | 0.26          | 0.11         | 0.01         | 0.44        | [40]     |
| 21–24                |              | 0.01          | 0.01         |              | 0.02        | [40]     |
| 25–28                |              | 0.01          |              |              | 0.01        | [40]     |
| $\Sigma$ (6–28 м/с)  | 8.87 (30.70) | 10.16 (35.17) | 7.03 (24.33) | 2.83 (9.80)  | 28.89 (100) | [40]     |
| $\Sigma$ (14–28 м/с) | 0.30 (16.57) | 1.02 (56.35)  | 0.42 (23.20) | 0.007 (3.87) | 1.81 (100)  | [40]     |
| $\Sigma$ (14–28 м/с) | 16.0         | 72.9          | 6.5          | 4.3          | 99.7        | [37]     |



**Рис. 3.** Розы ветров (а, в) и соответствующие им розы придонных течений (б, г) по объединенным данным всех измерений 1991, 2003, 2004, 2005 гг. в окрестностях молов Балтийского пролива при всех скоростях ветра (а, б) и для скоростей ветра  $\geq 6$  м/с (в, г).  $N$  — количество отсчетов течений за период измерений; стрелочками показано направление интегрального переноса наносов, которое предполагается исходя из полученной розы течений.

*Прибрежные течения в окрестности молов Балтийска*

В пользу переноса наносов с юга на север свидетельствуют результаты полигонных измерений придонных течений (1991 и 2003–2005 гг.) в районе входных молов Балтийского пролива (рис. 16). Скорость ветра в периоды измерений соответствовала многолетнему распределению: доминировали скорости 2–5 м/с (60–65%),

**Таблица 3.** Повторяемость (%) высот волн с направлением подхода с ЮЗ–З–СЗ–С на глубине 10 м, по данным ГМС “Балтийск“ за 1975–1984 гг. [37]

| Высота волн, м | ЮЗ    | З     | СЗ    | С     | Σ (ЮЗ–С) |
|----------------|-------|-------|-------|-------|----------|
| 0.25–5         | 15.17 | 28.42 | 15.65 | 26.61 | 85.85%   |
| 1–5            | 7.95  | 19.53 | 9.31  | 9.85  | 46.83%   |
| 2–5            | 1.12  | 7.41  | 2.26  | 1.39  | 12.19%   |
| 3–5            | 0.11  | 1.13  | 0.2   | 0.27  | 1.73%    |

заметно реже встречался ветер в диапазоне 6–9 м/с (27–32%), и только в 7–10% случаев скорость ветра превышала 10 м/с. Во всем диапазоне скоростей преобладали ветры с западной половины горизонта, а при скоростях более 6–8 м/с их повторяемость еще больше возростала.

Периоды измерений охватывали различные сезоны, отличающиеся между собой повторяемостью преобладающих направлений ветра. В периоды весенне-осенних (2.04.2004–13.09.2004) и летне-осенних (3.08.1991–15.10.1991) измерений доминировали ветры ЮЗ–С сектора (соответственно 59.3 и 61.5%), в пределах которого повышенную повторяемость имели ЮЗ и З ветры (30.6 и 37.5%). В короткий весенний период (8.05.2003–8.06.2003) преобладали СЗ–С (35.9%) и встречные Ю–ЮЗ ветры (29.0%). Осенний период измерений (12.09.2005–18.11.2005) отличался господством ветров южных румбов — ЮВ–ЮЗ (65.0%).

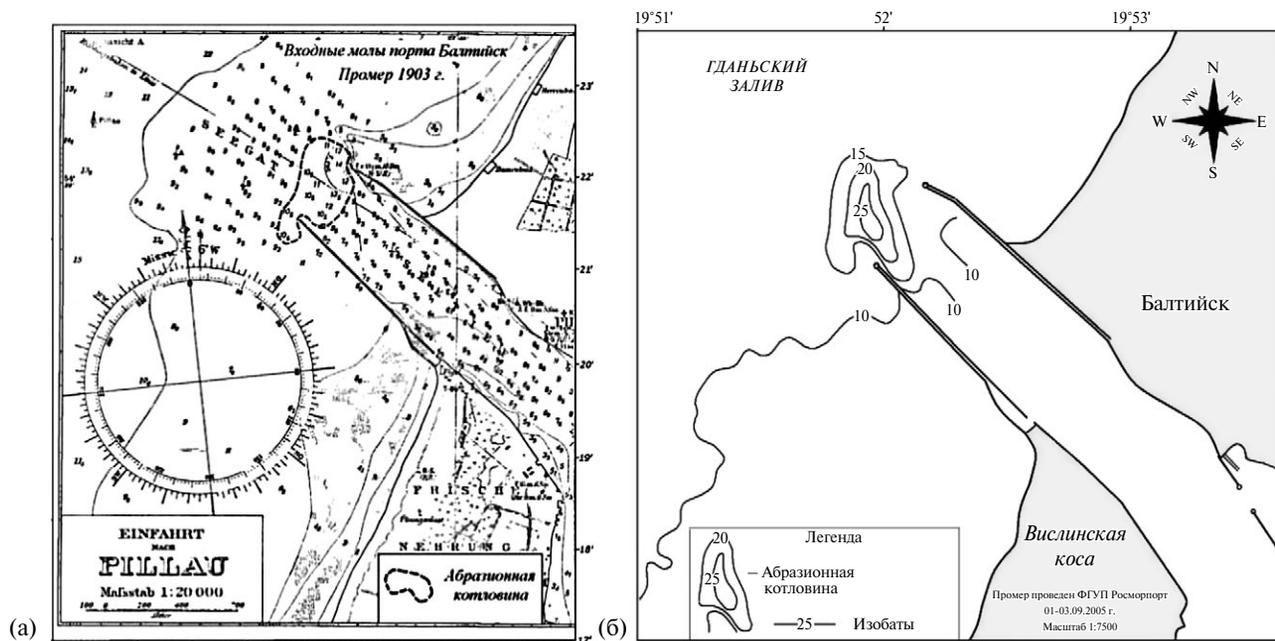


Рис. 4. Котловины размыва у оголовков молов порта Балтийск: (а) — в 1903 г., (б) — в 2005 г. (промер Росморпорт).

Сильные ветры скоростью  $\geq 6$  м/с в полевые сезоны 1991, 2003–2005 гг. были в основном ЮЗ–З–СЗ, реже С. Их суммарная повторяе-

мость из 100% всех направлений при  $\geq 6$  м/с составляла 83.3, 86.3, 71.3 и 54.1% соответственно. В трех сезонах (1991, 2004 и 2005 гг.) З–ЮЗ ветры

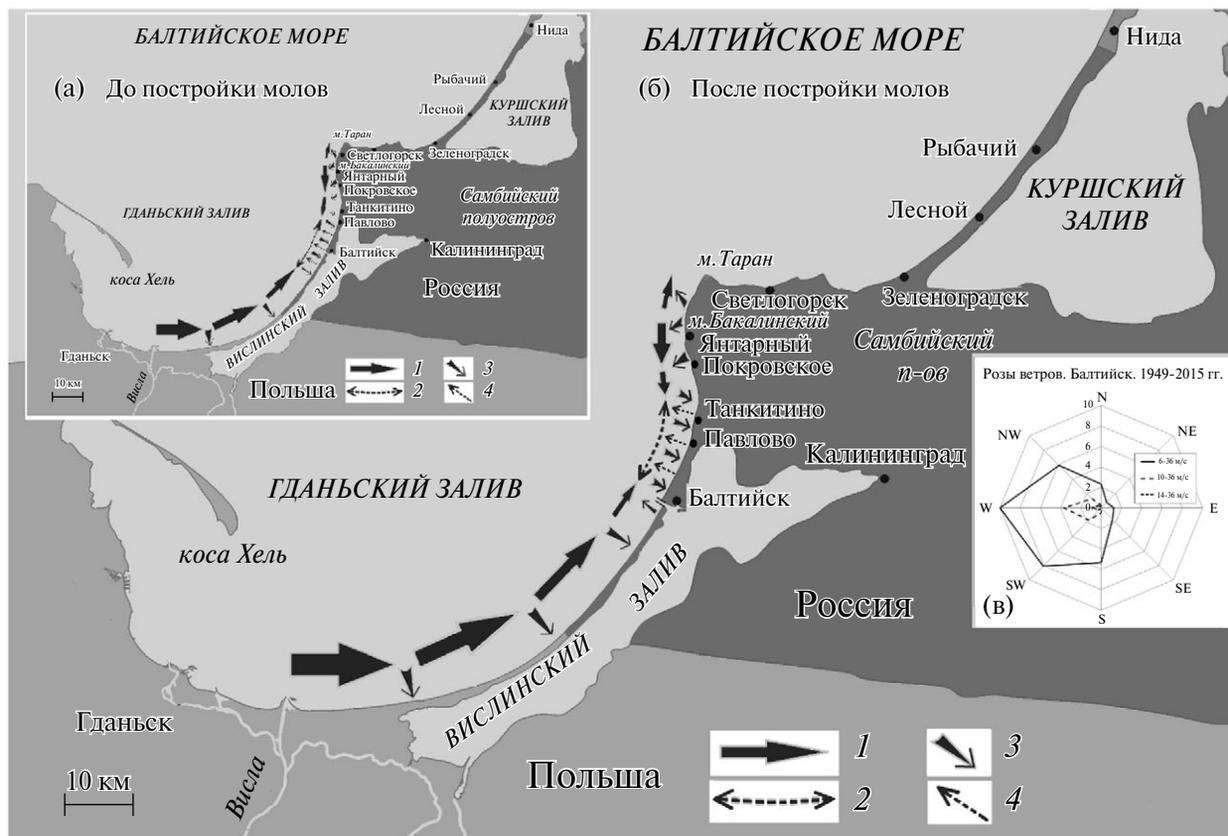


Рис. 5. Система встречных потоков наносов вдоль побережья Гданьского залива до возведения входных молов (а) и в настоящее время (б): 1 — вдольбереговой результирующий транспорт наносов, 2 — миграционные вдольбереговые потоки, 3 — разгрузка потока наносов, 4 — поперечный вынос осадков в море. Розы ветров (в) для градаций скорости 6–36, 10–36 и 14–36 м/с.

(64.0, 54.7 и 44.1%) действовали заметно чаще СЗ–С ветров (19.3, 16.6 и 10.0% соответственно). И только в мае 2003 г. повторяемость СЗ–С ветров более чем вдвое превышала повторяемость ветров З–ЮЗ направлений (60.2 против 26.1%).

Розы придонных течений, построенные для ветров конкретных румбов (С–СЗ–З–ЮЗ–Ю–ЮВ) со скоростью  $\geq 6$  м/с, показывают, что при существенной вдольбереговой составляющей ветра (С, ЮЗ и Ю) прибрежные течения южнее и севернее моллов ориентировались вдоль направления действующего ветра (рис. 2а, 2г, 2д). В пределах глубин 5–12 м (ст. 6, 8–11, 38) отклонение течений в сторону моря или берега было небольшим, но за пределами изобаты 12 м доля поперечных движений была больше. На открытом участке берега (ст. 39) это связано с ослаблением ветро-волнового воздействия на придонный слой с ростом глубины, а вблизи оконечности моллов (ст. 2, 3) — с искажающим воздействием самих моллов и входных-выходных течений Балтийского пролива.

При западном ветре вдольбереговой перенос вод на СВ в целом преобладал, и только во входящем углу южного мола (ст. 8) формировались встречные вдольбереговые течения на ЮВ, что указывает на формирование здесь локальной антициклональной циркуляции вод (рис. 2в).

В период воздействия мористого СЗ ветра, направленного почти по нормали к берегу, зона доминирующих ЮВ течений распространялась на весь мелководный сектор исследуемого побережья — южный (ст. 8, 10) и северный (ст. 38), в то время как на южных мористых станциях (ст. 11, 6, 9, 2) действовал встречный СВ перенос вод. Далее на С, на фарватере подходного канала (ст. 3) и на глубоководной ст. 39, течения чаще были направлены в сторону берега, тогда как на мелководье (ст. 38) — вдоль берега (рис. 2б). В результате при сильном СЗ ветре южнее моллов формировалась система двух встречных струй вдольбереговых придонных течений: на СВ на мористых (ст. 11, 6, 9, 2) и на ЮВ — на мелководных (ст. 10, 8) станциях. Наблюдавшееся севернее моллов сочетание переноса вод к берегу на глубинах 14–16 м (ст. 2, 39) и вдольберегового на мелководье (ст. 38, чаще на ЮЗ) свидетельствует о трансформации вдольберегового переноса вод в вихревые движения.

Во входящем углу южного мола (ст. 8) течения при СЗ ветре чаще были направлены на юг и в сторону моря (рис. 2б), а при З ветре — в сторону моря (рис. 2в), т.е. при СЗ ветре во входя-

щем углу южного мола активизируется компенсационный отток вод не только в сторону моря, но и вдоль берега на юг минимум на расстояние 3–4 длин мола.

При поперечных береговых ЮВ ветрах тенденция вдольберегового переноса придонных вод на СВ сохраняется на южном участке (ст. 6, 8–11) и на подходе к молам (ст. 2). При этом на подходном фарватере (ст. 3) течения направлены на СЗ–С и В–ЮВ, что вызвано входными-выходными течениями Балтийского пролива. Севернее моллов течения имеют встречное ЮВ направление (ст. 7), способствуя формированию возвратно-поступательных и вихревых движений (рис. 2е).

За четыре сезона измерений скорости придонных течений в окрестностях моллов Балтийска превышали 10 см/с в 16–32% случаев на мелководных (5.5 м) и в 8–9% случаев — на глубоководных (16 м) станциях. На мелководных станциях (ст. 8, 10, 38) максимальные скорости течений достигали 45, 54 и 30 см/с; на глубоководных (ст. 11, 6, 9, 2, 3, 39) они составляли 34, 27, 24, 65, 45, 34 см/с соответственно, причем самые большие величины наблюдались в районе оконечности южного мола (ст. 2, 50–65 см/с) и на подходном фарватере (ст. 3, 45 см/с), что, наиболее вероятно, связано с влиянием входных-выходных течений в Балтийском проливе.

По данным для четырех полевых сезонов (1991, 2003, 2004, 2005 гг.), преобладающий перенос вод южнее моллов Балтийского пролива при ветрах всех градаций скорости (рис. 3а) был направлен на СВ (рис. 3б). Но севернее моллов структура течений не была аналогичной, на глубоководных станциях (ст. 7 и 39) наблюдались нормальные к берегу течения, а ближе к берегу (ст. 7 и 38, глубина 8 м) — возвратно-поступательные вдольбереговые течения. Для ветров скоростью  $\geq 6$  м/с (рис. 3в) все элементы структуры течений аналогичны: южнее моллов наблюдается перенос вод на С и СВ на глубинах до 12 м (ст. 9, 11), а севернее моллов это направление переноса сохраняется до глубин 8 м (ст. 38), тогда как на глубоководных станциях (ст. 7, глубина 10 м; ст. 39, глубина 14 м) течения имеют различные направления (рис. 3г).

Таким образом, на исследуемом побережье Гданьского залива формируется достаточно устойчивый перенос придонных вод вдоль направления ветра до глубин 8–12 м. Поскольку однонаправленность переноса придонных вод вдоль берега при устойчивом ветре, дующем под

углом к берегу, выявлялась ранее [6] и на севере Самбийского п-ова в ходе синхронных измерений на глубинах 3,5, 5, 7 и 10 м в 1988 г., будем опираться на этот факт далее в рассуждениях о структуре вдольбереговых потоков применительно ко всему восточному побережью Гданьского залива.

Увеличение угла между берегом, направлением ветра и подхода волн приводит к нарушению устойчивого вдольберегового течения, способствуя формированию возвратно-поступательных движений и вихрей. Но даже при вдольбереговом направлении ветра поперечные препятствия (молы, пирсы) нарушают структуру вдольберегового потока, формируя локальные нагоны вод во входящих углах, активизируя компенсационные течения и локальные циркуляционные движения, масштабы которых соизмеримы с размерами препятствий. У оконечностей молов течения усиливаются/ослабляются благодаря взаимодействию с входными-выходными течениями в проливе.

*Неопределенности “аккумулятивного” морфодинамического критерия оценки результирующего направления вдольберегового транспорта наносов*

По общепризнанному “аккумулятивному” критерию [17, 24, 27, 29], во входящем (по ходу потока) углу перед поперечным береговым препятствием происходит аккумуляция наносов, а позади препятствия — абразия берега. Именно на него опираются сторонники утверждения о существовании на восточном побережье Гданьского залива результирующего переноса наносов на юг, поскольку севернее молов Балтийского пролива расположена зона накопления рыхлого материала, а южнее молов наблюдается активная абразия берега.

Но в ряде случаев для препятствий, расположенных перпендикулярно выровненному берегу, возникает неопределенность: во-первых, когда аккумуляция происходит с обеих сторон от препятствия; во-вторых, аккумуляция иногда наблюдается не во входящем по отношению к господствующим штормовым ветрам наветренном углу, а в теневом, подветренном углу; в-третьих, в наветренном углу оградительных молов ряда портов преобладают абразионные процессы [7, 24, 28, 61]. Подобные неопределенности возникают из-за различного соотношения длины молов и ширины прибойной зоны, композиционных особенностей оградительных мо-

лов, очертаний и экспозиции берега по отношению к господствующим сильным ветрам.

Согласно [27], случаи аккумуляции песчаного материала с обеих сторон молов или только на теневом участке характерны при коротких молах, не доходящих до зоны бурунов и поэтому не прерывающих вдольбереговой транспорт наносов. Но молы, выходящие за пределы прибойной зоны, практически полностью задерживают вдольбереговой поток, способствуя аккумуляции и нарастанию берега на наветренной стороне молов и низовой абразии с их подветренной стороны.

В [28] также описана возможность размыва берега во входящем углу длинного мола, что подтверждает неопределенность “аккумулятивного” критерия. Подобная аномальная ситуация наблюдается, по мнению авторов настоящей статьи, и во входящем углу южного мола Балтийска (выдвинут в море на расстояние до 1 км), являющегося наветренным по отношению к господствующим ветрам и волнениям ЮЗ и ЮЗ–З направлений (азимуты от 225° до 247,5°, тогда как азимут местной нормали к берегу составляет 300°).

Основным абразионным механизмом, обеспечивающим размыв берега южнее молов Балтийска, может быть следующий. Штормовые ветры ЮЗ–З румбов формируют повышенные нагоны во входящем углу южного мола, способствуя активизации размыва берега и выносу материала придонными компенсационными течениями на глубины как минимум до 15 м, а также вдоль берега на юг [7, 46, 61]. Интенсивность вдольбереговых течений настолько велика, что они в состоянии переносить на расстояние до 3 км на юг кирпичи от разрушаемой крепости, расположенной у корня южного мола, а их менее крупные фрагменты — еще дальше. Материал, вынесенный на глубины, вовлекается во вдольбереговой поток на север. В пользу этого говорит тот факт, что придонные течения у оконечности южного мола (ст. 2, глубина 16 м) три полевых сезона (2003–2005 гг.) ориентировались на С-СВ, были самыми интенсивными и достигали 50–65 см/с, чего вполне хватает для обеспечения массового транспорта наносов.

Возможность транзита наносов на глубинах >10 м и частичный обход длинных молов признают многие исследователи [4, 5, 13, 24, 25, 31, 42, 61], включая и Р.Я. Кнапса [28]. По оценкам некоторых ученых, доля наносов, перемещаемая за пределами изобаты 10 м, составляет соответ-

ственно 0.25 и 0.29 от общего объема транспорта наносов [28, 30, 44], а местами может достигать половины его общей величины [14]. В пользу существования значимого перемещения наносов на глубинах как минимум до 15–18 м свидетельствует эффект заносимости подходов фарватеров для портов, расположенных на открытом побережье, миграция изобат и формирование баров, мористее оконечностей входных молов, а также мощные деформации дна у их оголовков [7, 8, 18, 24, 31, 32, 60–62].

Итак, существующая локализация зон аккумуляции и абразии в окрестностях входных молов Балтийского пролива не позволяет делать однозначные выводы об итоговом направлении вдольберегового транспорта наносов на основе прямого применения “аккумулятивного критерия”. Во входящем углу, образованном поперекбереговым препятствием и линией берега, возможна не только аккумуляция наносов, но и локальная абразия, которая наиболее характерна для длинных молов, способствующих возникновению значительного ветро-волнового нагона во входящем углу.

#### *Альтернативный “абразионный” морфодинамический критерий*

Типичное морфометрическое проявление влияния поперечного препятствия на водный поток — резкие изгибы изобат вблизи его морской оконечности, или замкнутые абразионные котловины [4, 27, 30] (рис. 4). В качестве “абразионного” критерия предлагается использовать наличие и направление промоин размыва, формирование которых связано с воздействием мощных придонных течений.

В районе Балтийска существует мощная абразионная котловина эллипсовидной формы, примыкающая к оголовку южного мола и пересекающая фарватер (глубины 10–12 м) в СВ направлении примерно параллельно берегу. Она начала формироваться после постройки существующих удлиненных молов (1878 г.) и уже к 1903 г. имела отчетливые контуры с глубинами до 11–14 м (рис. 4а). В конце XX в. максимальные глубины достигали здесь 28.5 м (рис. 4б), а после реконструкции оконечностей молов в 2006–2008 гг. увеличились до 32 м и сместились еще ближе к южному молу.

Аналогичный абразионный эффект наблюдается и у оголовков молов малого порта Рагачемс в Рижском заливе и кратковременно — у рыбацкого порта на ЮВ побережье Балтики [28, 29], у молов польских морских портов Мже-

жино, Леба, Владиславово, а также в глубоководных портах, например в порту Миаоли (Тайвань) [52]. Все указанные ложбины примыкают к оконечности молов и ориентированы вдоль действующих течений и потока наносов [4].

В пользу утверждения о транспорте наносов с ЮЗ на СВ в районе молов Балтийского пролива служит аналогия с входными молами порта Риги [4]. У обоих портов с юго-западной стороны отмечается размыв берега при схожих доминирующих ветрах, экспозиции берега и азимутов молов (320° в Балтийске и 310° в Риге). И поскольку признается, что вдольбереговой транзит наносов у Рижского порта происходит с Ю–З на С–В [30], то у Балтийска он ожидается того же направления.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на более чем вековой период морфо-литодинамических исследований, все еще отсутствует общепризнанное представление о вдольбереговой структуре результирующих потоков наносов в пределах восточного побережья Гданьского залива. Имеющиеся оценки существенно расходятся в вопросах направления потоков, месте их конвергенции. Наиболее популярное утверждение о наличии потока наносов с С на Ю, в результате которого заполняется входящий угол у основания северного мола, ограждающего Балтийский пролив, не согласуется с представлениями о том, что направление вдольберегового потока определяется результирующей вдольбереговой составляющей ветра [27, 53], которая у Балтийска имеет северную, а не южную составляющую, а также с направлением эрозионной ложбины.

Для разрешения вышеуказанного противоречия предлагается гипотеза, основанная на следующих ниже утверждениях.

Согласно историческим хроникам, на восьмикилометровом участке на север от нынешнего положения Балтийского пролива зафиксировано поочередное образование трех проливов (с севера на юг): Лохштедтский (1004 г.), Пиллау (1376 г.) и последний, нынешний пролив — Новый — Зее Фриш-Пилауский (1510 г.) [21], для стабилизации положения которого (и предохранения фарватера от заносимости) были возведены оградительные молы [61]. Строительство сначала южного мола (1768–1780 гг.), а затем северного (1818–1840 гг.) [21] свидетельствует в пользу того, что в естественных условиях при

отсутствии моллов преобладал перенос наносов с юга на север.

До возведения оградительных входных моллов Балтийского пролива (и в те времена, когда пролив был совсем в другом месте) на достаточно обширном участке к югу и к северу от нынешнего положения пролива простиралась зона вдольбереговых миграционных подвижек наносов, разделявшая встречные Вислинский и Самбийский потоки; направление результирующего движения наносов в этой зоне все время менялось в зависимости от накапливаемой истории воздействия ветра и волн (рис. 5).

Ввиду удаленности южного источника питания — устья Вислы и относительно небольшого поступления абразионного материала с севера положительный бюджет наносов в этой зоне был небольшим из-за постоянного выноса материала на глубины вследствие того, что экспозиция берега на этом участке близка к поперечной по отношению к потоку волновой энергии, что способствует активизации сгонно-нагонных явлений и размыву берега [51]. Косвенным подтверждением этому может служить заметное выдвигание изобат 20–25 м в сторону моря за счет поступления материала с размываемого берега, а также прорывы тела Вислинской косы и образование проливов после экстремальных штормов.

Молы Балтийского пролива стали препятствием на пути массовых вдольбереговых подвижек наносов, причем они расположены в таком месте, где в среднем несколько превалировало движение на С. Казалось бы, это должно создать условия для накопления материала во входящем углу с Ю, образованном моллом и линией берега. Но из-за значительной длины моллов стало преобладать действие другого механизма: во время активного ветрового воздействия с ЮЗ–З локальный нагон в пределах этого угла вызывает компенсационный придонный отток вод, который выносит рыхлый материал либо на глубины и далее в обход моллов, либо вдоль берега на Ю (в зависимости от угла подхода волн). При доминировании ветров ЮЗ–З румбов и СВ–С течений [7, 46] материал размыва берега Вислинской косы у южного мола транспортируется на север и аккумулируется в углу северного мола и в пределах Балтийско-Янтарной излучины.

Аналогичный механизм, конечно, действует и с другой — северной стороны моллов при ветрах с ССЗ–С. Но поскольку С–ССЗ ветры встречаются реже З–ЮЗ, в том числе и в диапазоне

сильных скоростей ветра, перенесенный на юг материал в итоге возвращается обратно на север.

Таким образом, суть гипотезы состоит в том, что антропогенный фактор существенно изменил структуру вдольбереговых потоков — после строительства входных моллов Балтийского пролива южная граница существовавшей ранее зоны вдольбереговых возвратно-поступательных миграций песчаных наносов (рис. 5а) сместилась на север до уровня северного мола Балтийского пролива (рис. 5б).

В рамках этой гипотезы объясняется факт, что заполнение угла северного мола началось сразу же после его постройки [61], затем темпы выдвигания берега стали снижаться [56], а в настоящий момент, по данным [48], берег на участке в 8–10 км севернее моллов уже много лет стабилен. Значит, на данном участке берега существует равновесие возвратно-поступательных подвижек наносов.

Другой факт связан с тем, что с началом открытой добычи янтаря в 1914 г., и особенно после массовых сбросов вскрышных пород Янтарного комбината в море с 1958 г. [9, 19], в месте сброса и в пределах Балтийско-Янтарной дуги сформировались пляжи шириной до 80–100 м с зачатками молодой авандюны и непрерывная толща алевритовых песков (0.05–0.25 мм) до глубин 15–20 м [5, 8, 42]. В то же время динамика берега и подводного склона Вислинской косы к югу от моллов не претерпела заметных изменений [11, 19, 42, 50], т.е. южная граница массовых миграций располагается на траверсе входных моллов Балтийского пролива.

Можно сказать, что после появления моллов Балтийского пролива, фактически ограничивших с юга зону возвратно-поступательных миграций, главный источник питания Вислинской косы в существующих условиях — аллювий Вислы. Материал абразии западной Самбии в большой степени определяет динамику в северной оконечности Вислинской косы (10 км от Балтийского пролива до места ее примыкания к Самбийскому п-ову в районе Приморска).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный обзор существующих схем вдольберегового транспорта наносов указывает на отсутствие единого мнения о структуре результирующих потоков наносов в пределах восточного побережья Гданьского залива. Настоящая статья предлагает свою гипотезу, в рамках которой согласовываются два факта — заполне-

ние входящего угла северного мола, ограничивающего Балтийский пролив, и размыв берега с юга от них, с одной стороны, и господствующее направление переноса наносов с Ю на С, с другой стороны.

Данные о ветро-волновом режиме, параметрах придонных течений и ориентации абразионной котловины, сформированной между оконечностями молов Балтийского пролива, свидетельствуют о том, что итоговый вдольбереговой перенос в районе существующего ныне Балтийского пролива направлен на СВ к центру Балтийско-Янтарной вогнутости.

В зоне южнее молов Балтийского пролива выявлена прямая связь между ветром и течениями — при ветрах  $>6$  м/с вдольбереговые течения ориентируются вдоль береговой составляющей ветра. При поперечном к берегу ветре единый вдольбереговой поток трансформируется в локальные возвратно-поступательные и вихревые движения.

На восточном побережье Гданьского залива всегда существовала система двух встречных потоков — Вислинского (от устья Вислы на СВ) и Самбийского (от Бакалинского выступа на Ю), разделенных достаточно протяженной зоной вдольбереговых миграций. После появления входных молов Балтийского пролива эта зона миграционных подвижек сузилась (до 15–18 км) и в настоящий момент располагается к северу от молов (южная граница) до вершины Балтийско-Янтарной вогнутости (северная граница). После появления молов, фактически остановивших миграционные потоки с севера на юг, главным источником питания основного тела Вислинской косы в существующих условиях становится аллювий Вислы.

Молы появились фактически в середине исторически сложившейся зоны равновесных вдольбереговых миграций наносов. С одной стороны, молы препятствуют этим миграциям, инициируя накопление наносов с каждой из сторон молов. Но, с другой стороны, они привнесли новый механизм абразии, возникающий в связи с локальным нагоном вод во входящих углах молов, образованных линией берега и далеко выступающими за линию первого обрушения волн входными молами. Более частые и мощные нагоны во входящем углу южного мола при доминирующих штормовых ветрах ЮЗ–З–СЗ направлений выносят материал на большие глубины, где он частично переносится вдольбереговым потоком в обход молов на север.

На выровненных участках побережья с косо подходящими штормовыми ветрами оценки доминирующего направления переноса наносов по общепринятому “аккумулятивному” и альтернативному “абразионному” (ориентация абразионной ложбины) критериям, как правило, совпадают. Но на изогнутых участках побережья с экспозицией берега, близкой к поперечной к потоку ветро-волновой энергии, оценки по “аккумулятивному” критерию могут быть противоречивыми в зависимости от длины препятствия. В этих случаях и при наличии устойчивой абразионной котловины (ложбины), приуроченной к поперечному препятствию, более надежным представляется “абразионный” критерий — по ориентации котловины.

### *Благодарности*

*Авторы благодарны Н.С. Лядвику, Ю.П. Бынькову и А.В. Шушарину (Росморпорт) за обсуждение особенностей конфигурации и характеристик абразионной котловины.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аганов А.П., Жиндарев Л.А.* Гранулометрический состав отложений пляжа как показатель механизма перемещения наносов в береговой зоне юго-восточной Балтики // Литология и полезные ископаемые. 1990. № 6. С. 105–111.
2. *Айбулатов Н.А.* Динамика твердого вещества в шельфовой зоне. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 271 с.
3. *Айбулатов Н.А., Жиндарев Л.А., Пискарева Н.А.* Транспорт наносов в береговой зоне юго-восточной Балтики // Природные основы берегозащиты. М., 1987. С. 99–116.
4. *Бабаков А.Н.* Вдольбереговой транспорт наносов в пределах восточного побережья Гданьского залива и “абразионный” критерий оценки итогового переноса наносов. Обзор. Калининград: ИО РАН, Атлантическое отд., 2017. 9 с. URL: <http://atlantic.ocean.ru/index.php/issledovaniya/publikatsii> (дата обращения 05.03.2019).
5. *Бабаков А.Н.* Динамика осадочного вещества в береговой зоне моря // Нефть и окружающая среда Калининградской области. Т. 2. Море. Разд. 1.2 / Под. ред. Каджояна Ю.С., Пичужкиной О.Е., Сивкова В.В., Фельдмана В.Н. Калининград: Терра Балтика, 2012. С. 37–59.
6. *Бабаков А.Н.* Пространственно-временная структура течений и миграций наносов в береговой зоне юго-восточной Балтики (Самбийский п-ов и Куршская коса): Дис. ... канд. геогр. наук. Калининград: КГУ, 2003. 273 с.
7. *Бабаков А.Н.* Характеристика придонных течений Гданьского залива вблизи входных молов порта Балтийск по данным натурных измерений // Уч.

- зап. РГО (Калининградское отд.). Т. 7. Ч. 1. 2008. С. G1–G6.
8. *Бабаков А.Н., Чубаренко Б.В.* Изменчивость морфометрии подводного склона и литологии осадков вдоль восточного побережья Гданьского залива // “Учение о развитии морских берегов: вековые традиции и идеи современности”. Материалы конф. в честь 100-летия проф. В.П. Зенковича. СПб., 2010. С. 147–149.
  9. *Басс О.В., Жиндарев Л.А.* Техногенез в береговой зоне песчаных побережий внутренних морей. 1. Воздействии гидротехнической деятельности на морфодинамику береговой зоны ЮВ Балтики // Геоморфология. 2007. № 4. С. 17–24.
  10. *Белошапков А.В., Белошапкова С.Г., Брасавс Г.Х.* Особенности динамики наносов на западном побережье Самбийского полуострова // Строение шельфа морей СССР как основа оценки инженерно-геологических условий. Сб. науч. тр. Рига: ВНИИ МОР-ГЕО, 1984. С. 42–45.
  11. *Бобыкина В.П., Карманов К.В.* Динамика берегов вершины Гданьского залива и связь с антропогенным воздействием // Создание искусственных пляжей и островов и других сооружений в береговой зоне морей, озер и водохранилищ. Тр. междунар. конф. Новосибирск, 2009. С. 119–124.
  12. *Богданов Н.А., Совершаев В.А., Жиндарев Л.А., Агапов А.П.* Эволюция представлений о динамике юго-восточных берегов Балтийского моря // Геоморфология. 1989. № 2. С. 62–69.
  13. *Бойнагрян В.Р.* Динамика и морфология Самбийского полуострова // Океанология. 1966. Т. VI. Вып. 3. С. 458–465.
  14. *Болдырев В.Л.* Морфологические и литологические индикаторы регионов развития вдольбереговых потоков песчаных наносов // Изучение основных закономерностей и тенденций перемещения береговой линии Балтийского моря за последние 100 лет / Под ред. Орвику К. Таллин: АН ЭССР, 1992. С. 55–62.
  15. *Болдырев В.Л.* Подводные песчаные валы как индикаторы вдоль берегового перемещения наносов // Тр. ИО АН СССР. Т. XLVIII. 1961. С. 193–201.
  16. *Болдырев В.Л., Гречищев Е.К., Рыбак О.Л., Рыбка В.Г., Шульгин Я.С.* Основы берегозащиты побережья Балтики // Baltica. V. 7. Vilnius, 1982. P. 187–194.
  17. *Болдырев В.Л., Зенкович В.П.* Балтийское море // Дальний Восток и берега морей, омывающих территорию СССР. М.: Наука, 1982. С. 214–218.
  18. *Болдырев В.Л., Лащенков В.М., Рябкова О.И.* Штормовая переработка берегов Калининградского побережья Балтийского моря // Вопросы динамики берегов и палеогеографии Балтийского моря. Т. 1. Ч. 1. Вильнюс: Ин-т геогр. АН ЛитССР, 1990. С. 97–129.
  19. *Болдырев В.Л., Лащенков В.М., Рябкова О.И.* Эволюция западного побережья Калининградской области при интенсивном антропогенном воздействии // Эволюция берегов в условиях поднятия уровня океана. М.: Наука, 1992. С. 212–225.
  20. Гидрометеорологический режим Вислинского залива / Под ред. Лазаренко Н.Н., Маевского А. Л.: Гидрометиздат, 1971. 330 с.
  21. *Довыденко Л.* Калининградский морской канал. Калининград: Живем, 2011. 192 с.
  22. *Дорфман Ц.Я., Укмергишкис А.Д.* Ветровой режим на территории Литовской ССР и Калининградской обл. РСФСР. Вильнюс: Госполитнаучиздат, 1964. 68 с.
  23. *Есюкова Е.Е., Чубаренко Б.В.* Тенденции в изменении ветрового режима для региона Балтийского моря // Уч. зап. РГО (Калининградское отд.). 2010. Т. 9. С. 11–18.
  24. *Жаромскис Р.Б.* Изменения в береговой зоне юго-восточной Балтики под влиянием гидротехнических сооружений различного типа // “Прибрежная зона моря: Морфологическая динамика и геоэкология”. XXI междунар. береговая конф. Калининград: Изд-во КГУ, 2004. С. 240–244.
  25. *Жиндарев Л.А., Хабидов А.Ш., Тризно А.К.* Динамика песчаных берегов морей и внутренних водоемов // Под ред. Каплина П.А. Новосибирск: Наука, 1998. 271 с.
  26. *Зенкович В.П.* Некоторые черты динамики польского берега Балтийского моря // Изв. Всесоюз. географ. об-ва. 1958. Т. 90. Вып. 3. С. 23–31.
  27. *Кнапс Р.Я.* Влияние неровностей контура берега и вдольбереговое перемещение наносов // Baltica. 1982. Вып. 7. С. 195–202.
  28. *Кнапс Р.Я.* Оградительные сооружения типа молов и движение наносов на песчаных побережьях // Изв. АН ЛатвССР. 1952. № 6 (59). С. 87–130.
  29. *Кнапс Р.Я.* О принципах компоновки оградительных сооружений на песчаных побережьях // Сб. науч. тр. ЛенморНИИпроект. Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации береговых сооружений и морского транспорта. М., 1979. С. 3–16.
  30. *Кнапс Р.Я.* Перемещение наносов у берегов восточной Балтики // Развитие морских берегов в условиях колебательных движений земной коры. Таллин: Валгус, 1966. С. 21–29.
  31. *Коробова И.Я.* Динамика рельефа внешней части береговой зоны в районе Клайпеды и ее связь с заносимостью подходного канала // Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Вильнюс: Вильнюсский гос. ун-т, 1972. 23 с.
  32. *Лащенков В.М., Кожухметов А.Б., Рябкова О.И.* Деформация подводного берегового склона одной из бухт юго-восточного побережья Балтийского моря // Вопросы динамики берегов и палеогеография Балтийского моря / Под ред. Гудялиса В.К. Т. 1. Ч. 1. Вильнюс, 1990. С. 52–68.

33. *Леонтьев И.О.* Прогнозирование развития берега в масштабе столетия (на примере Вислинской (Балтийской) косы) // *Океанология*. 2012. Т. 52. № 5. С. 757–767.
34. *Муселяк С.С.* Морфолитодинамика береговой зоны бесприливного моря (на примере берегов ПНР). Автореф. дис. ... докт. географ. наук. М.: Геогр. фак. МГУ, 1988. 38 с.
35. *Орленок В.В., Кружалин В.И., Жиндарев Л.А.* Геоморфология и экология юго-восточного побережья Балтийского моря: проблемы его защиты, консервации и менеджмента // *Прибрежная зона моря: морфодинамика и геоэкология*. XXI Международная береговая конференция. Калининград: КГУ, 2004. С. 7–17.
36. *Попов Б.А., Совершаев В.А.* Принципы выбора исходных данных для расчетов потоков волновой энергии // *Береговая зона моря*. М.: Наука, 1981. С. 47–52.
37. *Рябкова О.И.* Динамика берегов Самбийского полуострова и Куршской косы в связи с проблемами берегозащиты: Дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1987. 330 с.
38. *Сергеева Л.Г.* Многолетние колебания уровня у восточного побережья Балтийского моря и их причины // *Комплексное изучение природы Атлантического океана*. Калининград, 1991. С. 91–93.
39. *Суботович В.* Фотограмметрическая оценка современного развития клифовых берегов Польши // *Изучение основных закономерностей и тенденций перемещения береговой линии Балтийского моря за последние 100 лет* / Под ред. Орвику К. Таллин, 1992. С. 34–39.
40. Схема противоползневых и берегоукрепительных сооружений на побережье Балтийского моря в пределах Калининградской области // *Природные условия и гидрометеорологический режим Калининградского побережья Балтики*. Т. 1. Кн. 1. Светлогорск: Балтберегозащита, 1999. 130 с.
41. *Цесляк А.* Движение наносов вдоль побережья Польши // *Изучение основных закономерностей и тенденций перемещения береговой линии Балтийского моря за последние 100 лет* / Под ред. Орвику К. Таллин, 1992. С. 47–54.
42. *Чечко В.А., Чубаренко Б.В., Болдырев В.Л., Бобыкина В.П., Курченко В.Ю., Домнин Д.А.* О динамике береговой зоны моря в районе оградительных молов Калининградского морского канала // *Вод. ресурсы*. Т. 35. № 6. 2008. С. 681–691.
43. *Чубаренко Б.В., Навроцкая С.Е., Стонт Ж.И., Гуцин О.А.* Изменчивость гидрометеорологических характеристик у побережья Юго-Восточной Балтики по наблюдениям за 1996–2009 гг. // *Основные концепции современного берегопользования: Монография к 90-летию заслуженного деятеля науки РФ В.И. Лымарева* / Под. ред. Карлина Л.Н., Шилина М.Б., Бровко П.Ф. Т. IV. СПб.: РГГМУ, 2012. С. 247–269.
44. *Шишов Н.Д.* О методике определения характеристик движения наносов на морях // *Развитие морских берегов в условиях колебательных движений земной коры*. Таллин: Валгус, 1966. С. 116–124.
45. Analiza procesów hydro- i litodynamicznych w rejonie planowanego przekopu przez Mierzęc Wiślana i predykcja wpływu przekopu na brzeg morski wraz z oceną intensywności zapiaszczania (zamulania) toru wodnego na odcinku od przekopu do portu w Elblągu // *Raport końcowy z realizacji projektu badawczego rozwojowego (wykonawca Leszek M. Kaczmarek i inni)*. Gdańsk: IBW PAN, 2008. 61 s.
46. *Babakov A. N.* Wind-driven currents and their impact on the morpho-lithology at the eastern shore of the Gulf of Gdansk // *Archives of Hydro-engineering and Environ. Mechanics (AHEM)*. 2010. V. 57. № 2. P. 85–104.
47. *Beniston M., Stephenson D.B., Christensen O.B., Ferro C.A.T., Frei C., Goyette S., Halsnaes K., Holt T., Jylhä K., Koffi B., Palutikof J., Schöll R., Semmler T., Woth K.* Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections // *J. Climatic Change*. 2007. V. 81. P.71–95. doi: 10.1007/s10584-006-9226-z.
48. *Bobykina V., Chubarenko B., Karmanov K.* Morphodynamics of the shores of the Vistula Spit (the Baltic Sea) in a period of 2002–2015 by results of in-situ measurements. Abstract book of the EMECS'11 Sea Coasts XXVI Joint Conf. St. Petersburg: RSHU, 2016. P. 158.
49. *Brückmann R.* Beobachtungen über Strandverschiebungen an der Küste des Samlands. III. Palmnicken // *Schrift. Phys. ökonom. Ges. Jahrgang Leipzig*; Berlin: 1913. V. LIV. S. 119–144.
50. *Chechko V.A., Sokolov A., Chubarenko B., Dikii D., Topchaya V.* Dynamics of sediments disposed in the marine coastal zone near the Vistula Lagoon inlet, south-eastern part of the Baltic Sea // *Baltica*. 2015. 28 (2). P. 189–199.
51. *Hwung H.H.* Utilization of the coastal area // *Handbook of coastal and ocean engineering* / Ed. Kim Y.C. Los Angeles (USA): World Sci., 2010. P. 953–969.
52. *Karmanov K.V., Burnashov E.M., Chubarenko B.V.* Contemporary dynamics of the sea shore of the Kaliningrad Oblast // *AHEM*. 2018. V. 65. № 2. P. 143–159.
53. *Longuet-Higgins M.S.* Longshore currents generated by obliquely incident sea waves. P. 1, 2 // *J. Geophys. Res.* 1970. V. 75. № 33. P. 6778–6801.
54. *Meier H.E.M., Broman B., Kjellstrom E.* Simulated sea level in past and future climates of the Baltic sea // *Clim. Res.* 2004. V. 27. P. 59–75.
55. *Ostrowski R., Pruszek Z., Babakov A., Chubarenko B.* Anthropogenic Effects on Coastal Sediment Fluxes in a Nontidal Gulf System. // *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.* 2012. V.138. № 6. P. 491–500.
56. *Ostrowski R., Pruszek Z., Skaja M., Szmytkiewicz M.* Variability of hydrodynamic and lithodynamic coastal processes in the east part of the gulf of Gdansk // *Archives*

- of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics (AHM). 2010. V. 57. № 2. P. 139–153.
57. *Pratje O.* Der Verbleib des Abbruchmaterials der Samlandküste // *Schr. d. phys. ökon. Ges. Königsberg*, 1932. S. 5–50.
58. *Rozynski G.* Wave climate in the Gulf of Gdańsk vs. open Baltic sea near Lubiatowo, Poland // *AHEM*. 2010. V. 57. № 2. P. 167–176.
59. *Tidemann B.* Über Wandern des Sandes und Küstenraum des Samlands. *Bauwesen*, 1930. S. 199–212.
60. *Tornquist A.* *Geologie von Ostpreussen*. Berlin, 1910. 231 s.
61. *Zaromskis R.* Impact of harbour moles and access channels on the South-East Baltic shore zone // *Geografija*. 2007. V. 43. № 1. P. 12–20.
62. *Zaromskis R.* *Baltijos jūros uostai*. Vilnius, 2008. 432 p.

## STRUCTURE OF ALONGSHORE MOBILIZATION OF SEDIMENTS, EASTERN PART OF GULF OF DANZIG

© 2019 A. N. Babakov<sup>1,\*</sup>, B. V. Chubarenko<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup> *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
Russia 236000 Kaliningrad*

\**e-mail: babakov\_temp@mail.ru*, \*\**chubrois@mail.ru*

Received: 24.03.2017

Revised version received: 29.12.2017

Accepted: 29.04.2018

Systematization of analyzed schemes of alongshore mobilization of sediments off the east coast of the Gulf of Danzig was conducted. Significant differences in the structure and localization of the countercurrent flows in convergence zones were detected. The results of near-bottom steady-state measurements of currents in the vicinity of the Baltic Canal in the depth range 6–16 m demonstrated that >6-m/s winds cause the alongshore currents to be reoriented in the direction of the alongshore wind component. The morphodynamic accumulative criterion (the filling of the re-entrant angle and abrasion in the obstacle-shadow zone) and “abrasive” criterion (the orientation of abrasion kettle holes at the ends of breakwalls) were examined. The abrasive criterion is apparently preferred over the accumulative one during transportation of sediments along segments of the coast where waves approach the coast at normal or near-normal angles. Peculiarities of the mechanism of the northward transportation of sediments, bypassing Baltiysk backwalls and changing from abrasive to accumulative criteria for different segments of the coast, are demonstrated. Two schema representing the opposite Vistula and Sambiysky alongshore flows of sediments are proposed: prior to construction of the backwalls facing Baltic Canal incoming waters with the vast area of migration at the north end of the Vistula bar, and the post-construction backwalls with the resulting narrowing of the area and displacement of its south boundary on the north side to the level of these backwalls.

**Keywords:** integral sediments flow, morphodynamic criteria, bottom currents, wind-waves regime, near-shore, measurements, Gulf of Gdansk, the Baltic Sea.

**DOI:** 10.31857/S0321-0596464370-384