

УДК 551.465

А.В. Килесо¹, А.Н. Демидов², В.А. Гриценко³**ОРОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКТОР В ФОРМИРОВАНИИ ВДОЛЬСКЛОНОВЫХ ТЕЧЕНИЙ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКЕ**

Обсуждаются вопросы влияния морфологических особенностей рельефа подводного берегового склона на формирование высокоэнергетических взвесенесущих вдольсклоновых придонных течений штормовой природы, способных осуществить транспорт взвешенных наносов из приурезовой до внешней границы береговой зоны моря. На примере рельефа подводного берегового склона Самбийского полуострова (Калининградская область, юго-восточная Балтика) с помощью методов цифровой обработки растровых изображений (фильтрация), примененных к цифровой модели рельефа, и расчета потенциальных траекторий наискорейшего спуска наносов, выделены и исследованы характеристики районов (ориентация форм рельефа, уклон дна) для которых характерны положительные и отрицательные формы рельефа с поперечной к береговой линии ориентацией. Показано, что рассмотренный орографический фактор характерен для нескольких участков подводного берегового склона Самбийского полуострова: северное побережье – Светлогорская бухта (от мыса Таран до г. Пионерский), район мыса Гвардейский до г. Зеленоградск и западное побережье – район от п. Янтарный до п. Донское. В отмеченных районах уклон дна может достигать значений в 2 градуса. Выявленные орографические особенности строения прибрежной зоны влияют на баланс наносов, способствуя выносу взвешенного вещества на большие глубины, деградации и размыву пляжей.

Ключевые слова: взвесенесущие течения, рельеф дна, подводный береговой склон, юго-восточная Балтика, штормовые условия, Самбийский полуостров

Введение. Взвесенесущие течения – один из важных механизмов переноса больших объемов взвешенных и влекомых наносов. Они являются причиной формирования крупнейших зон аккумуляции в Мировом океане [Talling et al., 2015]. Вдольсклоновые взвесенесущие течения обладают, как правило, значительным запасом кинетической энергии [Жмур и др., 2002]. На склонах всего лишь порядка 0,3 градуса они могут распространяться с большой скоростью [Piper et al., 1999] и являются типичной причиной обрыва подводных коммуникационных кабелей [Carter et al., 2009]. Измерительные приборы при этом повреждаются или переносятся на значительное расстояние, что осложняет проведение прямых натурных измерений экстремальных взвесенесущих течений [Xu et al., 2004; Puig et al., 2003; Talling et al., 2015]. В Калининградской области в последние годы на фоне некоторых изменений метеорологической обстановки [Стонт и др., 2010; Tytkowski, 2017] участились факты «исчезновения» пляжей, размыва берегов, вплоть до случая частичного разрушения основания Куршской косы. При этом формы и процессы поперечного перемещения материала песчаной размерности от уреза до внешней границы береговой зоны рассматриваются эпизодически, что, в частности, не позволяет объяснить природу возникновения значительных скоплений песка на глубинах от 30 м и более [Атлас ..., 2010].

Известно также [Айбулатов, 1990; Свиридов и др., 1997; Онищенко, Косьян, 1989; Анцыферов, 1973; Пыхов, Дачев, 1981], что в приурезовой зоне Балтийского моря во время штормов образуются течения разного рода, которые играют существенную роль в переносе взвешенных наносов от уреза к морской границе береговой зоны. На уровне фактов можно констатировать, что во время шторма в зоне волнового воздействия происходит значительное насыщение прибрежных вод взвешенным материалом. Именно в приурезовой зоне формируется основной объем насыщенных взвесью вод с плотностью существенно большей плотности вод, располагающихся мористее. Ранее в работе, основанной на модельных расчетах, была показана возможность возникновения ситуации, при которой сформировавшийся в приурезовой зоне объем взвесенесущих плотных вод способствует формированию придонного гравитационного течения [Gritsenko, Sviridov, 1999]. Данная ситуация на качественном уровне хорошо соответствует реально зафиксированным при измерениях со штормовых эстакад в Любятово [Анцыферов и др., 1978] и Камче [Пыхов и др., 1983].

Наконец, возникающие во время шторма придонные гравитационные течения обладают очень высокой эродирующей способностью [Пыхов и др., 1983; Анцыферов и др., 1978; Свиридов и др., 1997].

¹ Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта; Институт природопользования, территориального развития и градостроительства, кафедра географии океана, ст. преподаватель; *e-mail:* aleksandr.kileso@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* alik1@mail.ru

³ Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Институт природопользования, территориального развития и градостроительства, кафедра географии океана, зав. кафедрой, профессор, докт физ.-мат. н.; *e-mail:* gritsenko_vl@mail.ru

Кроме того, многочисленные исследования динамики вод в подводных каньонах, которые характеризуются более крутыми склонами, показали, что такого рода морфологические особенности рельефа дна являются основными маршрутами выноса в море значительных по величине объемов насыщенных взвешенным материалом вод во время штормов в виде придонных гравитационных течений [Леонтьев, 2008; Сафьянов и др., 2007; Hsu, 2004]. Данные факты объясняются тем, что скатывающая сила, которая определяет динамику движения придонного гравитационного течения, пропорциональна синусу угла наклона дна и разнице плотности между взмученными и окружающими водами.

Придонные гравитационные течения имеют, таким образом, большую кинетическую энергию, а, следовательно, скорость, длину распространения и эродирующую способность. Так, например, натурные исследования, нацеленные на изучение особенностей переноса взвешенного вещества в районе каньона Ил (Eel Canyon) в осенне-зимний период 1999–2000 г. [Puig et al., 2003], показали, что основными механизмами, способствующими событиям крупного переноса взвешенных наносов, являются ветроволновое воздействие и повышенная концентрация взвешенных наносов в придонном слое во время наводнений. Измерения на глубине 60 м, полученные во время сильного шторма 28 октября 1999 г., позволили зафиксировать орбитальные скорости в придонном слое и концентрации взвешенных наносов. Максимальные скорости достигали 88 см/с, а концентрации варьировались от 8 до 30 г/л. Причем максимальные концентрации фиксировались в конце шторма, когда придонные орбитальные скорости уменьшались, а средние скорости придонных течений увеличивались.

Таким образом, исследование процесса переноса взвешенных наносов в виде придонных гравитационных течений будет неполным без учета конкретных особенностей рельефа дна.

Целью данной работы является изучение рельефа подводного берегового склона Калининградской области в контексте его способности обеспечивать формирование локализованных в пространстве интенсивных взвесенесущих потоков в условиях сильных штормов.

Материалы и методы исследований. Экспериментальные наблюдения подтверждают факты значительных деформаций берега и подводного берегового склона в периоды штормового воздействия [Бабаков, 2003]. Наличие песка на глубине подтверждает возможность ухода песка в глубинную часть моря [Krek et al., 2016]. Однако на протяженных участках относительно гладкого рельефа констатируются только почти постоянные и слабые по величине компенсационные течения, возникающие из-за ветроволнового нагона вод [Шадрин, 1972], неспособные выполнить транспорт наносов к морской границе береговой зоны. Вместе с тем весь объем ранее выполненных инструментальных измерений скоростей был ориентирован на оценку средних,

квазистационарно существующих течений [Жиндарев, 1997; Бабаков, 2003]. Недостаточная подробность выполненных измерений не позволила «замечать» локализованные в пространстве струйные придонные течения. Таким образом, существующие представления о поперечной к берегу динамике вод вполне справедливы только для протяженных участков прибрежных акваторий с выровненной вдоль изобат топографией дна и пространственно-осредненных течений. Однако полученные ранее результаты не позволяют описать возникновение локализованных в пространстве придонных струйных гравитационных течений, способных осуществить перенос взвешенных наносов из приурезовой к морской границе береговой зоны.

В качестве исходных данных при исследовании рельефа использовались результаты эхолотных промеров первых трех километров от берега подводного берегового склона Калининградской области (Самбийский полуостров), полученные в результате многолетних мониторинговых работ ГБУ КО «Балтберегозащита». Имеющиеся данные были дополнены эхолотным промером полигона в районе Светлогорской бухты (северное побережье Самбийского полуострова), выполненным в рамках проекта РФФИ 17-05-41029 РГО а «Структура и циркуляция вод Балтийского моря вблизи Калининградской области». На базе этих материалов была построена цифровая модель рельефа с пространственным разрешением 30×30 м. Диапазон глубин составил от 0 до 26 м (рис. 1).

В ранее выполненной работе [Kilesio et al., 2016] первичный анализ рельефа дна позволил на качественном уровне выделить несколько участков подводного берегового склона, для которых характерно чередование положительных и отрицательных форм рельефа, имеющих ориентацию поперек береговой линии. Сочетание гряды и эффекта Кориолиса могут привести к фокусировке вдольсклонового течения у ее подножия. Канал же просто может стать проводником взвесенесущей воды от источника к морской границе береговой зоны.

Подробный анализ цифровой модели рельефа выполнялся стандартным методом цифровой обработки растровых изображений – методом фильтрации [Гонзалес, Вудс, 2005; Burrough, McDonell, 1998]. Основой данного метода является применение специального оператора к ячейкам исходного растрового изображения. В данной работе в качестве оператора использовалась квадратная матрица (фильтр) размером 3 на 3 ячейки (рис. 2А).

Идентификация характерных чередующихся положительных и отрицательных форм рельефа выполнялась с помощью расчета градиентов рельефа по направлениям вдоль и перпендикулярно к береговой линии. Расчет вдольберегового градиента (например, для участка Светлогорской бухты, район дополнительного полигона (см. рис. 1 А) в направлении с запада на восток выполнялся по формуле (1). Соответствующий ей фильтр представлен на рис. 2 Б. Расчет поперечного градиента в направлении с юга на

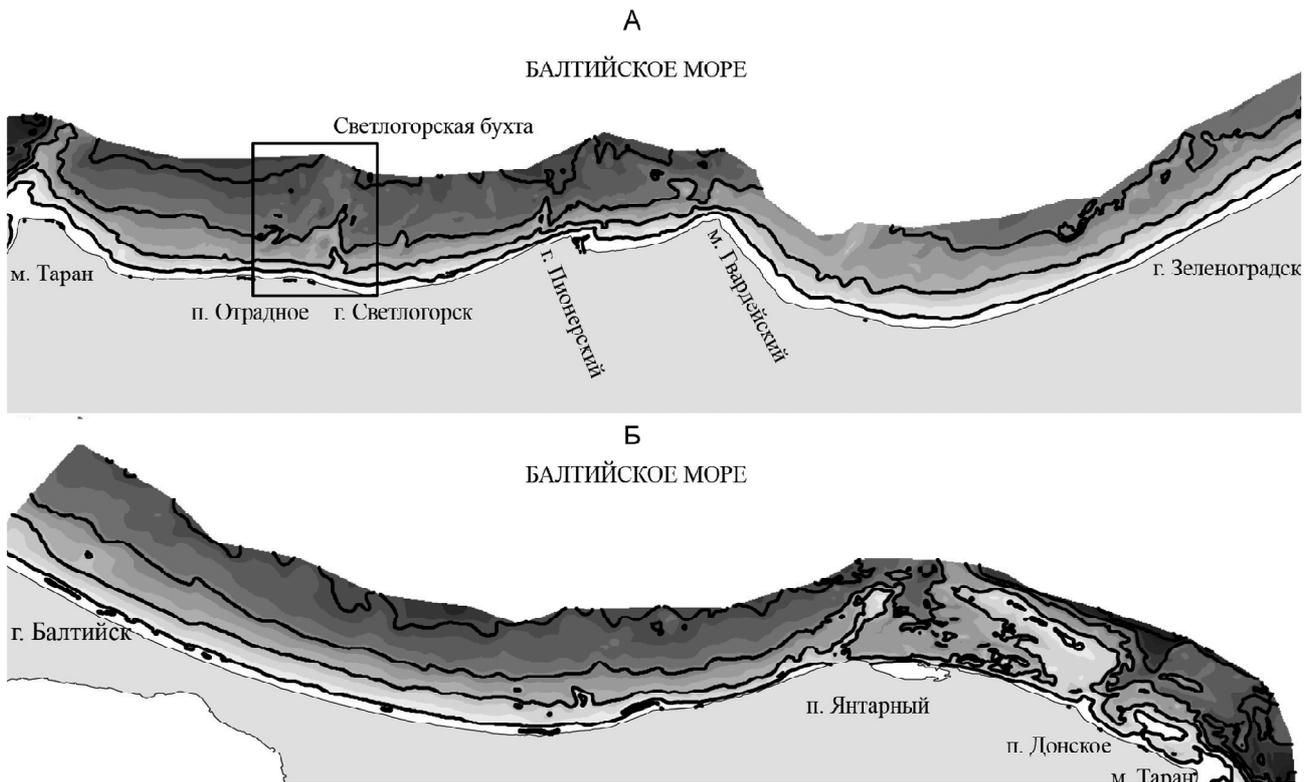


Рис. 1. Цифровая модель рельефа подводного берегового склона северного (А) и западного (Б) побережья Самбийского полуострова. Квадратом на рисунке А отмечен дополнительный полигон в Светлогорской бухте. Изобаты расположены последовательно от 5 м до 25 м с шагом 5 м

Fig. 1. Digital elevation model of the underwater coastal slope of the northern (A) and western (B) coast of the Sambian Peninsula. The square in fig. A indicates an additional polygon in the Svetlogorsk Bay. The isobaths are drawn sequentially from 5 m to 25 m in 5 m increments

север рассчитывался по формуле (2), вид соответствующего фильтра изображен на рис. 2 В.

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{(c + 2f + i) - (a + 2d + q)}{8 \times \text{размер ячейки}}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{(a + 2b + c) - (q + 2h + i)}{8 \times \text{размер ячейки}}, \quad (2)$$

где c, f, i, a, d, g, b, h соответствующие значения глубин в ячейках раstra цифровой модели рельефа.

Результаты исследований и их обсуждение.

Анализ полученных данных показал значительную пространственную неоднородность всего прибрежного донного рельефа. Однако на общем фоне побережья Калининградской области отчетливо выделяются районы с характерными морфологическими особенностями. На северном побережье Самбийского полуострова – Светлогорская бухта (от мыса Таран до г. Пионерский) (рис. 3 А), район мыса Гвардейский до г. Зеленоградск (рис. 3 Б). На западном побережье такие особенности отмечены на участке от п. Янтарный до п. Донское (рис. 3 В). В данных районах на картах с рассчитанными значениями вдольберегового градиента рельефа отчетливо прослеживаются его положительные и отрицательные формы с поперечной к береговой линии ориентацией.

В районе Светлогорской бухты, имеющей особую рекреационную ценность для Калининградской области, можно выделить несколько потенциальных путей смыва пляжевого материала с берега на глубину (см. рис. 3 А). Район мыса Таран характеризуется положительной формой рельефа, имеющей поперечное берегу направление. Подножье с восточной стороны этого возвышения имеет уклон в сторону моря, который варьирует от 0,4 до 1°.

А			Б			В		
a	b	c	-1	0	1	1	2	1
d	e	f	-2	0	2	0	0	0
g	h	i	-1	0	1	-1	-2	-1

Рис. 2. Специальный оператор для цифровой обработки растровых изображений методом фильтрации: А – общий вид оператора (фильтра); значения весов ячеек фильтра при расчете: Б – вдольберегового градиента в направлении с запада на восток; В – поперечного градиента с юга на север

Fig. 2. Special operator for digital processing of raster images using the filtering method (A). The weights of filter cells for calculation: the along-coast gradient from west to east (Б) and the transverse gradient from south to north (В)

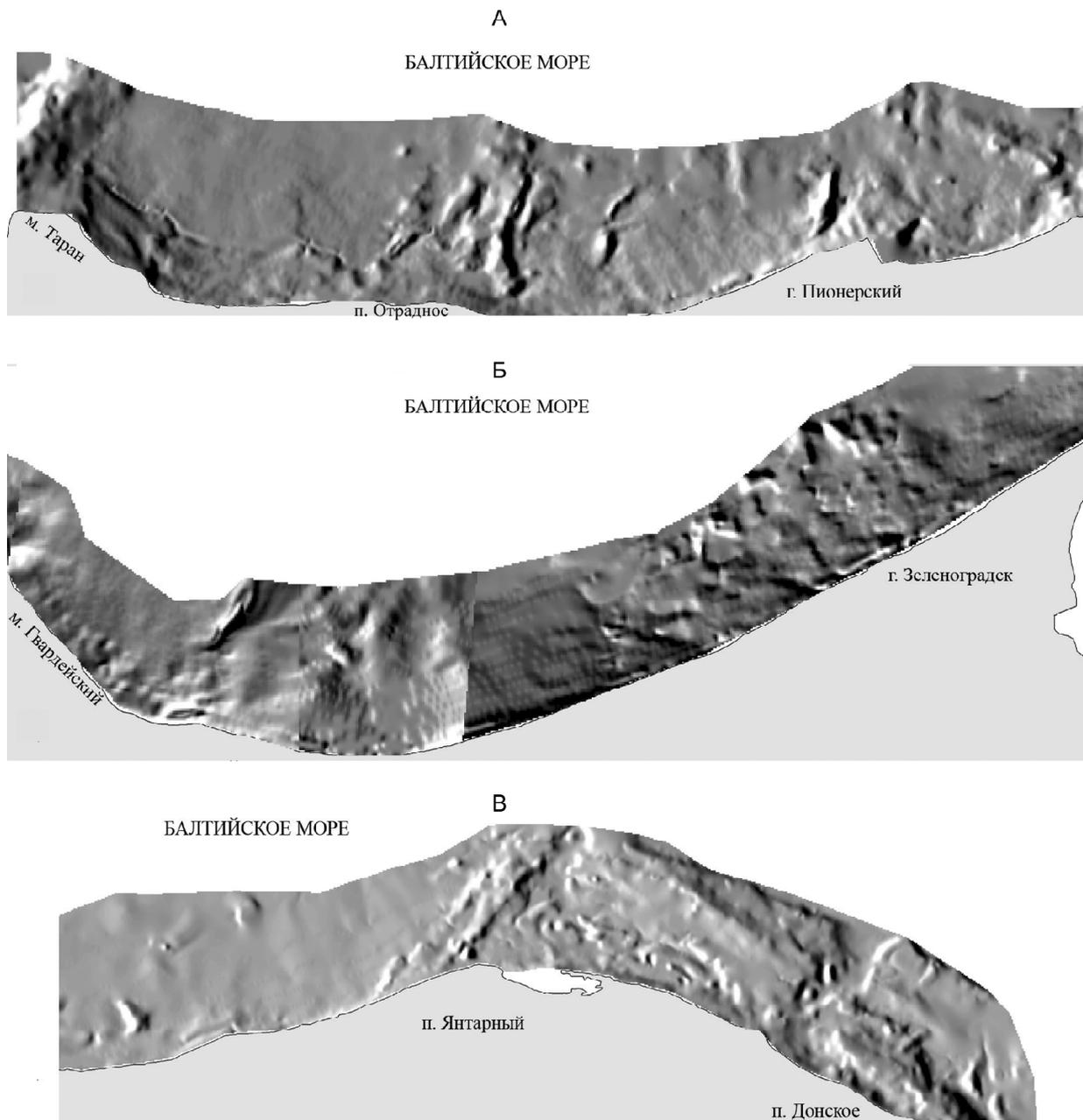


Рис. 3. Значения вдольберегового градиента рельефа подводного берегового склона для Светлогорской бухты (от мыса Таран до г. Пионерский) (А), района мыса Гвардейский до г. Зеленоградск (Б) и района от п. Янтарный до п. Донское (В). Белый цвет соответствует положительным значениям градиента, черный – отрицательным, а серый – близким к нулю значениям

Fig. 3. Values of the alongshore gradient of the underwater coastal slope relief for the Svetlogorsk Bay (from the Cape Taran to Pionersky town) (A); the area from the Gvardeysky Cape to Zelenogradsk town (B); and the area from Yantarny settlement to Donskoe settlement (B). White color is for positive gradient values, black color for negative ones, and gray color for close to zero values

В районе п. Отраднос наблюдается чередование положительных и отрицательных форм рельефа, имеющих сложную геометрию, и среднее значение уклона дна достигает $0,9^\circ$. Показательной является форма рельефа в районе г. Пионерский. Последовательное чередование положительной и отрицательной форм формирует канал. Его длина составляет примерно 2 км, ширина 300–400 м, уклон дна от $0,3$ до $0,9^\circ$. На западном склоне этого канала уклон увеличивается до 2° . Как было показано в [Hsu, 2004], для образования самоподдерживающегося

взвесенесущего гравитационного потока достаточно уклона дна $0,5^\circ$. Уклон примерно около 3° [Жмур и др., 2002] может приводить к возникновению катастрофических придонных взвесенесущих течений.

Для проверки гипотезы [Kilesio et al., 2016] о том, что данные формы рельефа могут способствовать смыву больших объемов наносов в виде локализованных в пространстве интенсивных взвесенесущих гравитационных течений в условиях сильных штормов, для выделенных участков был выполнен расчет траекторий наискорейшего спуска для исполь-

зуемой цифровой модели рельефа [Jenson, Domingue, 1988]. Такой подход позволяет оценить наиболее вероятные траектории движения придонных течений. Рассчитанные траектории (рис. 4) для района Светлогорской бухты хорошо коррелируют с выделенными формами рельефа. Так, в районе м. Таран и п. Отрадное они прижимаются к восточной стороне обнаруженной положительной формы рельефа. Одна траектория проходит вдоль канала в районе г. Пионерский.

Аналогичный анализ выполнен и для других ранее выделенных участков. Только для одной формы рельефа на западной стороне Самбийского полуострова в районе п. Янтарный наблюдается разрыв полученной траектории в ее средней части, что связано с локальным повышением рельефа дна. Заметим, что именно в окрестности п. Янтарный ширина пляжа достигает максимальных значений.

Выводы:

– выполненный подробный анализ рельефа прибрежной 3 км зоны подводного берегового склона

позволил выделить участки с морфологическими образованиями, имеющими поперечное к берегу направление. На северном побережье Самбийского полуострова – это Светлогорская бухта (от мыса Таран до г. Пионерский), район мыса Гвардейский до г. Зеленоградск. На западном побережье выраженные формы рельефа отмечены на участке берегового склона от п. Янтарный до п. Донское;

– расчет траекторий наискорейшего спуска наносов для данных участков показал, что в совокупности с большими объемами взвешенного вещества в штормовых условиях в прибрежной зоне эти формы рельефа способны обеспечивать формирование локализованных в пространстве интенсивных взвешенных потоков. Выявленные орографические особенности строения прибрежной зоны влияют на баланс наносов, способствуя выносу взвешенного вещества на большие глубины, деградации и размыву пляжей. Их необходимо учитывать при оценке транспорта взвешенного материала и динамики берегов.



Рис. 4. Траектории наискорейшего спуска наносов для используемой цифровой модели рельефа в выделенных морфологических особенностях для района Светлогорской бухты

Fig. 4. Potential steepest trajectories of beach sediment descend for the digital elevation model used under the identified morphological features within the Svetlogorsk Bay area

Благодарности. Исследование выполнено в рамках гранта РГО-РФФИ (проект № 17-05-41029 РГО_а). Авторы благодарят ГБУ КО «Балтберегозащита» за данные эхолотных промеров прибрежного рельефа дна Самбийского полуострова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Айбулатов Н.А. Динамика твердого вещества в шельфовой зоне. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 271 с.
 Анцыферов С.М. О распространении концентраций и размеров твердых частиц в открытом потоке. Сб. Динамика и термодинамика рек / ИВПАН СССР; под ред. С.М. Анцыферова, В.К. Дебольского. М.: Стройиздат, 1973. С. 310–317.
 Анцыферов С.М., Басиньски Т., Косьян Р.Д., Пыхов Н.В., Пустельников О.С. Распределение взвешенных наносов над профилем берегового склона в районе Любятово: Сб. Результаты международного эксперимента ЛЮБЯТОВО–76 / Труды Института водного строительства Польской Академии Наук. Гданьск, 1978. № 5. С. 211–227.

Атлас геологических и эколого-геологических карт Российской Федерации Балтийского моря / Гл. ред. О.В. Петров. СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. 78 с.
 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.
 Гонзалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
 Жндарев Л.А. Морфологическая динамика расчлененных отмелей побережий бесприливных морей: автореф. дис. ... докт. геогр. наук: 11.00.04. М., 1997. 254 с.

Жмур В.В., Сапов Д.А., Нечаев И.Д., Рыжаков М.В., Григорьева Ю.В. Интенсивные гравитационные течения в придонном слое океана // Известия РАН. Серия физическая. 2002. Т. 66. № 12. С. 1721–1726.

Леонтьев И.О. Оценка поперечного потока наносов на границе прибрежной зоны // Океанология. 2008. Т. 48. № 1. С. 132–138.

Онищенко Э.Л., Косьян Р.Д. О применении оптического метода определения концентрации взвешенных наносов в природных водоемах // Водные ресурсы. 1989. Вып. 3. С. 94–101.

Пыхов Н.В., Дачев В.Ж. О возможности расчета концентрации взвешенных наносов в береговой зоне во время шторма: сб. Литодинамика и гидродинамика контактной зоны океана. М.: Наука, 1981. С. 92–109.

Пыхов Н.В., Дачев В.Ж., Косьян Р.Д., Николов Х.И. Исследование поля средней за шторм концентрации взвешенного обломочного материала и его состава в береговой зоне моря В кн.: Взаимодействие атмосферы, гидросферы и литосферы в прибрежной зоне моря. Результаты международного эксперимента «Камчия 79» / София: Изд-во Болг. АН, 1983. С. 238–251.

Сафьянов Г., Менишков В.Л., Пешков В. Подводные каньоны – их динамика и взаимодействие с береговой зоной океана. Краснодар: Эдарт-принт, 2007. 392 с.

Свиридов Н.И., Сивков В.В., Руденко М.В., Тримонис Э.С. Геологические следы придонных течений в Готландской впадине Балтийского моря // Океанология. 1997. Т. 37. № 6. С. 928–935.

Стонт Ж.И., Чубаренко Б.В., Гуцин О.А. Изменчивость гидрометеорологических характеристик для побережья Юго-Восточной Балтики // Известия РГО. 2010. Т. 142. Вып. 4. С. 48–56.

Шадрин И.Ф. Течения береговой зоны бесприливного моря. М.: Наука, 1972. 128 с.

Burrough P.A., McDonnell R.A. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, New York, 1998, 190 p.

Carter L., Burnett D., Drew S., Hagadorn L., Marl G., Bartlett-McNeil D., Irvine N. Submarine Cables and the Oceans-connecting the world. UNEP-WCMC Biodiversity Series 31, ICPC/UNEP/UNEP-WCMC, 2009, 64 p.

Gritsenko V., Sviridov N. Role of storms in formation of turbulent sea currents in the near-shore zone. *Baltica. Special Publication 12*, 1999, p. 28–31.

Hsu K.J. Physics of Sedimentology. Springer, 2004, 240 p.

Jenson S.K., Domingue J.O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988, 54 (11), p. 1593–1600.

Kileso A.V., Isachenko I.A., Gritsenko V.A., Burnashov E.M., Chernyshkov P.P. Orographic risks of bottom topography and sustainability of the sea coasts of the Kaliningrad region, Russia. *Journal of Environmental Hydrology*, 2016, vol. 25, 2 p.

Krek A., Stont Zh., Ulyanova M. Alongshore bed load transport in the southeastern part of the Baltic Sea under changing hydrometeorological conditions: Recent decadal data. *Regional Studies in Marine Science*, 2016, p. 81–87.

Piper D.J.W., Cochonat P., Morrison M. The sequence of events around the epicenter of the 1929 Grand Banks earthquake: initiation of debris flows and turbidity currents inferred from sidescan sonar. *Sedimentology*, 1999, vol. 46, p. 79–97.

Puig P., Ogston A.S., Mullenbach B.L., Nittrouer C.A., Sternberg R.W. Shelf-to-Canyon sediment-transport processes on the Eel Continental Margin (Northern California). *Marine Geology*, 2003, vol. 193, p. 129–149.

Talling P., Allin J., Armitage D., Arnott R., Cartigny M., Clare M., Felletti F., Covault J., Girardclos S., Ernst H., Hill P., Hiscott R., Hogg A., Hughes Clarke J., Jobe Z., Malgesini G., Mozzato A., Naruse H., Parkinson S., Peel F., Piper D., Pope E., Postma G., Rowley P.J., Sguazzini A., Stevenson C., Sumner E., Sylvester Z., Watts C., Xu J. Key future directions for research on turbidity currents and their deposits. *Journal of Sedimentary Research*, 2015, vol. 85, no. 2, p. 153–169.

Tylkowski J. The temporal and spatial variability of coastal dune erosion in the Polish Baltic coastal zone. *Baltica*, 2017, vol. 30(2), p. 97–106.

Xu J.P., Noble M.A., Rosenfeld L.K. In-situ measurements of velocity structure within turbidity currents. *Geophysical Research Letters*, 2004, vol. 31, no. L09311.

Поступила в редакцию 17.12.2018

После доработки 25.11.2019

Принята к публикации 20.12.2019

A. V. Kileso¹, A. N. Demidov²,
V. A. Gritsenko³

OROGRAPHIC FACTOR IN THE GENERATION OF ALONGSLOPE CURRENTS IN THE SOUTH-EASTERN PART OF THE BALTIC SEA

Influence of morphological features of the underwater coastal slope relief on the generation of storm-induced high-energy bottom gravity currents is discussed. Such currents are capable of transporting beach sediments from the swash zone to the outer boundary of the coastal zone. Characteristic features of the regions (orientation of relief forms, gradients of the underwater coastal slope etc.) with positive and negative forms of relief oriented across the coast were identified and investigated by example of the underwater coastal slope of the Sambian Peninsula (Kaliningrad Oblast, south-eastern part of the Baltic Sea). Raster image processing methods were applied to the digital elevation model, and potential steepest

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University; Institute of Environmental Management, Urban Development and Spatial Planning, Department of Geography of the Ocean, Senior Lecturer; e-mail: aleksandr.kileso@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology, Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: alik1@mail.ru

³ Immanuel Kant Baltic Federal University, Institute of Environmental Management, Urban Development and Spatial Planning, Department of Geography of the Ocean, Head of department, Professor, D.Sc. in Physics and Mathematics; e-mail: gritsenko_vl@mail.ru

descend trajectories of beach sediments were calculated. It is shown that the orographic factor is characteristic of several areas of the underwater coastal slope of the Sambian Peninsula, namely the Svetlogorsk Bay (from the Cape Taran to Pionersky) and the area from the Cape Gvardeisky to Zelenogradsk town at the northern coast, and the area from Yantarny settlement to Donskoe settlement at the western coast. In these areas the slope of the bottom can reach 2° value. These morphological peculiarities of the coastal zone affect the sediment balance, contributing to the transport of suspended matter to greater depths, and causing the degradation and erosion of beaches.

Key words: suspended-load transport, bottom relief, underwater coastal slope, south-eastern part of the Baltic Sea, storm conditions, the Sambian Peninsula

Acknowledgements. The research was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Russian Geographical Society (project № 17-05-41029 RGO_a). The authors thank the State Organization of the Kaliningrad Oblast «Baltberegozashchita» for the data of echo sounder measurements of the coastal bottom relief of the Sambian Peninsula.

REFERENCES

- Ajbulatov N.A.* Dinamika tverdogo veshhestva v shel'fovoj zone [Dynamics of solid material in the shelf zone]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990, 271 p. (In Russian)
- Ancyferov S.M.* O rasprostranenii koncentracij i razmerov tverdyh chastic v otkrytom potoke [On the distribution of concentrations and dimension of solids in the open stream]. *Dinamika i termika rek.* Eds. S.M. Ancyferov, V.K. Debol'skij, Moscow, Strojizdat Publ., 1973. p. 310–317. (In Russian)
- Ancyferov S.M., Basin'ski T., Kos'jan R.D., Pyhov N.V., Pustel'nikov O.S.* Raspreделение vzveshennyh nanosov nad profilom beregovogo sklona v rajone Lyubyatovo [Distribution of suspended sediment over the coastal slope profile in the Lyubyatovo area]. *Rezul'taty mezhdunarodnogo eksperimenta LJUBJATOVO–76* Proceedings of the Institute of Water Construction of the Polish Academy of Sciences, Gdan'sk, 1978, no. 5, p. 211–227. (In Russian)
- Atlas geologicheskikh i ekologo-geologicheskikh kart Rossijskogo sektora Baltijskogo morya [Atlas of geological and environmental geological maps of the Russian Baltic Sea zone] Ed. O.V. Petrov, St. Petersburg, VSEGEI [Russian Research Geological Institute named after A.P. Karpinsky], 2010, 78 p. (In Russian)
- Babakov A.N.* Prostranstvenno-vremennaya struktura techenij i migracij nanosov v beregovoj zone jugo-vostochnoj Baltiki (Sambijskij p-ov i Kurshskaya kosa) [Spatio-temporal structure of currents and migration of sediment flows in the coastal zone of southeastern Baltic (the Sambian Peninsula and the Curonian Spit)]: PhD Thesis in Geogr., Kaliningrad, Kaliningrad State University Publ., 2003, 273 p. (In Russian)
- Burrough P.A., McDonell R.A.* Principles of Geographical Information Systems. New York, Oxford University Press, 1998, 190 p.
- Carter L., Burnett D., Drew S., Hagadorn L., Marle G., Bartlett-McNeil D., Irvine N.* Submarine Cables and the Oceans-connecting the world. UNEP-WCMC Biodiversity Series 31. ICPC/UNEP/UNEP-WCMC, 2009, 64 p.
- Gonzales R., Vuds R.* Cifrovaja obrabotka izobrazhenij [Digital image processing]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2005, 1072 p. (In Russian)
- Gritsenko V., Sviridov N.* Role of storms in formation of turbulent sea currents in the near-shore zone. *Baltica. Special Publication 12*, p. 28–31.
- Hsu K.J.* Physics of Sedimentology. Springer, 2004, 240 p.
- Jenson S.K., Domingue J.O.* Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988, 54 (11), p. 1593–1600.
- Kileso A.V., Isachenko I.A., Gritsenko V.A., Burnashov E.M., Chernyshkov P.P.* Orographic risks of bottom topography and sustainability of the sea coasts of the Kaliningrad region, Russia. *Journal of Environmental Hydrology*, 2016, vol. 25, p. 2.
- Krek A., Stont Zh., Ulyanova M.* Alongshore bed load transport in the southeastern part of the Baltic Sea under changing hydrometeorological conditions: Recent decadal data. *Regional Studies in Marine Science*, 2016, p. 81–87.
- Leont'ev I.O.* Ocenka poperechnogo potoka nanosov na granice pribrezhnoj zony [Evaluation of cross-border flow of sediment to the coastal zone]. *Okeanologiya*, 2008, vol. 48, no. 1, p. 132–138. (In Russian)
- Onishhenko Je.L., Kos'jan R.D.* O primenenii opticheskogo metoda opredeleniya koncentracij vzveshennyh nanosov v prirodnyh vodoemah [On the application of the optical method for determining the concentration of suspended sediment in natural water bodies]. *Vodnye resursy*, 1989, Issue 3, p. 94–101. (In Russian)
- Piper D.J.W., Cochonat P., Morrison M.* The sequence of events around the epicenter of the 1929 Grand Banks earthquake: initiation of debris flows and turbidity currents inferred from sidescan sonar. *Sedimentology*, 1999, vol. 46, p. 79–97.
- Puig P., Ogston A.S., Mullenbach B.L., Nittrouer C.A., Sternberg R.W.* Shelf-to-Canyon sediment-transport processes on the Eel Continental Margin (Northern California). *Marine Geology*, 2003, vol. 193, p. 129–149.
- Pyhov N.V., Dachev V.Zh.* O vozmozhnosti rascheta koncentracij vzveshennyh nanosov v beregovoj zone vo vremya shtorma [About the possibility of calculating the concentration of suspended sediment in the coastal zone during a storm]. *Litodinamika i gidrodinamika kontaktnoj zony okeana.* Moscow, Nauka Publ., 1981, p. 92–109. (In Russian)
- Pyhov N.V., Dachev V.Zh., Kos'jan R.D., Nikolov H.I.* Issledovanie polya srednej za shtorm koncentracij vzveshennogo oblomochnogo materiala i ego sostava v beregovoj zone morya [Investigation of the storm-mean field of suspended clastic material concentration and its composition in the coastal zone of the sea] *The interaction of the atmosphere, hydrosphere and lithosphere in the coastal zone of the sea. The results of the international experiment «Kamchia 79».* Sofija, Publishing House Bolg. AN, 1980, p. 238–251. (In Russian)
- Saf'janov G., Menshikov B.L., Peshkov V.* Podvodnye kan'onny – ih dinamika i vzaimodejstvie s beregovoj zonoj okeana. [Underwater canyons, their dynamics and interaction with the coastal zone of the ocean]. Krasnodar, Edart-print Publ., 2007, 392 p. (In Russian)
- Shadrin I.F.* Techeniya beregovoj zony besprilivnogo morya [Currents of the coastal zone of non-tidal sea]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 128 p. (In Russian)

Stont Zh.I., Chubarenko B.V., Gushhin O.A. Izmenchivost' gidrometeorologicheskikh harakteristik dlya poberezh'ya Yugo-Vostochnoi Baltiki [Variability of hydrometeorological characteristics for the coastal zone of the South-Eastern Baltic Sea] // Izvestija RGO [News of the Russian Geographical Society], 2010, vol. 142, Issue 4, p. 48–56. (In Russian)

Sviridov N.I., Sivkov V.V., Rudenko M.V., Trimonis Je.S. Geologicheskie sledy pridonnyh techenij v Gotlandskoj vpadine Baltijskogo morya [Geological traces of bottom currents in the Gotland depression of the Baltic Sea]. *Okeanologiya*, 1997, vol. 37, no. 6, p. 928–935. (In Russian)

Talling P., Allin J., Armitage D., Arnott R., Cartigny M., Clare M., Felletti F., Covault J., Girardclos S., Ernst H., Hill P., Hiscott R., Hogg A., Hughes Clarke J., Jobe Z., Malgesini G., Mozzato A., Naruse H., Parkinson S., Peel F., Piper D., Pope E., Postma G., Rowley P.J., Sguazzini A., Stevenson C., Sumner E., Sylvester Z., Watts C., Xu J. Key future directions for research on

turbidity currents and their deposits. *Journal of Sedimentary Research*, 2015, vol. 85, no. 2, p. 153–169.

Tylkowski J. The temporal and spatial variability of coastal dune erosion in the Polish Baltic coastal zone. *Baltica*, 2017, vol. 30(2), p. 97–106.

Xu J.P., Noble M.A., Rosenfeld L.K. In-situ measurements of velocity structure within turbidity currents. *Geophysical Research Letters*, 2004, vol. 31, no. L09311.

Zhindarev L.A. Morfolitodinamika raschlenennyh otmelyh poberezhij besprilivnyh morej [Morpholithological dynamics of dissected shallow coasts of non-tidal seas]: Extended Doctoral (Geogr.) Thesis: 11.00.04, Moscow, 1997. (In Russian)

Zhmur V.V., Sapov D.A., Nechaev I.D., Ryzhakov M.V., Grigor'eva Ju.V. Intensivnye gravitacionnye techeniya v pridonnom sloe okeana [Intensive gravitational currents in the bottom layer of the ocean]. *Izvestija RAN, Serija fizicheskaja* [Proceedings of the Academy of Sciences, Physical Series], 2002, vol. 66, no. 12, p. 1721–1726. (In Russian)

Received 17.12.2018

Revised 25.11.2019

Accepted 20.12.2019