

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СКЛОНА ДНА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КРОСС-СКЛОНОВЫЙ ВЫНОС ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В ШТОРМОВЫХ УСЛОВИЯХ У БЕРЕГОВ КАЛИНИНГРАДСКОГО ПОЛУОСТРОВА

А. В. Килесо^{1,2*} , В. А. Гриценко¹ 

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, Россия

* Контакт: Александр Владимирович Килесо, aleksandr.kileso@gmail.com

Приводится описание необходимых условий для возникновения кросс-склонового выноса песка за внешнюю границу прибрежной зоны Калининградского полуострова в юго-восточной части Балтийского моря. Анализ мелкомасштабных градиентных характеристик поверхности подводного берегового склона у отмелых песчаных берегов позволил получить качественные и количественные оценки величин горизонтальных градиентов поверхности склона дна, кривизны и траектории наискорейшего спуска. Были выделены участки подводного берегового склона дна с морфологическими особенностями в виде эрозионных ложбин и каналов с кросс-склоновой ориентацией, создающих благоприятные условия для транспорта взвеси в условиях сильных штормов в виде вдольсклоновых супензионных течений. На основе предложенного в работе критерия выполнена классификация береговой зоны моря у Калининградского полуострова по степени возможного негативного влияния морфологических особенностей склона дна в контексте абразии берега в штормовых условиях.

Ключевые слова: подводный береговой склон, штормовые условия, абразия берегового склона, взвесенесущие течения, транспорт песка в сторону моря, градиентные показатели, Калининградский полуостров.

Цитирование: Килесо А. В. и Гриценко В. А. Морфологические особенности склона дна и их влияние на кросс-склоновый вынос взвешенного вещества в штормовых условиях у берегов Калининградского полуострова // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Т. 25. — ES5018. — DOI: 10.2205/2025es001060 — EDN: QVSGKI

Введение

Известно [Айбулатов, 1990; Жиндарев и др., 1998; Косьян и Пыхов, 1991], что литодинамические процессы, приводящие к изменению поверхности подводного берегового склона и самих отмелых песчаных берегов Юго-Восточной Балтики, определяются насыщением прибрежных вод взвесью в прибойной зоне и их последующим движением по поверхности дна. Многочисленные примеры абразии подводного склона и берега после прохождения штормов подтверждают интенсификацию данных процессов [Бобыкина и Стонт, 2015; Пыхов, 1976; Юркевич, 1976; Labuz, 2014]. Экспериментально установленное наличие песка за пределами зоны ветро-волнового воздействия на склоны дна у берегов Калининградского полуострова [Krek et al., 2016; Ryabchuk et al., 2020] свидетельствует о возможности транспорта взвесенесущих вод за границу прибрежной зоны моря. Следы подобного движения песка в сторону моря были обнаружены на поверхности подводного склона у берегов Калининградского полуострова между г. Зеленоградск и п. Лесной [Zhamoida et al., 2009]. При этом инструментально зафиксировано наличие на дне ряда морфологических особенностей в виде протяжённых ложбин с кросс-склоновой ориентацией. В то же время на протяжённых участках западного побережья

<https://elibrary.ru/QVSGKI>

Получено: 21 февраля 2025 г.

Принято: 8 сентября 2025 г.

Опубликовано: 25 октября 2025 г.



© 2025. Коллектив авторов.

Калининградского полуострова, где поверхность подводного склона относительно гладкая, штормовое воздействие не нарушает стабильности подводного берегового склона и берега [Рябчук и др., 2015]. Все это позволяет предположить наличие зависимости между негладкостью, в дифференциально-геометрическом смысле, поверхности склона дна и стабильным существованием как самого подводного берегового склона дна, так и всей прибрежной зоны.

Мелкомасштабные относительно размеров всего подводного берегового склона морфологические особенности поверхности дна, такие как отрицательные формы рельефа в виде эрозионных ложбин с протяжённостью в первые километры и шириной в первые десятки метров, с устойчивым положением и формой, были обнаружены на мелководье Финского залива Балтийского моря [Леонтьев и др., 2011]. Признаки кросс-склонового движения взвесенесущих вод были выявлены по сочетанию факторов крупности осадочного материала и ориентации следов ряби на поверхности дна.

Известно также [Жмур и др., 2002; Bagnold, 1962; Hsü, 2004], что степень уклона дна является одним из ключевых факторов, определяющих интенсивность движения взвесенесущих вод в прибрежной зоне моря. Уже при угле наклона дна в $0,5^\circ$ взвесенесущий поток может распространяться на значительные расстояния, а при уклоне в 3° возможно возникновение экстремальных придонных течений. Установлено также [Леонтьев, 2008; Hsü, 2004], что подводные каньоны, существующие в прибойной зоне, в штормовых условиях способствуют интенсивному выносу взвешенного материала из прибрежной зоны в сторону моря.

Целью работы стала демонстрация существования возможности возникновения короткоживущего кросс-склонового механизма переноса взвешенного материала за пределы прибрежной зоны моря в условиях сочетания горизонтальной неоднородности поверхности склона дна и сильного шторма.

Материалы и методы

Как известно [Атлас..., 2010; Леонтьев, 2018; Baltic Sea..., 2013; EMODnet Bathymetry Consortium, 2020; Seifert et al., 2001], общедоступные данные о рельефе дна Балтики обладают пространственным разрешением не менее 1 км для соответствующих карт донной топографии дна юго-восточной части Балтийского моря. Уточнённая батиметрическая карта российского сектора юго-восточной части Балтийского моря [Dorokhov et al., 2019] имеет масштаб 1:500 000 и также недостаточно подробна для решения поставленной в работе задачи. Для анализа мелкомасштабных особенностей поверхности дна использовались данные эхолотных промеров береговой зоны Калининградского полуострова, полученные в ходе многолетних экспедиционных работ института океанологии им. П. П. Ширшова РАН и ГБУ КО «Балтберегозащита». Построение цифровой модели рельефа (далее ЦМР) склона дна выполнено с помощью инструмента Topo-to-Raster программного продукта ERSI ArcGis [ESRI ArcGIS..., 2011], предназначенного для интерполяции растровых поверхностей из точечных, линейных и полигональных данных, учитывающих топографические особенности. Используется алгоритм, основанный на методе конечных разностей, который учитывает направление потоков (алгоритм проверяет, что вода течёт от высоких точек к низким) и устраняет локальные минимумы (ложные впадины), что позволяет создать гидрологически корректную поверхность. С использованием всех возможностей ERSI ArcGis была построена ЦМР с разрешением 30 м, охватывающая глубины до 30 м [Килемо и др., 2020].

Дальнейшая работа с построенной ЦМР заключалась в оценке пространственной неоднородности основных дифференциально-геометрических характеристик поверхности склона дна. В частности, были выполнены расчёты вдольбереговых и поперечных к берегу градиентов глубин, значений уклона дна, кривизны поверхности склона дна, а также траектории наискорейшего спуска [Jenson and Domingue, 1988].

Траектории наискорейшего спуска рассматривались, как пути возможного перемещения воды по ЦМР от берега до локальных минимумов или выходных границ. Расчёты

траекторий наискорейшего спуска выполнены с помощью инструментов FlowDirection (направление потока) и FlowAccumulation (накопление потока) [ESRI ArcGIS..., 2011]. Первый инструмент FlowDirection определяет путь стока воды для каждой ячейки ЦМР по принципу наибольшего уклона, присваивая значения от 1 до 128, соответствующие одному из восьми возможных направлений (метод D8), где 1 – восток, 2 – юго-восток, 4 – юг и так далее по часовой стрелке. Второй инструмент FlowAccumulation рассчитывает на основе растра направлений стока для каждой ячейки суммарное количество вышележащих ячеек, стекающих в неё, формируя карту накопленного потока. Процесс выполняется итеративно: система последовательно обрабатывает ячейки в порядке их топологического расположения (от водоразделов к устьям), добавляя к значению текущей ячейки накопленный поток всех ячеек, которые в неё стекают. В результате получается растр, где значение каждой ячейки отражает площадь водосбора в ячейках.

Полученные траектории наискорейшего спуска интерпретируются в дальнейшем как пути потенциального движения взвесенесущих вод от берега за пределы прибрежной зоны моря. Расчёт градиентов поверхности склона дна реализован на девятиточечном шаблоне с использованием симметричных конечных разностей и двухэтапным осреднением, расчёт кривизны базируется на разностной схеме аппроксимации вторых производных [Moore et al., 1991].

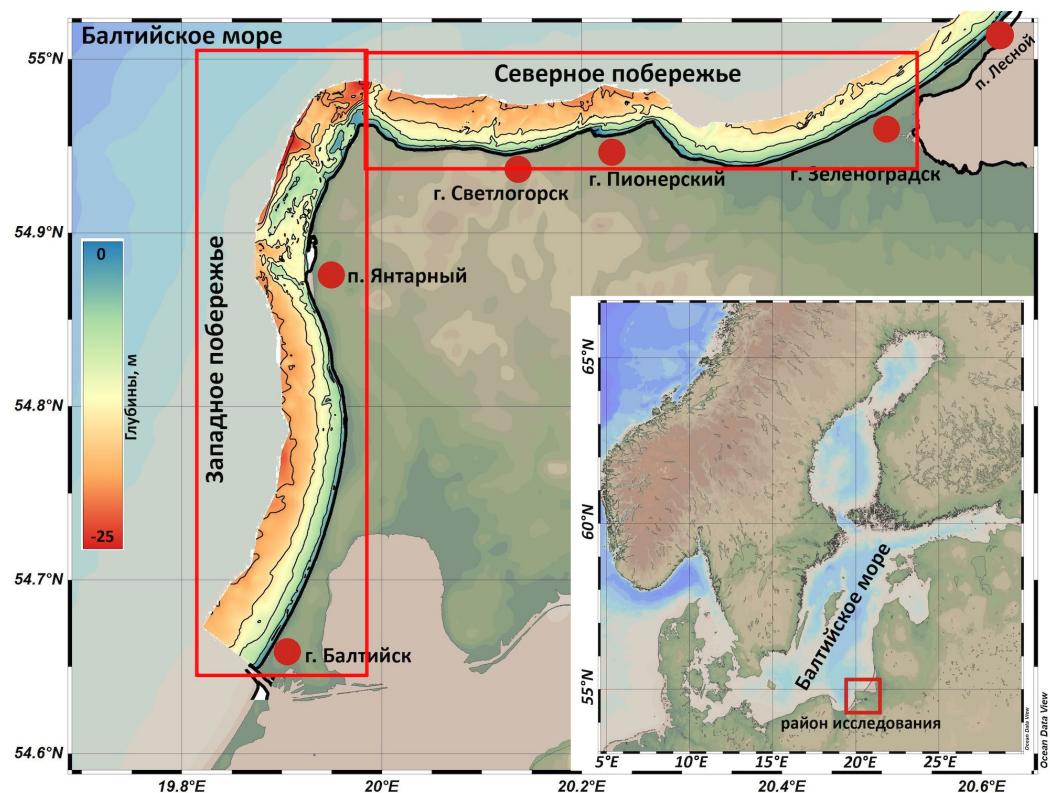


Рис. 1. Общая схема очертания берегов Калининградского полуострова и ЦМР подводного берегового склона Калининградского полуострова. Изобаты проведены с шагом 5 м. Красными прямоугольниками выделены участки северного и западного побережья Калининградского полуострова. Основа для карты взята из программного продукта «Ocean Data View» [Schlitzer, 2018].

Анализ геометрии поверхности подводного берегового склона

Ранее выполненный анализ геометрии поверхности склона дна [Килемо и др., 2020] показал, что на протяжении всей береговой зоны Калининградского полуострова существует несколько участков с наличием протяжённых морфологических особенностей с горизонтально расчленённой топографией дна, в виде эрозионных ложбин и гряд,

имеющих кросс-склоновую ориентацию. Детальная оценка пространственной неоднородности основных дифференциально-геометрических характеристик поверхности склона дна с использованием построенной в работе ЦМР для рассматриваемого района юго-восточной части Балтики показала наличие зон с относительно гладким рельефом (с близкими к нулю горизонтальными производными ЦМР вдоль и поперёк береговой линии) и участков с выраженным положительными и отрицательными формами поверхности дна в виде протяжённых эрозионных ложбин и гряд.

На северном побережье Калининградского полуострова (рис. 2) было обнаружено пять участков ПБС с характерными неоднородностями на дне. На рис. 2 данные участки выделены прямоугольниками и пронумерованы римскими цифрами. Участок I располагается в районе Светлогорской бухты от п. Отрадное до г. Светлогорск. Расчёт вдольберегового градиента (рис. 2в) для данного района позволил выделить чередование участков с отрицательными значениями градиента, соответствующих уменьшению глубин, и положительными значениями (увеличение глубин), практически перпендикулярных береговой линии. Отрицательные значения плановой кривизны поверхности (рис. 2г), которые характеризуют её горизонтально-вогнутый характер перпендикулярно к направлению максимального уклона, а также полученные траектории наискорейшего спуска в данном районе, отчётливо выделяют потенциальные траектории движения взвешенного материала в штормовых условиях. Уклон дна вдоль данных траекторий варьируется от $0,4^\circ$ до 1° .

Отметим, что как было показано в работе [Завьялов и Жмур, 2014], при значениях уклона дна (около 1°) придонные течения могут приобретать значительные скорости и эродирующую способность. За счёт насыщения вод взвесенесущего течения (до некоторого предельного значения [Баренблатт, 1953]) возможно увеличение дальности распространения течения по склону дна. По выходу из прибойной зоны придонное течение приобретает статус стратифицированного по плотности течения со скачком плотности на его верхней границе, подавляющего перемешивание с вышележащей водой с возможностью ускорения потока [Баренблатт, 1953; Ozmidov, 1997].

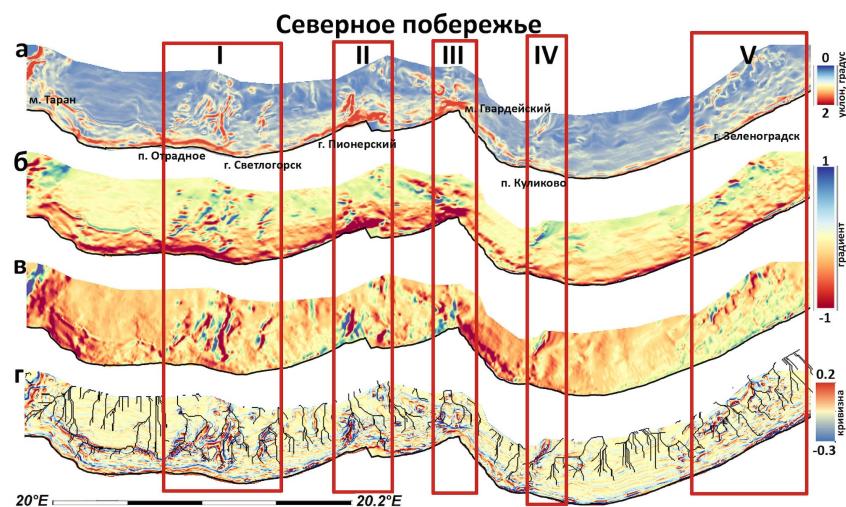


Рис. 2. Значения уклона дна (а), поперечного к берегу градиента (б), вдольберегового градиента (в), плановой кривизны и траекторий наискорейшего спуска (г) по данным цифровой модели рельефа для участка северного побережья Калининградского полуострова. Участки с характерными морфологическими особенностями выделены прямоугольниками и пронумерованы римскими цифрами.

Анализ значений градиентных (дифференциально-геометрических) характеристик поверхности дна на участках II и III западнее и восточнее г. Пионерский (рис. 2), а также участка IV в районе п. Куликово, выявил характерные ложбинообразные структуры, имеющие поперечные к берегу ориентации. Ширина данных ложбин составила 300–400 м, при уклоне дна $0,9^\circ$.

Расчёт вдольберегового градиента и кривизны поверхности для склона дна в г. Зеленоградск (участок V) показал сильную расчленённость топографии поверхности склона дна без наличия преобладающих траекторий наискорейшего спуска, имеющих кросс-склоновое направление. Полученные для данного района траектории показывают несколько потенциальных маршрутов возможного выноса взвеси, на фоне отсутствия поперечных к берегу морфологических особенностей.

На западном побережье (рис. 3) выделяется большой участок от г. Балтийск до п. Янтарный, который характеризуется отсутствием каких-либо форм рельефа на дне, имеющих поперечную к берегу ориентацию. Уклоны варьируются в диапазоне от 0 до $0,4^\circ$ (рис. 3а), а полученная плановая кривизна поверхности (рис. 3г) принимает значения близкие к нулю, что свидетельствует о гладкости данной поверхности в дифференциально-геометрическом смысле. Комплексные геофизические работы от п. Янтарный до мыса Таран, выполненные институтом Карпинского [Амантов и др., 2014], зафиксировали большое количество клифов, гряд, ложбин и других форм рельефа различного размера. Анализ градиентов (рис. 3б, в) поверхности дна позволяет выделить 2 участка (на рис. 3 отмечены прямоугольниками), на которых обнаружены рассматриваемые нами морфологические особенности в виде поперечных к берегу отрицательных форм рельефа: участок I в районе п. Янтарный и участок II от п. Донское до м. Таран. Подводный береговой склон между участками I и II хоть и имеет сильно расчленённый рельеф, но на нем не отмечается поперечных к берегу траекторий возможного движения взвешенного материала.

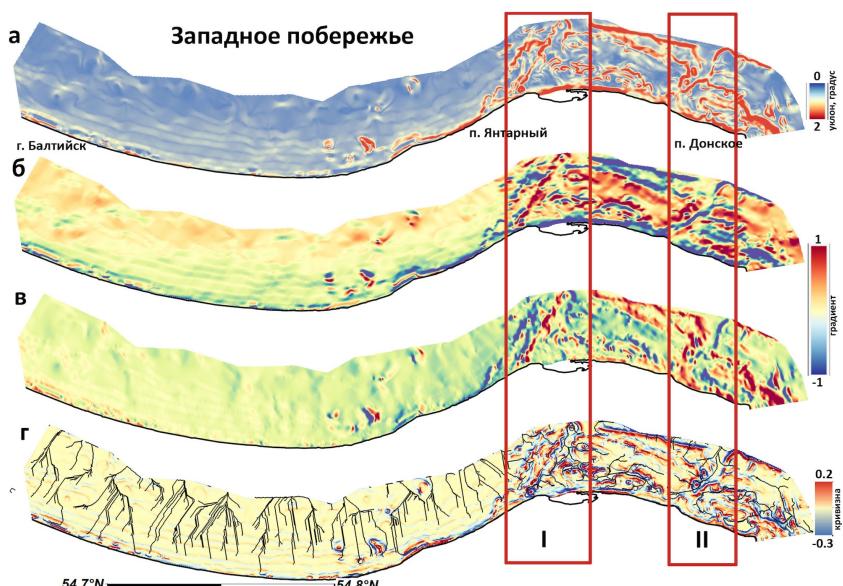


Рис. 3. Значения уклона дна (а), поперечного к берегу градиента (б), вдольберегового градиента (в), плановой кривизны и траекторий наискорейшего спуска (г) по данным цифровой модели рельефа для участка западного побережья Калининградского полуострова. Участки с характерными морфологическими особенностями выделены прямоугольниками и пронумерованы римскими цифрами. Рисунок повернут на 90 градусов относительно севера.

Заметим, что все описанные выше кросс-склоновые морфологические особенности топографии дна могут «работать» только при наличии у берега значительного объёма насыщенных взвесью вод. Инstrumentальные измерения [Айбулатов, 1990; Жиндарев и др., 1998] показали, что высокая степень турбулизации движений вод в зоне обрушения волн, возникающая в штормовых условиях, обеспечивает возможность выполнения обозначенных условий. Модельные расчёты одного из авторов работы [Gritsenko and Sviridov, 1999] показали возможность в условиях шторма одновременного существования значительного объёма взвесенесущей воды у берега моря и, одновременно, вдольсклонового плотностного течения.

Обратим внимание, что горизонтальная расчленённость склона дна была инструментально зафиксирована в ходе исследований с использованием гидролокации бокового обзора (ГЛБО) в Финском заливе [Рябчук и др., 2015] и в Светлогорской бухте на северном побережье Калининградского полуострова [Zhamoida et al., 2009]. Сравнение результатов реконструкции донных осадков и участков интенсивной донной абразии, полученных по данным площадной съёмки методом ГЛБО [Амантов и др., 2014], выявило их хорошее соответствие с рассчитанными в данной работе траекториями наискорейшего спуска. Эти траектории приурочены к потенциальным районам уноса взвешенного материала, которые характеризуются наличием грубозернистого песка и крупных рифелей на дне.

Таким образом, использование ЦМР позволило выделить у берегов Калининградского полуострова участки склона дна с горизонтальной расчленённостью его поверхности и выделить потенциальные пути движения придонных взвесенесущих течений штормовой природы.

Классификация участков береговой зоны моря

Подводя итог вышесказанному, ещё раз подчеркнём, что сочетание «плохого» рельефа дна, в смысле дифференциально-геометрической негладкости поверхности склона дна, и значительное по величине содержание взвеси в прибрежных водах во время сильного шторма [Пыхов, 1976; Юркевич, 1976] создаёт условия для возникновения струйных вдольсклоновых взвесенесущих течений, обладающих способностями к абразии дна и выносу взвешенного материала за пределы зоны ветро-волнового воздействия на дно. Для краткости будем в дальнейшем называть данный механизм адвективно-струйным.

Физико-географическая классификация береговой зоны моря имеет как фундаментальный, так и прикладной аспекты [Кинг, 1963; Леонтьев, 2018; Лымарев, 1983; Тикульев, 1997]. Первый соотносится с длительным процессом естественной эволюции береговой зоны моря в выбранном районе исследований. Второй – определяется возможными быстрыми изменениями и откликом на человеческую деятельность. Устойчивое существование морских берегов Калининградской области является одним из необходимых условий успешной хозяйственной деятельности в регионе. Этим определяется актуальность задачи физико-географического районирования береговой зоны по степени потенциального влияния геометрии склона дна на возможность формирования вдольсклоновых взвесенесущих течений штормовой природы и, как следствие, интенсивную абразию поверхности берегового склона и самого берега.

Классификация береговой зоны моря Калининградского полуострова была выполнена по степени возможного негативного влияния на устойчивость береговой зоны к штормовому воздействию особенностей геометрии поверхности склона дна в штормовых условиях. С точки зрения возможности интенсивной абразии берега использовался следующий подход.

К первому типу береговой зоны моря, который соответствует низкой степени влияния, были отнесены участки, для которых характерен ровный, гладкий рельеф подводного берегового склона. Для данных участков расчёт основных дифференциально-геометрических характеристик поверхности дна не выявил морфологических особенностей, способных фокусировать потоки или способствовать интенсивному уносу взвешенного материала вглубь моря. Не наблюдаются выраженные траектории наискорейшего спуска, линии имеют древовидную структуру с множеством разнонаправленных траекторий и отсутствием доминирования какой-то одной из них.

Второй тип, соответствующий средней степени влияния, выделил участки, для которых характерен достаточно расчленённый рельеф подводного берегового склона без присутствия морфологических особенностей с поперечной к береговой линии ориентацией.

Для третьего типа (высокая степень влияния) участков характерны отчётливо выраженные морфологические особенности подводного берегового склона с попереч-

ной к береговой линии ориентацией и сильно расчленённый рельеф. Горизонтально-вогнутый характер поверхности подводного берегового склона в виде абразионных ложбин или каналов и полученные траектории наискорейшего спуска в данных районах отчётливо выделяют потенциальные траектории движения взвешенного в штормовых условиях материала.

Выполненная классификация участков береговой зоны Калининградского полуострова позволила выделить 15 участков (рис. 4, табл. 1), принадлежащих к одному из описанных выше типов.

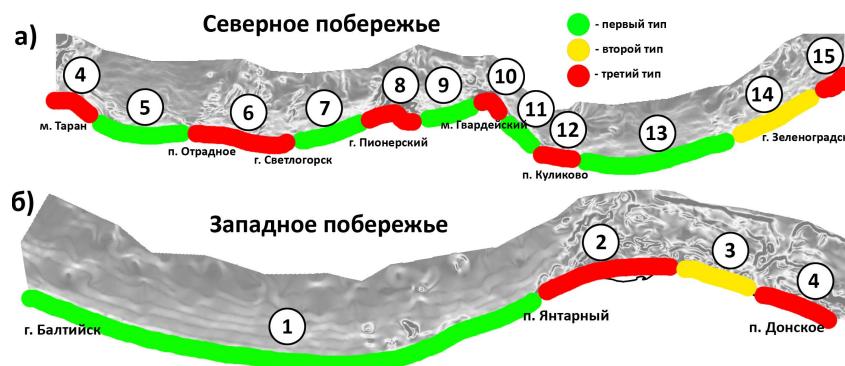


Рис. 4. Классификация береговой зоны Калининградского полуострова по степени возможного негативного влияния особенностей геометрии поверхности склона дна в штормовых условиях. Цветами выделены соответствующие типы при классификации. Зелёный, жёлтый и красный цвета обозначают первый, второй и третий тип соответственно. Изображение западного побережья повернуто на 90 градусов относительно севера.

Таблица 1. Классификация участков береговой зоны Калининградского полуострова, основанная на оценке степени потенциального негативного воздействия особенностей геометрии поверхности подводного склона на стабильность береговой зоны в условиях штормовой активности

Тип участка	Описание	Номера участков
Тип 1	Гладкий рельеф	1 (г. Балтийск – п. Янтарный), 5 (р-н п. Филино), 7 (г. Светлогорск), 9 (г. Пионерский), 11 (восточнее м. Гвардейский), 13 (п. Куликово – г. Зеленоградск)
Тип 2	Участки с гладким дном и слабо выраженным морфологическими особенностями без определённой ориентации	3 (между п. Синявино и п. Донское), 14 (у г. Зеленоградск)
Тип 3	Участки с существенными поперечными к берегу морфологическими особенностями, способные обеспечивать формирование локализованных в пространстве интенсивных взвесенесущих потоков в штормовых условиях в прибрежной зоне	2 (п. Янтарный), 4 (п. Донское и м. Таран), 6 (п. Отрадное – г. Светлогорск), 8 (г. Пионерский), 10 (м. Гвардейский), 12 (п. Куликово) 15 (основание Куршской косы)

Обсуждение

Определим теперь место и роль описанного выше адvectionно-струйного механизма выноса песка из прибрежной зоны моря за её внешнюю границу. Отметим, что исследования литодинамических процессов в прибрежной зоне моря имеют обширную историю [Жиндарев и др., 1998; Зенкович, 1946; Кинг, 1963; Косьян и Пыхов, 1991; Пыхов, 1976]. Однако при всей детальной и разносторонней изученности природной среды песчаных

побережий [Жиндарев и др., 1998; Леонтьев, 1981] полнота понимания их эволюции не достигнута. Прежде всего, не решена проблема влияния горизонтальной расчленённости береговой зоны на морфодинамику склона дна и самих берегов. Известно [Косыян и Пыхов, 1991; Леонтьев, 2018], что ветро-волновой режим определяет короткопериодные колебания уровня моря и прибрежные течения в береговой зоне, определяющие, в свою очередь, процессы перераспределения и аккумуляции твёрдого вещества на подводном береговом склоне. Нестационарный и пространственно неоднородный характер прибрежных течений порождает многообразие генерируемых ими потоков твёрдого вещества. Физическая природа движений взвешенного в воде материала в прибрежной зоне моря вполне понятна [Жиндарев и др., 1998; Косыян и Пыхов, 1991]. В основе подходов лежат аксиоматические предположения о нарушении симметрии орбитальных движений воды при выходе ветровых волн на мелководье и диссипации волновой энергии. В монографии Р. Д. Косыяна и Н. В. Пыхова [Косыян и Пыхов, 1991] приведён обширный обзор исследований вдольберегового транспорта взвешенного в воде материала середины прошлого века. Современные представления о литодинамических процессах, применимых для отмелых песчаных склонов дна у берегов юго-восточной Балтики, могут быть почерпнуты из цикла работ И. О. Леонтьева [Леонтьев, 1981, 2004, 2020]. Одним из необходимых условий его подхода и модельных представлений является относительная устойчивость состояния берегового склона и наличие на дне достаточно количества песчаного материала [Леонтьев, 2018]. Предложенные И. О. Леонтьевым модели позволяют, в частности, объяснить состояние и эволюцию ряда прибрежных участков Калининградского полуострова: широкие пляжи и подводные валы вдоль Балтийской косы и нескольких участков Куршской косы [Атлас..., 2010; Dorokhov et al., 2019]. Однако на участках со значительной горизонтальной расчленённостью поверхности склона дна в виде абразионных ложбин, каналов или гряд прибрежные валы песка отсутствуют и наблюдается абразия берега.

Основные закономерности поперечного перемещения наносов одним из первых были рассмотрены В. П. Зенковичем [Зенкович, 1946, 1948; Зенкович и Егоров, 1957]. Р. Дайли была предложена гипотеза о возможном воздействии вдольсклоновых взвесенесущих течений на подводный склон (цит. по [Пыхов, 1976]). Появление в условиях шторма кратковременных деформаций рельефа дна и анализ природы их возникновения приводятся в работе [Юркевич, 1976]. Исследования были выполнены на основе наблюдений на шести полигонах в прибрежных водах Балтийского и Черного морей. Анализ экспериментальных материалов позволил выделить ряд параметров, определяющих тип быстрых изменений поверхности дна. При анализе отрицательных деформаций (размыве) констатируется необходимость учёта исходного (до штормового) рельефа склона дна. Таким образом, подчёркивается важность учёта последствий предшествующего шторма.

Одним из авторов данной работы [Килесо, 2022] было показано, что при распространении фронта взвесенесущих вод вдоль горизонтально однородного гладкого склона дна могут возникать условия для появления неустойчивости типа Релея – Тэйлора, при которой наблюдается спад единого фронта на множество малых языков, быстро затухающих в своём движении и не нарушающих стабильности существования склона дна. Именно эта картина наблюдается у берегов Балтийской косы, многие годы сохраняющая в целом поверхность подводного берегового склона. Напротив, кросс-склоновые морфологические особенности в виде абразионных ложбин трансформируют неустойчивость распространения фронта взвесенесущих вод по склону дна в устойчивое адвективно-струйное движение воды и разрушает берега, например, Светлогорская бухта в 2011–2012 годах [Рябчук и др., 2015]. Данное обстоятельство порождает более интенсивный вынос песка за пределы зоны ветро-волнового воздействия на дно.

Здесь следует обратить внимание на существование других коротко живущих струйных течений: компенсационных, разрывных и так далее [Сивков и др., 2012]. Такого рода течения имеют значительные скорости, направленные в сторону открытого моря в окрестности зоны своего формирования, небольшие поперечные размеры и малый

срок жизни. Натурные измерения [Сивков и др., 2012] показали наибольшие скорости такого рода течения у северного побережья Калининградского полуострова, фиксируемые в месте обрушения наиболее крупных волн на глубинах 4–5 метров и достигавших величины более метра в секунду. На расстоянии 400–500 м от берега скорость плавно уменьшалась, сохраняя направление, и фиксировалась до глубин 15–20 метров. Подробное описание экспериментов с измерением динамики прибрежных вод у северных берегов приведены в работе [Сивков и др., 2012]. Результаты лабораторных и натурных экспериментов, приведённых в монографии [Леонтьев, 2001], также свидетельствуют о достаточно быстром затухании такого рода течений по мере их удаления от берега. Таким образом, выполнить перенос песка до глубин 30–35 метров, т.е. за внешнюю границу прибрежной зоны моря, они вряд ли способны. Для более точной оценки значимости данного фактора не хватает экспериментальных данных.

Описанный в данной работе адвективно-струйный механизм уноса песка из прибрежной зоны моря по морфологическим особенностям поверхности дна в виде абразионных ложбин или каналов с кросс-склоновой ориентацией отличается по своей физической природе от уже существующих моделей [Айбулатов, 1990; Жиндарев и др., 1998; Косъян и Пыжов, 1991; Леонтьев, 2018]. Предложенный механизм естественным образом дополняет ранее полученные представления о динамике взвешенного материала в условиях небольшой ветровой нагрузки на прибрежные воды объяснением кросс-склонового движения песка поперёк линии берега в условиях сильного шторма. Отметим разницу во времени существования двух различных типов механизмов транспорта песка. В первом случае транспорт песка протекает длительное время при небольших по величине ветровом волнении и дрейфовых течениях, а адвективно-струйный механизм переноса песка в сторону моря существует в условиях сильных штормов, обычно продолжающихся в юго-восточной Балтике всего 3–4 дня [Бобыкина и Стонт, 2015].

Наконец, на суше существует вполне близкий по своей природе механизм формирования вдольсклоновых движений взвесенесущих вод. Как известно [Рогачев, 2006; Страхов, 1963; Тылковский и Коландер, 2014], задача деформации склоновых поверхностей ландшафтов под воздействием различных факторов, среди которых следует упомянуть угол склона дна, тип подстилающей поверхности, интенсивность осадков и другие факторы, входит в число классических. Среди примеров из физической географии, наиболее близко подходящих к рассматриваемой в работе задаче, следует отметить процесс овражной эрозии. Очевидно, что на подводном склоне дна возможен морской аналог овражной эрозии дна. По-видимому, данный тип эволюции поверхности подводного берегового склона будет порождать поперечный к берегу механизм транспорта взвешенного в воде материала. Появление в воде сил плавучести обуславливает существенное уменьшение гравитационного фактора за счёт перехода к редуцированному ускорению силы тяжести. Однако из-за отрицательной плавучести компонентов взвесенесущих вод их значительный объем может возникать только в условиях сильных штормов и приводить к деформации поверхности подводного склона, что, собственно, и наблюдается на некоторых участках морского побережья Калининградского полуострова. Полученная в работе классификация по степени возможного влияния геометрии поверхности склона дна на стабильность береговой зоны моря в штормовых условиях была соотнесена с данными по влиянию штормовой активности на размыв берегов Калининградского полуострова [Бобыкина и Стонт, 2015]. Отмеченные участки значительного размыва берегов западного и северного побережья Калининградского полуострова на примере штормов 2011–2012 годов на качественно уровне хорошо совпадают с выделенными в данной работе участками 3 типа. Так, наиболее пострадавшими и частично разрушенными являлись берега моря у городов Светлогорск, Зеленоградск и Пионерский, а также участки к югу от м. Таран и п. Янтарный. Описанный участок южнее п. Янтарный до г. Балтийск, для которого отмечается аккумуляция и увеличение пляжа до 80 м, согласуется с выделенным участком первого типа с гладким рельефом подводного берегового склона. Сравнение с интегральной оценкой среднегодовой ди-

намики морского берега Калининградской области по данными тригонометрического нивелирования берега [Бурнашов, 2011] также показало хорошее соответствие. Отмеченные участки 3 типа с существенными поперечными к берегу морфологическими особенностями в целом соответствуют участкам с абразионными формами рельефа и неустойчивым геоэкологическим состоянием. Для западной части северного побережья (от мыса Таран до г. Пионерский) получено хорошее соответствие с выполненной классификацией подводного берегового склона на устойчивые и неустойчивые участки. В работе [Корзинин, 2012] для данного района выделены абразионные участки по отклонению от профиля равновесия для подводного берегового склона. Абразионные участки в пределах Светлогорской бухты совпадают с участками 3 типа предложенной классификации.

Выводы

Предложенный в работе адвективно-струйный механизм выноса песка за внешнюю границу прибрежной зоны моря позволил дать объяснение появлению скоплений песка в диапазоне глубин 35–40 м у берегов Калининградского полуострова. Данный механизм транспорта взвеси может возникать в условиях сильных штормов и имеет небольшое время жизни. Таким образом, сочетание орографического фактора и происходящее во время сильных штормов насыщение взвесью прибрежных вод в зоне обрушения волн создают условия для формирования вдольсклоновых взвесенесущих течений, распространяющихся по абразионным ложбинам и каналам, осуществляющих безвозвратный вынос песка за пределы внешней границы прибрежной зоны моря.

Анализ мелкомасштабных особенностей поверхности (дифференциально-геометрических по своей сути) подводного берегового склона позволил выделить три типа участков, различающихся по степени возможного негативного влияния морфологических особенностей, ориентированных поперёк берега, с точки зрения усиления абразионных процессов. Участки 2 и 3 типов, выделенные в береговой зоне Калининградского полуострова, будут подвержены возрастающему негативному воздействию, связанному с абразией. Это обусловлено более интенсивным уносом взвешенного материала вглубь моря, значительные объёмы которого формируются в зоне ветро-волнового воздействия в штормовых условиях. Данный процесс усиливается за счёт фокусирующего влияния морфологических особенностей, имеющих поперечную к берегу ориентацию. Напротив, на участках типа 1 с относительно гладким рельефом склона дна наблюдается стабильность состояния как подводного склона, так и самого берега.

Описанный адвективно-струйный механизм был получен на основе анализа мелкомасштабных особенностей поверхности берегового склона. Полученный результат позволяет предположить, что по мере все большей детализации поверхности берегового склона её дифференциально-геометрические характеристики естественным образом впишутся в описание различного рода механизмов транспорта взвеси в прибрежной зоне моря.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025).

Список литературы

- Айбулатов Н. А. Динамика твердого вещества в шельфовой зоне. — Л. : Гидрометеоиздат, 1990. — 271 с.
- Амантов А. В., Буданов Л. М., Григорьев А. Г. и др. Информационный бюллетень о состоянии геологической среды прибрежно-шельфовых зон Баренцева, Белого и Балтийского морей в 2013 г. — СПб : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. — 136 с.
- Атлас геологических и эколого-геологических карт Российской сектора Балтийского моря / под ред. О. В. Петрова. — СПб : ВСЕГЕИ, 2010. — 78 с.
- Баренблatt Г. И. О движении взвешенных частиц в турбулентном потоке, занимающем полупространство или плоский открытый канал конечной глубины // Прикладная математика и механика. — 1953. — Т. 17, № 3. — С. 261–274.

- Бобыкина В. П. и Стонт Ж. И. О зимней штормовой активности 2011–2012 гг. и ее последствиях для побережья Юго-Восточной Балтики // Водные ресурсы. — 2015. — Т. 42, № 3. — С. 322–328. — <https://doi.org/10.7868/S0321059615030025>.
- Бурнашов Е. М. Современная динамика морского побережья Калининградской области по данным ежегодных мониторинговых исследований // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. — 2011. — 2(33). — С. 10–17. — EDN: [NUAJWP](#).
- Жиндарев Л. А., Хабидов А. Ш. и Тризно А. К. Динамика песчаных берегов морей и внутренних водоемов. — Новосибирск : Наука, 1998. — 271 с.
- Жмур В. В., Сапов Д. А., Нечаев И. Д. и др. Интенсивные гравитационные течения в придонном слое океана // Известия академии наук. Серия физическая. — 2002. — Т. 66, № 12. — С. 1721–1726.
- Завьялов И. Н. и Жмур В. В. Лабораторное моделирование взвесенесущих гравитационных потоков при активном взмучивании донных осадков // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2014. — Т. 50, № 3. — С. 344–354. — <https://doi.org/10.7868/S0002351514030122>.
- Зенкович В. П. Динамика и морфология морских берегов. Ч. 1: Волновые процессы. — М. : Морской транспорт, 1946. — 496 с.
- Зенкович В. П. Выработка абразионного профиля в процессе повышения уровня моря // Доклады АН СССР. — 1948. — Т. 63, № 2. — С. 183–186.
- Зенкович В. П. и Егоров Е. Н. Об исследовании перемещения песчаных наносов // Тр. Ин-та океанологии АН СССР. — 1957. — Т. 21. — С. 87–99.
- Килемо А. В. Влияние рельефа подводного берегового склона на геоэкологическое состояние береговой морфосистемы (на примере Калининградского полуострова). — Калининград : Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2022. — 110 с. — EDN: [INMCGH](#).
- Килемо А. В., Демидов А. Н. и Гриценко В. А. Орографический фактор в формировании вдоль склоновых течений в Юго-Восточной Балтике // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2020. — № 3. — С. 100–107. — EDN: [YQHYOO](#).
- Кинг К. М. А. Пляжи и берега / под ред. О. К. Леонтьевой. — М. : Изд-во иностранной литературы, 1963. — 435 с.
- Корзинин Д. В. Динамика рельефа береговой зоны северного побережья Самбийского полуострова (юго-восточная Балтика). — Москва : МГУ, 2012. — 140 с. — EDN: [QFTJMX](#).
- Косьян Р. Д. и Пыхов Н. В. Гидрогенное перемещение осадков в береговой зоне моря. — М. : Наука, 1991. — 280 с.
- Леонтьев И. О. Обзор современных представлений о циркуляции воды в береговой зоне, обусловленной волнением // Литодинамика и гидродинамика контактной зоны океана. — М. : Наука, 1981. — С. 128–153.
- Леонтьев И. О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. — М. : ГЕОС, 2001. — 272 с.
- Леонтьев И. О. Профиль равновесия и система подводных береговых валов // Океанология. — 2004. — Т. 44, № 4. — С. 625–631. — EDN: [OWKMDX](#).
- Леонтьев И. О. Оценка поперечного потока наносов на границе прибрежной зоны // Океанология. — 2008. — Т. 48, № 1. — С. 132–138. — EDN: [IBYVKP](#).
- Леонтьев И. О. Моделирование берегового профиля, сформированного штормовым циклом // Океанология. — 2018. — Т. 58, № 6. — С. 973–981. — <https://doi.org/10.1134/S0030157418060084>.
- Леонтьев И. О. Динамика берегового профиля с подводными валами в масштабе штормового цикла // Океанология. — 2020. — Т. 60, № 5. — С. 805–813. — <https://doi.org/10.31857/s0030157420050123>.
- Леонтьев И. О., Рябчук Д. В., Сергеев А. Ю. и др. О генезисе некоторых форм рельефа дна и берегов восточной части Финского залива // Океанология. — 2011. — Т. 51, № 4. — С. 734–745. — EDN: [NXXEVZ](#).
- Лымарев В. И. Схема физико-географического районирования Балтийского моря // Известия Всесоюзного географического общества. — 1983. — Т. 115, № 3. — С. 255–259.
- Пыхов Н. В. Возникновение и движение на шельфе супензионных потоков малой плотности // Литодинамика, литология и геоморфология шельфа. — М. : Наука, 1976. — С. 36–52.
- Рогачев Г. И. Общая геоморфология. — М. : МГУ, Наука, 2006. — 416 с.
- Рябчук Д. В., Колесов М. В., Сергеев А. Ю. и др. Абрационные процессы в береговой зоне восточной части Финского залива и их связь с многолетними трендами режимообразующих факторов // Геоморфология. — 2015. — № 4. — С. 99–105. — <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2014-4-99-105>.
- Сивков В. В., Жамойда В. А., Жиндарев Л. А. и др. Нефть и окружающая среда Калининградской области. Том II: Море. — Калининград : Терра Балтика, 2012. — 575 с.
- Страхов Н. М. Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли. — М. : Госгеолтехиздат, 1963. — 535 с.

- Тикунов В. С. Классификации в географии: ренессанс или увядание? (опыт формальных классификаций). — Москва : СГУ, 1997. — 367 с.
- Тылковский Я. и Коландер Р. Об экстремальных значениях гидрометеорологических величин в прибрежных районах (на примере южного побережья Балтийского моря) // Метеорология и гидрология. — 2014. — № 9. — С. 65—73. — EDN: SNIGMR.
- Юркевич М. Г. Кратковременные деформации шельфа подводного склона верхней зоны шельфа // Литодинамика, литология и геоморфология шельфа. — М. : Наука, 1976. — С. 257—266.
- Bagnold R. A. Auto-suspension of transported sediments // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. — 1962. — Vol. 265, no. 1322. — P. 315—319. — <https://doi.org/10.1098/rspa.1962.0012>.
- Baltic Sea Bathymetry Database version 0.9.3. — 2013. — URL: <https://www.bshc.pro/data/> (visited on 01/21/2025).
- Dorokhov D., Dudkov I. and Sivkov V. Single beam echo-sounding dataset and digital elevation model of the southeastern part of the Baltic Sea (Russian sector) // Data in Brief. — 2019. — Vol. 25. — P. 104123. — <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104123>.
- EMODnet Bathymetry Consortium. EMODnet Digital Bathymetry (DTM 2020). — 2020. — <https://doi.org/10.12770/bb6a87dd-e579-4036-abe1-e649cea9881a>.
- ESRI ArcGIS Desktop: Release 10. — 2011. — URL: <https://www.esri.com/>.
- Gritsenko V. and Sviridov N. Role of storms in formation of turbulent sea currents in the near-shore zone // Baltica. Proceedings of the Fifth Marine Geological Conference «THE BALTIC». — 1999. — Vol. 12. — P. 28—31.
- Hsü K. J. Physics of Sedimentology. — Springer Berlin Heidelberg, 2004. — 240 p. — <https://doi.org/10.1007/978-3-662-09296-5>.
- Jenson S. K. and Domingue J. O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. — 1988. — Vol. 54, no. 11. — P. 1593—1600.
- Krek A., Stont Zh. and Ulyanova M. Alongshore bed load transport in the southeastern part of the Baltic Sea under changing hydrometeorological conditions: Recent decadadal data // Regional Studies in Marine Science. — 2016. — Vol. 7. — P. 81—87. — <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2016.05.011>.
- Łabuz T. Erosion and its rate on an accumulative Polish dune coast: the effects of the January 2012 storm surge // Oceanologia. — 2014. — Vol. 56, no. 2. — P. 307—326. — <https://doi.org/10.5697/oc.56-2.307>.
- Moore I. D., Grayson R. B. and Landson A. R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications // Hydrological Processes. — 1991. — Vol. 5, no. 1. — P. 3—30. — <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>.
- Ozmidov R. V. Vertical exchange through ocean layers of high density gradients // Oceanology. — 1997. — Vol. 37, no. 4. — P. 443—446. — EDN: LDZKLT.
- Ryabchuk D., Sergeev A., Burnashev E., et al. Coastal processes in the Russian Baltic (eastern Gulf of Finland and Kaliningrad area) // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. — 2020. — Vol. 54, no. 1. — <https://doi.org/10.1144/qjegh2020-036>.
- Schlitzer R. Ocean Data View. — 2018. — URL: <https://odv.awi.de/> (visited on 06/01/2023).
- Seifert T., Tauber F. and Kayser B. A high-resolution spherical grid topography of the Baltic Sea - 2nd edition. — 2001. — URL: <https://www.io-warnemuende.de/topography-of-the-baltic-sea.html>.
- Zhamoida V. A., Ryabchuk D. V., Kropatchev Y. P., et al. Recent sedimentation processes in the coastal zone of the Curonian Spit (Kaliningrad region, Baltic Sea) // Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften. — 2009. — Vol. 160, no. 2. — P. 143—157. — <https://doi.org/10.1127/1860-1804/2009/0160-0143>.

MORPHOLOGICAL FEATURES OF THE SEABED SLOPE AND THEIR INFLUENCE ON CROSS-SLOPE TRANSPORT OF SUSPENDED MATTER UNDER STORM CONDITIONS OFF THE COAST OF THE KALININGRAD PENINSULA

A. V. Kiles ^{*,1,2}, V. A. Gritsenko¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

****Correspondence to:** Alexander Kiles, aleksandr.kiles@gmail.com

An analysis of small-scale gradient characteristics of the underwater coastal slope surface near the shallow sandy shores of the Kaliningrad Peninsula provided qualitative and quantitative estimates of the horizontal gradients of the bottom slope, curvature, and the steepest descent trajectories. Sections of the slope with morphological features such as erosional gullies and cross-slope-oriented channels were identified, creating favorable conditions for suspended sediment transport during severe storms in the form of along-slope suspension currents. Based on the criterion proposed in this study, a classification of the coastal zone near the Kaliningrad Peninsula was carried out according to the degree of negative impact of bottom slope morphological features in the context of potential shoreline erosion under storm conditions.

Received: February 21, 2025

Accepted: September 8, 2025

Published: October 25, 2025



© 2025. The Authors.

Citation: Kiles A. V. and Gritsenko V. A. (2025), Morphological Features of the Seabed Slope and Their Influence on Cross-Slope Transport of Suspended Matter Under Storm Conditions off the Coast of the Kaliningrad Peninsula, *Russian Journal of Earth Sciences*, 25, ES5018, <https://doi.org/10.2205/2025ES001060>, EDN: QVSGKI

References

- Aibulatov N. A. Dynamics of Solid Matter in the Shelf Zone. — L. : Gidrometeoizdat, 1990. — 271 p. — (In Russian).
- Amantov A. V., Budanov L. M., Grigor'yev A. G., et al. Information Bulletin on the State of the Geological Environment of the Coastal-Shelf Zones of the Barents, White and Baltic Seas in 2013. — SPb : Kartograficheskaya Fabrika VSEGEI, 2014. — 136 p. — (In Russian).
- Atlas of geological and environmental geological maps of the Russian area of the Baltic Sea / ed. by O. V. Petrov. — SPb : VSEGEI, 2010. — 78 p. — (In Russian).
- Bagnold R. A. Auto-suspension of transported sediments // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. — 1962. — Vol. 265, no. 1322. — P. 315–319. — <https://doi.org/10.1098/rspa.1962.0012>.
- Baltic Sea Bathymetry Database version 0.9.3. — 2013. — URL: <https://www.bshc.pro/data/> (visited on 01/21/2025).
- Barenblatt G. I. On the motion of suspended particles in a turbulent flow occupying a half-space or a plane open channel of finite depth // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. — 1953. — Vol. 17, no. 3. — P. 261–274. — (In Russian).
- Bobkina V. P. and Stont Zh. I. Winter storm activity in 2011–2012 and its consequences for the Southeastern Baltic coast // Water Resources. — 2015. — Vol. 42, no. 3. — P. 371–377. — <https://doi.org/10.1134/S0097807815030021>.
- Burnashov E. M. Modern Dynamics of the Marine Coast of the Kaliningrad Region According to Annual Monitoring Data // Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University. — 2011. — 2(33). — P. 10–17. — EDN: [NUAJWP](#) ; (in Russian).

- Dorokhov D., Dudkov I. and Sivkov V. Single beam echo-sounding dataset and digital elevation model of the southeastern part of the Baltic Sea (Russian sector) // Data in Brief. — 2019. — Vol. 25. — P. 104123. — <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104123>.
- EMODnet Bathymetry Consortium. EMODnet Digital Bathymetry (DTM 2020). — 2020. — <https://doi.org/10.12770/bb6a87dd-e579-4036-abe1-e649cea9881a>.
- ESRI ArcGIS Desktop: Release 10. — 2011. — URL: <https://www.esri.com/>.
- Gritsenko V. and Sviridov N. Role of storms in formation of turbulent sea currents in the near-shore zone // Baltica. Proceedings of the Fifth Marine Geological Conference «THE BALTIC». — 1999. — Vol. 12. — P. 28–31.
- Hsü K. J. Physics of Sedimentology. — Springer Berlin Heidelberg, 2004. — 240 p. — <https://doi.org/10.1007/978-3-662-09296-5>.
- Jenson S. K. and Domingue J. O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. — 1988. — Vol. 54, no. 11. — P. 1593–1600.
- Kileso A. V. Influence of the Submarine Coastal Slope Relief on the Geoecological State of the Coastal Morphosystem (on the Example of the Kaliningrad Peninsula). — Kaliningrad : Immanuel Kant Baltic Federal University, 2022. — 110 p. — EDN: [INMCGH](#) ; (in Russian).
- Kileso A. V., Demidov A. N. and Gritsenko V. A. Orographic Factor in the Generation of Alongslope Currents in the South-Eastern Part of the Baltic Sea // Lomonosov Geography Journal. — 2020. — No. 3. — P. 100–107. — EDN: [YQHYOO](#) ; (in Russian).
- King C. M. A. Beaches and Coasts / ed. by O. K. Leont'yeva. — M. : Publishing House of Foreign Literature, 1963. — 435 p. — (In Russian).
- Korzinin D. V. Dynamics of the Relief of the Coastal Zone of the Northern Coast of the Sambian Peninsula (Southeastern Baltic). — Moscow : MGU, 2012. — 140 p. — EDN: [QFTJMX](#) ; (in Russian).
- Kos'yan R. D. and Pykhov N. V. Hydrogenic Sediment Transport in the Coastal Zone of the Sea. — M. : Nauka, 1991. — 280 p. — (In Russian).
- Krek A., Stont Zh. and 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. — Vol. 7. — P. 81–87. — <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2016.05.011>.
- Labuz T. Erosion and its rate on an accumulative Polish dune coast: the effects of the January 2012 storm surge // Oceanologia. — 2014. — Vol. 56, no. 2. — P. 307–326. — <https://doi.org/10.5697/oc.56-2.307>.
- Leont'yev I. O. Review of Modern Concepts of Water Circulation in the Coastal Zone Caused by Waves // Lithodynamics and Hydrodynamics of the Contact Zone of the Ocean. — M. : Nauka, 1981. — P. 128–153. — (In Russian).
- Leont'yev I. O. Coastal Dynamics: Waves, Currents, Sediment Flows. — M. : GEOS, 2001. — 272 p. — (In Russian).
- Leont'yev I. O. Equilibrium Profile and System of Submarine Coastal Bar // Oceanology. — 2004. — Vol. 44, no. 4. — P. 588–594. — EDN: [LIKXVL](#) ; (in Russian).
- Leont'yev I. O. An estimate of the cross-shore sediment flux at the boundary of the coastal zone // Oceanology. — 2008. — Vol. 48, no. 1. — P. 123–128. — <https://doi.org/10.1007/s11491-008-1014-6>.
- Leont'yev I. O. Modeling a Shore Profile Formed by Storm Cycle Impact // Oceanology. — 2018. — Vol. 58, no. 6. — P. 892–899. — <https://doi.org/10.1134/S0001437018060085>.
- Leont'yev I. O. Dynamics of Barred Shore Profile on the Temporal Scale of a Storm Cycle // Oceanology. — 2020. — Vol. 60, no. 5. — P. 704–712. — <https://doi.org/10.1134/S0001437020050112>.
- Leont'yev I. O., Ryabchuk D. V., Sergeev A. Yu., et al. On the Genesis of Some Bottom and Coastal Relief Forms in the Eastern Gulf of Finland // Oceanology. — 2011. — Vol. 51, no. 4. — P. 688–698. — <https://doi.org/10.1134/S0001437011040102>.
- Lymarev V. I. Scheme of Physical-Geographical Zoning of the Baltic Sea // Izvestiya Vsesoyuznogo Geograficheskogo Obshchestva. — 1983. — Vol. 115, no. 3. — P. 255–259. — (In Russian).
- Moore I. D., Grayson R. B. and Landson A. R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications // Hydrological Processes. — 1991. — Vol. 5, no. 1. — P. 3–30. — <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>.
- Ozmidov R. V. Vertical exchange through ocean layers of high density gradients // Oceanology. — 1997. — Vol. 37, no. 4. — P. 443–446. — EDN: [LDZKLT](#).
- Pykhov N. V. Origin and Movement of Low-Density Suspension Flows on the Shelf // Lithodynamics, Lithology and Geomorphology of the Shelf. — M. : Nauka, 1976. — P. 36–52. — (In Russian).
- Rogachev G. I. General Geomorphology. — M. : MGU, Nauka, 2006. — 416 p. — (In Russian).

- Ryabchuk D., Sergeev A., Burnashev E., et al. Coastal processes in the Russian Baltic (eastern Gulf of Finland and Kaliningrad area) // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. — 2020. — Vol. 54, no. 1. — <https://doi.org/10.1144/qjegh2020-036>.
- Ryabchuk D. V., Kolesov M. V., Sergeev A. Yu., et al. Abrasion in the Eastern Gulf of Finland Coastal Zone and its Relation to Long-Term Trends of Regime-Forming Factors // Geomorfologiya. — 2015. — No. 4. — P. 99–105. — <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2014-4-99-105>. — (In Russian).
- Schlitzer R. Ocean Data View. — 2018. — URL: <https://odv.awi.de/> (visited on 06/01/2023).
- Seifert T., Tauber F. and Kayser B. A high-resolution spherical grid topography of the Baltic Sea - 2nd edition. — 2001. — URL: <https://www.io-warnemuende.de/topography-of-the-baltic-sea.html>.
- Sivkov V. V., Zhamoida V. A., Zhindarev L. A., et al. Oil and the Environment of the Kaliningrad Region. Volume II: Sea. — Kaliningrad : Terra Baltica, 2012. — 575 p. — (In Russian).
- Strakhov N. M. Types of Lithogenesis and Their Evolution in the Earth's History. — M. : Gosgeoltekhnizdat, 1963. — 535 p. — (In Russian).
- Tikunov V. S. Classifications in Geography: Renaissance or Withering? (Experience of Formal Classifications). — Moscow : MGU, 1997. — 367 p. — (In Russian).
- Tylkowski Ya. and Kolander R. Potential hydrometeorological threshold values of the coastal hazard—an example from the Polish Southern Baltic coast // Russian Meteorology and Hydrology. — 2014. — Vol. 39, no. 9. — P. 614–619. — <https://doi.org/10.3103/S1068373914090064>.
- Yurkevich M. G. Short-Term Deformations of the Shelf Submarine Slope of the Upper Shelf Zone // Lithodynamics, Lithology and Geomorphology of the Shelf. — M. : Nauka, 1976. — P. 257–266. — (In Russian).
- Zavialov I. N. and Zhmur V. V. Laboratory modeling of suspended matter bearing gravity flows during intense stirring of the bottom sediments // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. — 2014. — Vol. 50, no. 3. — P. 304–313. — <https://doi.org/10.1134/S0001433814030128>.
- Zenkovich V. P. Dynamics and Morphology of Sea Coasts. Part 1: Wave Processes. — M. : Morskoy Transport, 1946. — 496 p. — (In Russian).
- Zenkovich V. P. Development of an Abrasion Profile in the Process of Sea Level Rise // Doklady Akademii Nauk SSSR. — 1948. — Vol. 63, no. 2. — P. 183–186. — (In Russian).
- Zenkovich V. P. and Egorov E. N. On the Study of Sand Sediment Transport // Tr. In-ta okeanologii AN SSSR. — 1957. — Vol. 21. — P. 87–99. — (In Russian).
- Zhamoida V. A., Ryabchuk D. V., Kropatchev Y. P., et al. Recent sedimentation processes in the coastal zone of the Curonian Spit (Kaliningrad region, Baltic Sea) // Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften. — 2009. — Vol. 160, no. 2. — P. 143–157. — <https://doi.org/10.1127/1860-1804/2009/0160-0143>.
- Zhindarev L. A., Khabidov A. Sh. and Trizno A. K. Dynamics of Sandy Shores of Seas and Inland Water Bodies. — Novosibirsk : Nauka, 1998. — 271 p. — (In Russian).
- Zhmur V. V., Sapov D. A., Nechaev I. D., et al. Intense Gravity Currents in the Bottom Layer of the Ocean // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya. — 2002. — Vol. 66, no. 12. — P. 1721–1726. — (In Russian).