

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»**

На правах рукописи

Килесо Александр Владимирович

**Влияние рельефа подводного берегового склона на геоэкологическое состояние  
береговой морфосистемы (на примере Калининградского полуострова)**

Специальность 1.6.21 – Геоэкология

Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук

Научный руководитель

д.ф.-м.н., проф.

Гриценко В.А.

Калининград – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ГЛАВА 1. ГЕОГРАФИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.....	12
1.1 Физико-географические посылки, основные понятия.....	12
1.2. Взаимоотношение географических и геоэкологических исследований. ....	15
1.3. Экологическое нормирование состояния природных систем .....	19
ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ ОРОГРАФИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ДЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ БЕРЕГОВОЙ МОРФОСИСТЕМЫ .....	25
2.1 Морфолитодинамика морской прибрежной зоны Калининградской области.....	25
2.2 Взвесенесущие течения штормовой природы .....	31
2.3 Ветровое воздействие как определяющий фактор появления орографической опасности для частей береговой морфосистемы.....	41
ГЛАВА 3. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА ОРОГРАФИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ НА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ БЕРЕГОВОЙ МОРФОСИСТЕМЫ.....	45
3.1. Пространственная оценка степени возможного влияния фактора орографической опасности.....	45
3.1.1 Построение цифровой модели рельефа исследуемого района .....	48
3.1.2. Анализ градиентов и уклона дна береговой морфосистемы .....	51
3.1.3. Анализ кривизны поверхности береговой морфосистемы и траекторий градиентного спуска.....	59
3.1.4. Классификация участков береговой морфосистемы .....	64
3.2. Вероятностная оценка повторяемости фактора орографической опасности.....	68
3.2.1. Описание модели прибрежной динамики юго-восточной Балтики .....	70
3.2.2. Калибровка модели по натурным данным с прибрежной мониторинговой станции .....	72
3.2.3. Моделирование ветровых сценариев .....	74
3.2.4. Анализ вероятности повторяемости фактора орографической опасности .....	78
3.3. Фактор орографической опасности и морской потенциал приморских территорий .....	84
3.4. Роль гидродинамической неустойчивости Рэля-Тейлора в существовании береговой морфосистемы .....	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	93
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	95

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность исследования.** Прибрежная зона моря отличается высокой изменчивостью характеристик вследствие активного обмена потоков вещества и энергии между сушей и морем, определяемой ветровой нагрузкой, осадками, величиной терригенного стока и хозяйственной деятельностью человека [Прибрежная зона моря..., 2004; Жиндарев, 1997; Бабаков, 2003]. Главными факторами, определяющими процессы формирования морских берегов Калининградской области, являются вдольбереговой транспорт песка (в пределах зоны ветро-волнового воздействия, до глубин в 10-15 м) и наличие скопления песка на подводном склоне.

В Калининградской области на фоне инструментально зафиксированных изменений гидрометеорологической обстановки [Стонт и др., 2010; Tytkowski, 2017] участились факты размыва берегов, «исчезновения» морских пляжей, вплоть до их разрушения в основании Куршской косы. Наиболее масштабные преобразования в прибрежной зоне моря происходят во время сильных штормов. Очевидно, что экстремально большая абразия берегового склона дна и самого берега разрушает природную экосистему прибрежной зоны Балтийского моря. Поэтому, проблема выявления физико-географических факторов и геоэкологических последствий экстремально высоких скоростей разрушения берегов юго-восточной Балтики весьма актуальна.

**Степень разработанности проблемы.** Данные промеров свидетельствуют об отсутствии дефицита песчаного материала вдоль западного побережья Калининградского полуострова и Вислинской косы, что находит отражение в существовании здесь развитых (шириной более 50 - 100 м) песчаных пляжей. Подводные залежи песка имеются на северном участке западнее мыса Гвардейский и в основании подводных террас на глубинах 15 - 20 м, а также мористее пос. Янтарный, где наблюдается обширный конус выноса вскрышных пород, от ранее сброшенных в море из карьеров Янтарного комбината. Существующие схемы литодинамических процессов [Зенкович, 1958; Болдырев и Рябкова, 2001; Муселяк, 1988; Леонтьев, 2012; Бабаков, 2003; Бабаков и Чубаренко, 2019], описывающие в том числе и транспорт песка вдоль морских берегов, не дают полного понимания процесса их разрушения.

**Объект исследования.**

В качестве объекта диссертационного исследования выбрана *береговая морфосистема* Калининградского полуострова, представляющая собой часть береговой зоны и прилегающей суши, морфологически выраженной как единое целое, отделенное от других частей береговой зоны характерными литодинамическими или гидродинамическими барьерами.

**Предмет исследования.**

Предметом исследования является роль подводного берегового склона в изменчивости геоэкологического состояния в условиях формирования и развития поперечных береговой линии неровностей рельефа, представляющих опасность при сильных штормах, провоцирующие нарушение целостности береговой морфосистемы.

**Цель исследования.**

Оценить значимость особенностей рельефа подводного берегового склона на ухудшение геоэкологического состояния береговой морфосистемы Калининградского полуострова.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. На основе анализа результатов ранее выполненных исследований об изменчивости морфосистемы прибрежной зоны моря обосновать методику оценки ее геоэкологического состояния.
2. Выявить роль орографической опасности поперечных форм подводного рельефа для устойчивости береговой морфосистемы, методом численного моделирования штормовой динамики прибрежных вод.
3. Разработать пространственную классификацию береговой морфосистемы по степени потенциальной значимости фактора орографической опасности.
4. Оценить повторяемость возникновения орографической опасности для устойчивости геоэкологического состояния береговой морфосистемы.

**Фактический материал и методы исследования.** В работу вошли результаты эхолотных промеров подводного берегового склона Калининградской области

(Калининградский полуостров), предоставленные ГБУ КО "Балтберегозащита". Имеющиеся данные были дополнены авторским эхолотным промером полигона в районе Светлогорской бухты (северное побережье Калининградского полуострова), выполненный в рамках проекта РФФИ 17-05-41029 РГО\_а «Структура и циркуляция вод Балтийского моря вблизи Калининградской области». Также использовались массивы метеоданных за период с 2006 по 2017 гг. с метеостанции, расположенной на морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП) Д-6 на месторождении Кравцовское в Балтийском море, предоставленные ООО «Морское венчурное бюро».

Обработка, визуализация данных эхолотных промеров, а также дифференциально-геометрический анализ ЦМР подводного берегового склона производились с помощью геоинформационной системы Quantum GIS. Оценка повторяемости возникновения орографической опасности для устойчивости геоэкологического состояния береговой морфосистемы выполнена при помощи статистического анализа метеоданных и трехмерного численного моделирования штормовой динамики прибрежных вод, с использованием модели «SHYFEM». Широко использовался картографический метод.

### **Научная новизна.**

Впервые на основе цифровой модели рельефа подводного берегового склона Калининградского полуострова выделены участки с протяженными (до сотни метров) морфологическими особенностями в виде борозд поперечного к берегу направления [Kilesa et al. 2016]. Показано, что эту особенность строения подводного берегового склона можно рассматривать как предпосылку для возникновения в штормовых условиях опасности нового типа – орографической – влияющей на устойчивость геоэкологического состояния береговой морфосистемы.

Реализованный в работе подход позволяет определять участки береговой морфосистемы, потенциально наиболее подверженные разрушению из-за выноса наносов на большие глубины придонными взвесенесущими течениями, порождая дефицит песка для питания пляжей и ставя под угрозу само существование соответствующей части береговой морфосистемы [Килесо и др., 2020]. Современные системы многолучевого сканированию поверхности подводного берегового склона повышают возможность практической реализации предложенного подхода и его значения для понимания изменчивости конкретных участков береговой морфосистемы. На основе предложенного

в работе подхода выполнена пространственная классификация всей береговой морфосистемы Калининградского полуострова по степени возможного влияния на нее фактора орографической опасности [Килесо и Гриценко, 2019].

При помощи 3d-численного моделирования динамики прибрежных вод юго-восточной Балтики предложена методика и выполнена вероятностная оценка повторяемости (реализации за десятилетний период) гидрометеорологических условий потенциально благоприятных для возникновения орографической опасности для частей береговой морфосистемы, характеризующая возможности возникновения экстремально большого по объему выноса песчаного материала и, как следствие, негативного воздействия фактора для отдельных участков береговой морфосистемы Калининградского полуострова. Данное обстоятельство может помочь в принятии управленческих решений по сохранению берегов Калининградского полуострова и пляжевой системе на них. Впервые осознана важность фактора гидродинамической неустойчивости типа Рэлей-Тейлора распространения вдоль склона дна взвесенесущих течений штормовой природы для устойчивого состояния береговой морфосистемы [Килес и др., 2022].

### **Практическая значимость работы.**

Оценено влияние впервые выделяемой орографической опасности на стабильность существования морфосистемы, а также на основные виды хозяйственной деятельности – рекреационной, рыбохозяйственной, строительной, берегозащитной и др.

Предложенные автором методы и подходы могут быть использованы при прогнозировании развития абразии берегов и подводного берегового склона.

Результаты исследования могут найти применение в управленческих решениях, при экономическом планировании развития морских территорий в рамках комплексного управления прибрежной зоной.

### **Личный вклад автора.**

Автором выполнена обработка первичных данных эхолотных промеров и метеоданных, с использованием статистических и дифференциально-геометрических методов. Подготовлена численная трехмерная гидродинамическая модель юго-восточной Балтики на основе модели SHYFEM. Калибровка, верификация и модельные расчеты

штормовой динамики вод у берегов Калининградского полуострова, представленные в работе, выполнены лично автором. Автор также произвел интерпретацию, картографическое представление (визуализацию) полученных результатов с использованием ГИС-технологий, сопоставления и выводы. Автор участвовал в сборе полевых данных в экспедициях в качестве «исполнителя» в 2018 г. и «начальника экспедиции» в 2019 г. в рамках проекта РФФИ 17-05-41029 РГО\_а «Структура и циркуляция вод Балтийского моря вблизи Калининградской области».

#### **Защищаемые положения:**

1. Многократно наблюдаемые (наблюденные, произошедшие) экстремально большие разрушения отдельных частей береговой морфосистемы Калининградского полуострова после интенсивного штормового воздействия позволили установить существование опасности нового типа - орографической - для геоэкологического состояния береговой морфосистемы. Степень значимости этой опасности возрастает в условиях увеличивающейся штормовой активности в регионе юго-восточной Балтики.

2. По степени значимости орографической опасности в составе береговой морфосистемы Калининградского полуострова выделено три типа участков побережья: высокоопасные (29% от всей протяженности берегов), умеренноопасные (9,5%), слабоопасные (61,5%)

3. Повторяемость за десятилетний период гидрометеорологических условий потенциально благоприятных для возникновения орографической опасности для геоэкологического состояния участков береговой морфосистемы составила, в среднем, 9,1% и 2,5% при сильных и штормовых ветрах соответственно. Данное обстоятельство необходимо учитывать в различных видах хозяйственной деятельности.

#### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Содержит 110 страниц, включая 9 таблиц и 34 рисунков. Список литературы содержит 182 наименования, из которых 58 – зарубежные источники.

#### **Соответствие диссертации паспорту специальности.**

Результаты научного исследования соответствуют п. 1.6. Глобальные и региональные экологические кризисы – комплексные изменения окружающей среды, приводящие к резкому ухудшению условий жизни и хозяйственной деятельности.

Геоэкологические последствия природных и техногенных катастроф, п. 1.13. «Динамика, механизм, факторы и закономерности развития опасных природных и техноприродных процессов, прогноз их развития, оценка опасности и риска, управление риском, превентивные мероприятия по снижению последствий катастрофических процессов, инженерная защита территорий, зданий и сооружений.», п. 1.16. «Геоэкологические аспекты устойчивого развития регионов» и п. 1.17. «Геоэкологическая оценка территорий. Современные методы геоэкологического картирования, информационные системы в геоэкологии. Разработка научных основ государственной экологической экспертизы и контроля» паспорта специальности 1.6.21 – «Геоэкология».

### **Апробация работы.**

Материалы диссертации были представлены на международных и национальных конференциях, в том числе: Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» (Санкт-Петербург, 2017, 2018, 2019); Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2017, 2018)» (Москва, 2017, 2018); Международного симпозиума «Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере МСП-2018» (Москва, 2018); XXII Международная Научная конференция (Школа) по морской геологии. (Москва, 2017) ;II Всероссийской научной конференции молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (Москва, 2017); Международной научно-практической конференции «Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (Майкоп, 2017); Всероссийская научная школа молодых ученых "Волны и вихри в сложных средах" (Москва, 2013).

### **Публикации.**

По материалам диссертации опубликовано 19 научных работ, в том числе 3 в изданиях, входящих в перечень ВАК и индексируемых базой Scopus:

1. Килесо А.В., Демидов А.Н., 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. (ВАК, SCOPUS)



2. Килесо А. В., Стонт Ж.И. Некоторые аспекты изменчивости уровня Куршского залива (Юго-Восточная Балтика) при различных синоптических ситуациях // Гидрометеорология и экология. – 2020. – № 61. – С. 494-506. – DOI 10.33933/2074-2762-2020-61-494-506. (ВАК)

3. Kilesa A., Gritsenko V., Chernyshkov P., Isachenko I., Burnashov E. Orographic risks of bottom topography and sustainability of the sea coasts of the Kaliningrad region, Russia // Journal of Environmental Hydrology. – 2017. – Vol. 25. – P. 2. (SCOPUS)

Публикации в прочих изданиях:

1. Gritsenko, V.A., A.V. Kilesa, V.V. Kortishko, A.V. Shishova. 2010. The Specific Features of the Entrainment and Mixing Processes in the Downslope Density Currents. Fluxes and Structures in Fluids: Physics of Geospheres - 2009. Selected Papers. Ed. Yuli D. Chashechkin, Vasily G. Baydulov. IPM RAS. M., 158-168.

2. Килесо, А.В., В.А. Гриценко. 2011. Численная модель вдольсклонового плотностного течения с вложенной моделью расчета вязкого пограничного слоя. Физические проблемы экологии (экологическая физика): Под ред. В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова, К.В. Показеева. — М.: МАКС Пресс, №17, 181-185.

3. Килесо, А.В., В.А. Гриценко. 2012. Многофакторность расчетного условия на дне для численных моделей придонных плотностных течений. Физические проблемы экологии (экологическая физика): Под ред. В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова, К.В. Показеева. — М.: МАКС Пресс, №18, 165-171.

4. Килесо, А.В. 2012. Многофакторность расчетного условия на дне для численных моделей придонных плотностных течений. Шаг в науку. Вып. 2: Естественные и технические науки: сб. науч. ст. Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 19-26.

5. Килесо, А.В., В.А. Гриценко, Н.М. Кащенко. 2013. Простая модель взвешивания и переноса осадочного материала. . Физические проблемы экологии (экологическая физика): Под ред. В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова, К.В. Показеева. — М.: МАКС Пресс, №19, 241-248.

6. Гриценко, В.А., А.В. Килесо. 2013. Исследование особенностей эрозионной деятельности придонных гравитационных течений. Геология морей и океанов: Материалы XX Международной научной конференции (школы) по морской геологии. Т. 3, с. 13-17.

7. Chubarenko, B., V. Chechko, V. Pilipchuk, E. Bulycheva, A. Kilesa, V. Topchaya. 2016. Hydrological and sedimentation conditions in non-tidal lagoon during ice-coverage – the example of the Vistula Lagoon, the Baltic Sea. Book of abstracts of the 7th European Coastal Lagoons Symposium. Murcia (Spain), 01-04 March 2016. Compobell, Murcia, p. 52-53.

8. Килесо, А.В., В.А. Гриценко. 2017. Орографические риски донной топографии и вдольсклоновые плотностные течения. Комплексные исследования Мирового океана. Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Москва, 10-14 апреля 2017 г. [Электронный ресурс]. – Москва: ИО РАН. – Режим доступа:

[http://www.ocean.ru/component/option,com\\_docman/task,doc\\_details/gid,840/Itemid,78/](http://www.ocean.ru/component/option,com_docman/task,doc_details/gid,840/Itemid,78/), свободный. ISBN 978-5-9901449-2-7 (РИНЦ)

9. Килесо, А.В., Е.М. Бурнашев. 2017. Орографические риски донной топографии морских берегов Калининградской области. Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Материалы IV Международной научно-практической конференции. Редакционная коллегия: Куижева С.К., Овсянникова Т.А., Беданков М.К., Демина Т.М., Шевякова О.П. Издательство: Индивидуальный предприниматель Кучеренко Вячеслав Олегович. с. 232-234. (РИНЦ)

10. Зуев, О.А., А.В. Килесо, М.Н. Голенко, А.Н. Демидов. 2017. Режим течений в прибрежной зоне Балтийского моря в районе Самбийского полуострова. Труды VI Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование: MARESEDU - 2017". — ПолиПРЕСС Тверь. (РИНЦ)

11. Килесо, А.В., В.А. Гриценко. 2017. Орографические риски прибрежной зоны моря. Геология морей и океанов: Материалы XXII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. V. – М.: ИО РАН. с. 131-136.

12. Килесо, А.В., В.А. Гриценко. 2017. Орографические риски донной топографии для прибрежной зоны моря. Труды Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития». Спб.: Аграф+, с. 253-255. (РИНЦ)

13. Килесо А.В., Гриценко В.А. Особенности структуры и динамики прибрежных вдольсклоновых взвесенесущих потоков штормовой природы // Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере МСП-2018 Сборник трудов

Международного симпозиума. Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Московский университет им. С.Ю. Витте. 2018. С. 180-182. (РИНЦ)

14. Килесо А.В., Гриценко В.А. Орографические риски донной топографии: количественные оценки для прибрежной зоны юго-восточной Балтики // Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». 2018. С. 344-346.

15. Килесо А.В., Гриценко В.А. Геоэкологическая опасность прибрежной зоны Юго-Восточной Балтики // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития : труды III Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 16–17 декабря 2019 года. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2019. – С. 440-442.

16. Килесо А.В., Гриценко В.А. Численное моделирование высокоэнергетических придонных взвесенесущих течений штормовой природы // Морские исследования и образование (MARESEDU-2018): Труды VII Международной научно-практической конференции. Сборник, Москва, 19–22 ноября 2018 года. – Москва: ООО "ПолиПРЕСС", 2019. – С. 138-143.

### **Благодарности.**

Выражаю искреннюю благодарность научному руководителю В.А. Гриценко за помощь на всех этапах исследований, критические замечания и полезные советы, а также коллегам из ИО РАН и БФУ им. И. Канта: Л.А. Жиндареву, И.П. Чубаренко, Б.В. Чубаренко, А.Б. Демениной, В.В. Сивкову – за поддержку и ценные замечания. За предоставленные материалы особо признателен ГБУ КО "Балтберегозащита" и ООО «Морское венчурное бюро».

## ГЛАВА 1. ГЕОГРАФИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной главе будет выполнен обзор классических работ об изменчивости экосистемы прибрежной зоны моря с целью обоснованного выбора объекта исследования. Кроме того, на основе обзора подходов и методов, применяемых при экологических и геоэкологических исследованиях, будет выбрана подходящая методика оценивания геоэкологического состояния экосистемы прибрежной зоны моря.

### 1.1 Физико-географические посылки, основные понятия

Калининградское морское побережье расположено в юго-восточной части региона Балтийского моря. Побережье Калининградской области составляет Калининградский полуостров и две песчаные косы – Куршская и Балтийская. Современное состояние морских берегов и рельефа дна сформировалось в последнюю геологическую эпоху под воздействием исчезновения ледников, эвстатического подъема уровня моря (1,5 - 2,0 мм/год) и тектонического опускания территории юго-восточной части Балтийской синеклизы (2 мм/год).

Известно [Прибрежная зона моря..., 2004; Жиндарев, 1997; Бабаков, 2003], что сегодня главными факторами, определяющими процессы формирования пляжей морских берегов Калининградской области являются скопления песка на подводном склоне (в пределах зоны ветро-волнового воздействия, т.е. до глубин в 10-15 м) и вдольбереговые потоки песка. Данные промеров свидетельствуют об отсутствии дефицита песчаного материала вдоль западного побережья Калининградского полуострова и Вислинской косы, что находит отражение в существовании здесь развитых (шириной более 50 - 100 м) песчаных пляжей. Подводные скопления песка имеются на северном участке только западнее м. Гвардейский и в основании подводных террас на глубинах 15 - 20 м, а также мористее пос. Янтарный, где наблюдается обширный конус выноса вскрышных пород, от ранее сброшенных в море пульпы из карьеров Янтарного комбината.

Вместе с тем, имеется обширные участки пляжей с частично нарушенным и полным исчезновением песка. Очевидно, что экстремально большая абразия берегового склона дна и самого берега разрушает условия существования природной системы береговой зоны Балтийского моря.

Существующие классические схемы [Зенкович, 1958; Болдырев и Рябкова, 2001; Муселяк, 1988; Леонтьев, 2012; Бабаков, 2003; Бабаков и Чубаренко, 2019], описывающие транспорт песка на побережье, не дают объяснение фактам разрушения берегов. Т.о, проблема описания причин, физико-географических и геоэкологических последствий экстремально больших скоростей разрушения берегов юго-восточной Балтики действительно существует. Однако в такой общей постановке заявленная проблема вряд ли может быть решена. Выполним теперь поэтапную процедуру корректного определения объекта и предмета исследований в контексте уже существующих проблем современного состояния береговой зоны юго-восточной части Балтийского моря.

***О терминологии в береговой зоне моря.*** Обзор различных литературных источников показал, что выделение предполагаемого объекта исследований, т.е. прибрежной зоны моря, не является тривиальной задачей.

В самом деле, с одной стороны, хорошо известно, что берег и какую-то часть дна (склона) шельфа принято называть береговой зоной. Перельман и Касимов [1999], следуя Польшину [1944], вводят терминологию аквальных (супераквальных) и субаквальных ландшафтов. С другой стороны, береговая зона имеет много общих характерных признаков с остальной частью шельфа, таких как: доминирование гидрогенного фактора в переносе взвешенного материала, в основном, терригенного происхождения, и наличие различного рода миграций осадочного материала. Т.о, прибрежная зона моря должна рассматриваться в контексте неразрывной связи с другими компонентами природной системы: ветровая нагрузка, морфоструктура дна, очертания и ориентация береговой линии, структура ветровой нагрузки и др. [Айбулатов, 1982, 1990].

С другой стороны, как оказалось [Хабидов и др., 1999], универсального определения границ прибрежной зоны моря до сих пор не выработано. Долгое время в работах [Айбулатов, 1990; Свиридов и др., 1997; Онищенко, Косьян, 1989; Анцыферов, 1973; Пыхов, Дачев, 1981; Лонгинов, 1963] в качестве морской границы береговой зоны использовались критерии резкой смены типов осадков, характеристики крупности осадков, характер уклона дна или, например, глубину, равную  $1/2$  длины волны или 10 высотам волн.

Е.М.Емельянов [1986, 1998] предложил для описания структуры прибрежной зоны моря набор барьерных зон - гидромеханической, нерегулярного обрушения волн и внешней границы вдольбереговых течений. Н.А. Айбулатов [1990] предлагает считать «морской границей прибрежной зоны моря район дна с резким перегибом поперечного

профиля, определяющим переход к континентальному склону материковой окраины, океана, моря». Таким образом, большое количество научных [Бровко, 1990; Реймерс, 1990; Долотов, 1996; Сафьянов, 2002] исследований показали, что ни одно из всех перечисленных выше определений не является универсальным.

Дмитриевым В.В. [Дмитриев, 2000] введено также понятие *водной геосистемы*, «под которой понимается фундаментальная структурная единица географического ландшафта, объединяющая в себе геоморфологические, климатические, гидрологические природные геокомпоненты и живые организмы на определенном участке водной поверхности Земли. В состав водной геосистемы входят водные экосистемы, абиотическая среда которых характеризуется определенным сочетанием элементов гидрологического режима и химического состава вод, особой морфометрией (батиметрией) и климатическими параметрами».

Совокупность приведенных выше определений и обстоятельств позволила Е.И. Игнатову предложить концепцию *«береговой морфоструктуры»*, как единства и взаимно обусловленности компонент прибрежной зоны моря [Игнатов, 2004]. Рассмотрим теперь более подробно эту концепцию, имея ввиду ее возможное использование в исследовании береговой зоны Балтики.

*Береговые морфосистемы.* Исходной посылкой Е.И. Игнатову послужил факт широко применения системного анализа при исследовании разномасштабных природных систем. Часто, при комплексном изучении зоны «суша-море» в разных работах использовались понятия геосистема, экосистема или геоэкосистема. Однако, четкого описания границ, структуры, процессов, происходящих в исследуемых природных системах, не приводится.

При решении геоморфологических задач, связанных с развитием эрозионных процессов в бассейнах рек, было введено понятие морфосистем [Симонов, 1972].

В итоге, Е.И. Игнатов [Игнатов, 2005] предложил понимать «под *береговой морфосистемой* часть береговой зоны и прилегающей суши, морфологически выраженной как единое целое, отделенное от других частей некоторыми барьерами, характерными литодинамическими или гидродинамическими барьерами».

*Береговые морфосистемы* — это комплексы форм рельефа абразионно-аккумулятивного, аллювиально-морского или денудационного типа и компоненты энерго-массо-обмена, находящиеся в локальном единстве своего развития. Они могут

включать в себя водоразделы, склоны и тальвеги, водотоки, мысы, бухты, долины рек, дельты и морские террасы, клиф, бар или пляж полного профиля.

В качестве пространственных границ береговых морфоструктур со стороны суши, часто принимают, например, высоту штормового заплеска, искусственные препятствия, расчленяющие потоки наносов и др. Со стороны моря границу береговой морфосистемы обычно принимают, как глубину волновой базы. Нижняя граница также зависит от характера осадочного слоя и величины слоя штормовой переработки.

Литодинамические процессы, обуславливающие процессы рельефообразования в надводной и подводной частях, наряду с лимитирующими факторами, такими как, ветро-волновое воздействие, потоки наносов, характер береговой линии, определяют существование береговой морфосистемы. Уклон подводного берегового склона, характер наносов, донных осадков и источники их поступления, наличие характерных форм рельефа определяется состоянием береговой морфосистемы. Состояние береговой морфосистемы в любой момент времени определяется как природными факторами, а именно: волновой энергией и энергией прибрежных течений, потоками наносов, морфологией подводного склона, характером пород, слагающие берега, так и антропогенными факторами, такими как: промышленно-хозяйственная и рекреационная деятельности.

**Вывод.** Обзор существующих концепций описания элементов прибрежной зоны моря показал, что концепция береговой морфосистемы Е.И. Игнатова, которая позволяет пространственно локализовать объект изучения без потери совокупности физико-географических факторов, определяющих эволюция изучаемой природной подсистемы может быть частью методологической основы для заявленной в диссертационной работе исследования процессов разрушения берегов юго-восточной Балтики.

## **1.2. Взаимоотношение географических и геоэкологических исследований.**

Хорошо известно, что прибрежная зона моря изначально рассматривалась и анализировалась как объект физической географии [Зенкович, 1958; Сафьянов, 1978; Емельянов, 1986; Жиндарев и др., 1998]. В данном пункте будут приведены основные определения объектов исследований в рамках классических физико-географических подходов. Будут также перечислены методологические подходы к исследованиям природных объектов, которые помогут более четко определить как предмет

предполагаемого геоэкологического исследования береговой зоны моря, так и структурно-функциональный подход, способный обеспечить полноту анализа и получение совокупной искомой его геоэкологической оценки.

**Географические основы.** Общеизвестно, что суть физической географии заключается в констатации взаимосвязи и взаимообусловленности всех *природных географических компонентов природных систем*, что естественным образом привело к концепциям *географической оболочки* и *природного территориального (географического) комплекса*, который А.Г. Исаченко [1991] определил как «*пространственно-временную систему географических компонентов, взаимообусловленных в своем размещении и развивающихся как единое целое*».

Ранее, еще в 1963 году В.Б. Сочавой [Сочава, 1963] было сформулировано понятие *геосистемы*, ставшее одним из ключевых понятий физической географии, и, одновременно, фундаментальной структурной единицей географического ландшафта.

Как известно [Реймерс и Яблоков, 1982], под «геосистемами принято понимать любые физико - географические образования от фации до географической оболочки Земли. При этом подразумевается равнозначимость биотических и абиотических составляющих геосистемы».

В настоящее время *термины геокомплекс, природно-территориальный комплекс и ландшафт*, принадлежащие к одному семантическому полю, часто используются как синонимы [Исаченко и др., 1999].

Объектами исследования специализированных отраслей географии, изучающих абиотические компоненты природных систем, обычно являются *геокомплексы* или *геосистемы* разных масштабов и уровней иерархии. Обычно анализируются изменчивость их структуры, особенности биогеохимических процессов, устойчивость к различного рода возмущениям и реакция на них и т.п.

**Взаимоотношение географии и геоэкологии.** Рассмотрим теперь особенности геоэкологического подхода к изучению природных систем (геосистем, природно-территориальных комплексов, ландшафтов) на фоне ранее сформулированных определений физической географии и имея ввиду предполагаемые цели геоэкологического исследования *береговых морфоструктур* юго-восточной Балтики.

Экологическая система [Tansley, 1935] делится на две составляющие: биотическую и абиотическую. Известно также, что трансформация экосистемы прибрежной зоны моря



происходит в рамках естественной эволюции, и под прямым или косвенным воздействием внешних природных и антропогенных факторов.

Сегодня, под геоэкологией принято понимать [Айбулатов, 2004; Лымарев, 2004] междисциплинарное направление в географии, которое в своей структурной организации опирается на геологические, гео- и гидро- физические науки, физику моря и приземного слоя атмосферы, биологические науки.

Специфика геоэкологического подхода к анализу прибрежной зоны моря определяется изучением ее абиотической и биотической составляющих и происходящих в них изменениях в контексте их возможного влияния на биоту морских вод. Очевидно, что геоэкология прибрежной зоны и прибрежная океанография имеют один и тот же объект изучения и взаимно дополняют друг друга в процессе комплексного исследования и получении общих интегральных оценок и закономерностей этой геосистемы.

В каком-то смысле геоэкологические задачи могут быть отнесены к классу оптимизационных, поскольку их итогом могут стать рекомендации для рационального природопользования в прибрежной зоне моря. К хорошо известным примерам практической геоэкологии могут быть отнесены процедуры оценки воздействия на окружающую среду.

### ***Особенности геоэкологии береговой зоны океана***

В силу своих физико-географических характеристик геоэкология барьерной зоны «суша-море» должна, может и имеет ряд специфических особенностей. Действительно, среди природных провинций морей и океанов береговая зона занимает особое место. В ней сосредоточена значительная часть всех возобновляемых биологических ресурсов и в ней же проживает значительная часть человеческого общества.

Однако, поверхности суши и дна моря в значительной мере вовлечены в сферу хозяйственной деятельности человека по использованию минеральных ресурсов береговой зоны. Материковый сток, несущий в себе множество загрязнений, и различного рода инженерные сооружения на берегах и в прибрежных водах оказывают существенное воздействие на условия береговой среды. В совокупности это порождает трансформацию ранее сложившихся потоков вещества и энергии в природных системах прибрежной зоны моря. Иногда антропогенное воздействие на береговую среду порождает изменения со скоростями, исключая возможность приспособления биосферы.

Очевидно, что классический географический подход оценки изменчивости прибрежной зоны моря, включающий в себя изучение лишь ее физико-географических

(абиотических) параметров в условиях растущего антропогенного воздействия и изменений климата, становится недостаточным и порождает необходимость применения более широкого, комплексного, в том числе и геоэкологического подхода к анализу особенностей эволюции прибрежных зон [Долотов, 1996; Бровко, 1990; Сафьянов, 2002].

Как отклик на возникшую ситуацию Н.Ф. Реймерсом [1990] было сформулировано следующее определение: «Геоэкология - раздел экологии (по другим воззрениям - географии), исследующий экосистемы (геосистемы) высоких иерархических уровней - до биосферы включительно». К этому определению близко понимание предмета геоэкологии В.И. Осинным, В.Т. Трофимовым, Д.Г. Зилингом, Т.И. Аверкиной и рядом других исследователей.

В настоящее время принято считать, что *«объектом и предметом геоэкологии прибрежной зоны»* (побережье, берег, шельф) являются абиотическая оболочка экосистемы и ее изменения под влиянием природных и антропогенных факторов как многокомпонентной, иерархично построенной, динамичной системе с многоуровневыми процессами саморегулирования».

В геоэкологических задачах прибрежной зоны выделяются такие как: выявление механизмов и масштабов природных и антропогенных воздействий на литосферу, гидросферу прибрежной зоны моря и прилегающий атмосферный слой, разработку критериев дифференциации влияния природных и антропогенных факторов и оценка их взаимовлияния; разработка методологии экологического нормирования антропогенного воздействия на экосистемы прибрежной зоны моря и др.

### *Эколого-географическое оценивание геоэкосистем: объективный подход и количественные оценки.*

Одна из ключевых проблем описания экологического состояния естественных природных и природно-техногенных систем заключается в разработке и использовании объективного научного подхода к количественным оценкам их состояния и ответной реакции на различные виды антропогенного воздействия, включая анализ устойчивости природных систем как многокомпонентной и многосвязной системы.

Для выполнения геоэкологического анализа состояния любой природной системы крайне важен адекватный выбор методологии исследования (или перспективы, способной обеспечить упорядочивание или иерархизацию взаимосвязей) для корректного понимания

всех структурно-функциональных зависимостей и связей, определяющих и ответственных за целостность и стабильность существования природной системы.

К сожалению, на сегодняшний день не существует как универсального геоэкологического подхода к описанию изменчивости различных природных систем, так и единства взглядов исследователей на геоэкологическую оценку их состояния.

Совокупность проблем, связанных с определением норм экосистем, их устойчивости, изучением их трансформаций под прессом антропогенных воздействий и нахождением предельных величин нагрузок, Дмитриевым В.В. и Фруминым Г.Т. [2004], вслед за другими авторами, был обозначен термином *«экологическое нормирование»*.

Данный подход направлен на диагностический анализ природного объекта, целью которого является выявление его свойств и получение количественных оценок выделенных параметров. Таким образом, формируется понятие «вектора состояния системы» или «портрета» природной системы, как совокупности упорядоченных переменных объекта, отражающих его основные свойства [Дмитриев и Фрумин, 2004]. Получается, что состояние природной системы в текущий момент времени, можно представить вектором или точкой в многомерном пространстве всевозможных состояний системы.

Отметим, что данный подход объективен за счет использования инструментальных измерений и после обезразмеривания показателей представляет собой создание цифрового образа природной системы в многомерном арифметическом пространстве. Еще одним важным достоинством данного подхода является появляющаяся возможность использования всего объема физико-математических знаний и технологий в изучении природных систем.

Например, обратим внимание также, что данный подход хорошо позволяет проинтерпретировать понятие устойчивости развития геосистем, ставшее в последние годы одним из наиболее обсуждаемых понятий.

### **1.3. Экологическое нормирование состояния природных систем**

Проблема геоэкологического оценивания природных систем достаточно давно находится в фокусе внимания исследователей и к настоящему времени сформулированы подходы к расчетам предельно допустимых экологических нагрузок. Очевидно, что геоэкологическое оценивание и нормирование призвано решить проблемы оптимизации

взаимодействия человека и природы. В своей работе В.В. Дмитриев предложил [Дмитриев и Фрумин, 2004], что в самом общем виде геоэкологическое нормирование должно предусматривать:

«учет множественности путей воздействия и восстановления компонент биосферы при оценке последствий антропогенного воздействия на геоэкосистему»;

«поиск «критических» звеньев геоэкосистемы и факторов воздействия на них»;

«развитие подходов к нормированию воздействий с учетом их влияния на природные системы».

Понятие «норма» широко применяется в научном знании. Естественным дополнением к норме являются процедуры идентификации и оценки отклонения состояния геоэкосистемы от «нормального» состояния. Необходим также поиск и формулировок критериев патологического или аномального состояния геоэкосистем. В настоящее время существует несколько основных подходов к определению норм [Воробейчик и др., 1994]:

**1. Статистический.** Данный подход заключается в выборе за нормальное состояние системы некоторое среднее характерное значение. Например, в качестве нормы выбирается наиболее часто наблюдаемое значение или среднее многолетнее значение параметра.

**2. Теоретический.** Нормальное состояние определяется из теоретических выкладок. В качестве нормального состояния системы, описываемое некоторым функционалом, принимается теоретически обоснованное значение.

**3. Экспертный.** Норма определяется группой экспертов. В данном методе минимизируется степень научного подхода при определении нормы. Обоснование нормы при этом переводится в плоскость репрезентативности знаний экспертов.

**4. Эмпирический.** Данный подход подразумевает определение нормы по результатам проведения опытов. Эмпирический подход часто применяется при проведении токсикологических экспериментов (контроль - группа организмов, не подвергающихся исследуемому воздействию). В этом случае норма выступает в качестве вспомогательного рабочего понятия.

### ***Методология экологического нормирования***

Очевидно, что при определении допустимого негативного влияния на геоэкосистемы требуется рассматривать влияние не на конкретные отдельные ее

компоненты, а на весь комплекс в целом. При этом понятие стабильности или устойчивости геоэкосистем выходят на первый план [Израэль, 1984].

На сегодня существует несколько методологических подходов к оценке изменчивости состояния природных геоэкосистем.

#### ***Концепция ассимиляционной емкости Ю.А. Израэля и А.В. Цыбань***

По определению, цитируя Ю.А. Израэля и А.В. Цыбань [1988], «ассимиляционная емкость водной экосистемы  $A_i$  по данному загрязняющему веществу  $i$  (или суммы загрязняющих веществ) и для  $m$ -й экосистемы — это максимальная динамическая вместимость такого количества загрязняющих веществ (в пересчете на всю зону или единицу объема водной экосистемы), которое может быть за единицу времени **наконтено, разрушено, трансформировано** (биологическими или химическими превращениями) и **выведено** за счет процессов седиментации, диффузии или любого другого переноса за пределы объема экосистемы без нарушения ее нормального функционирования».

При реализации данного подхода динамику негативного воздействия для геоэкосистемы описывают, например, классическими дифференциальными моделями [Владимиров, 1967], либо набором простых полуэмпирических алгебраических соотношений.

Расчет данных параметров позволяет наиболее репрезентативно описание потенциальное негативное воздействие по сравнению с классическими подходами расчета ПДК.

#### ***Биогеохимический подход С.А. Патины***

Данный подход [Патин, 1979] подразумевает определение нормального состояния геоэкосистемы из нормального закона распределения параметров, описывающих ее состояние.

#### ***Структурно-функциональный подход В.В. Дмитриева.***

Подход **В.В. Дмитриева** [Дмитриев и Фрумид, 2004], цитируя, «основан на использовании многокритериального параметрического представления *портретов геоэкосистем, норм состояния и норм воздействия* на геоэкосистемы на основе мониторинговых данных или результатов имитационного моделирования».

В качестве вводного замечания для описания основных идей структурно-функционального подхода В.В. Дмитриева, реализовавшего, фактически, типичный для

математики подход к анализу и репрезентативному моделированию природной системы, локализованной в пространстве и обладающей внутри себя набором связей и взаимозависимостей, напомним об уже упоминавшемся выше понятии «*вектора состояния системы*», как совокупности набора значений параметров, отражающих наиболее важные свойства природной геосистемы.

Данный подход позволяет идентифицировать *состояние природной геосистемы* с вектором или «*портретом*» природной системы. Причем, поскольку геосистема имеет для каждого момента времени вполне конкретное состояние, то множество *состояний* для последовательных моментов времени образуют некоторую траекторию, отображающую процесс эволюции системы во времени в *пространстве состояний* геосистемы.

Очевидно, что в момент времени, когда принимается (или – происходит) воздействия на геосистему, состояние данной системы является исходным (или – начальным) условием, начиная с которого необходимо выполнять процедуры анализа изменчивости состояния геосистемы. Знание начального состояния позволяет в соответствии с имеющимися представлениями о поведении системы под тем или иным воздействием предсказать *поведение* геосистемы в будущем. *Конечное* состояние системы может рассматриваться как итог (или результат) принимаемого (происходящего) воздействия.

Т.о., подход В.В. Дмитриева опирается на совокупность иерархически связанных понятий меры, нормы, аномалии (патологии), геэкологического нормирования и оценивания.

Учитывая фундаментальную важность граней походов В.В. Дмитриева для работы перечислим на аннотационном уровне их еще раз. Итак, [Дмитриев и Фруммин, 2004] понятие нормы, которое является количественной мерой, определяет предел, за которым изменение параметра приводит к значительному изменению характера явления или объекта. Оценка состояния геосистемы выполняется с помощью сопоставления ее свойств с нормами параметров. Важным является принцип множественности норм, заключающийся в формировании классификации для оценки свойств или компонент геосистемы. В каждом классе определяется норма для данного класса и определяются граничные условия. Т.о. анализ полученных параметров геосистемы позволяет

выявить их критические значения, при которых система сохраняет устойчивое состояние и структурно-функциональную целостность (рисунок 1.1).

### ***Выводы из главы***

Выбранная в работе тема – **«Влияние рельефа подводного берегового склона на геоэкологическое состояние береговой морфосистемы (на примере Калининградского полуострова)»** полностью соответствует задачам геоэкологии обозначенных ВАК, например, «Глобальные и региональные экологические кризисы – комплексные изменения окружающей среды, приводящие к резкому ухудшению условий жизни и хозяйственной деятельности. Геоэкологические последствия природных и техногенных катастроф» и др.

В самой общей постановке, объектом диссертационного исследования стала природная система береговой зоны юго-восточной Балтики, находящаяся в современных условиях изменчивости климата и роста антропогенного давления. Анализ публикаций позволил очертить границы геосистемы и выделить предмет исследования – изменчивость береговых морфосистем (по Исаченко) или морских геосистем (по Дмитриеву), включающих в себя, собственно, пляжевые пространства и прибрежные воды, ограниченные береговой линией и рельефом дна, и находящиеся под ветро-волновым воздействием.

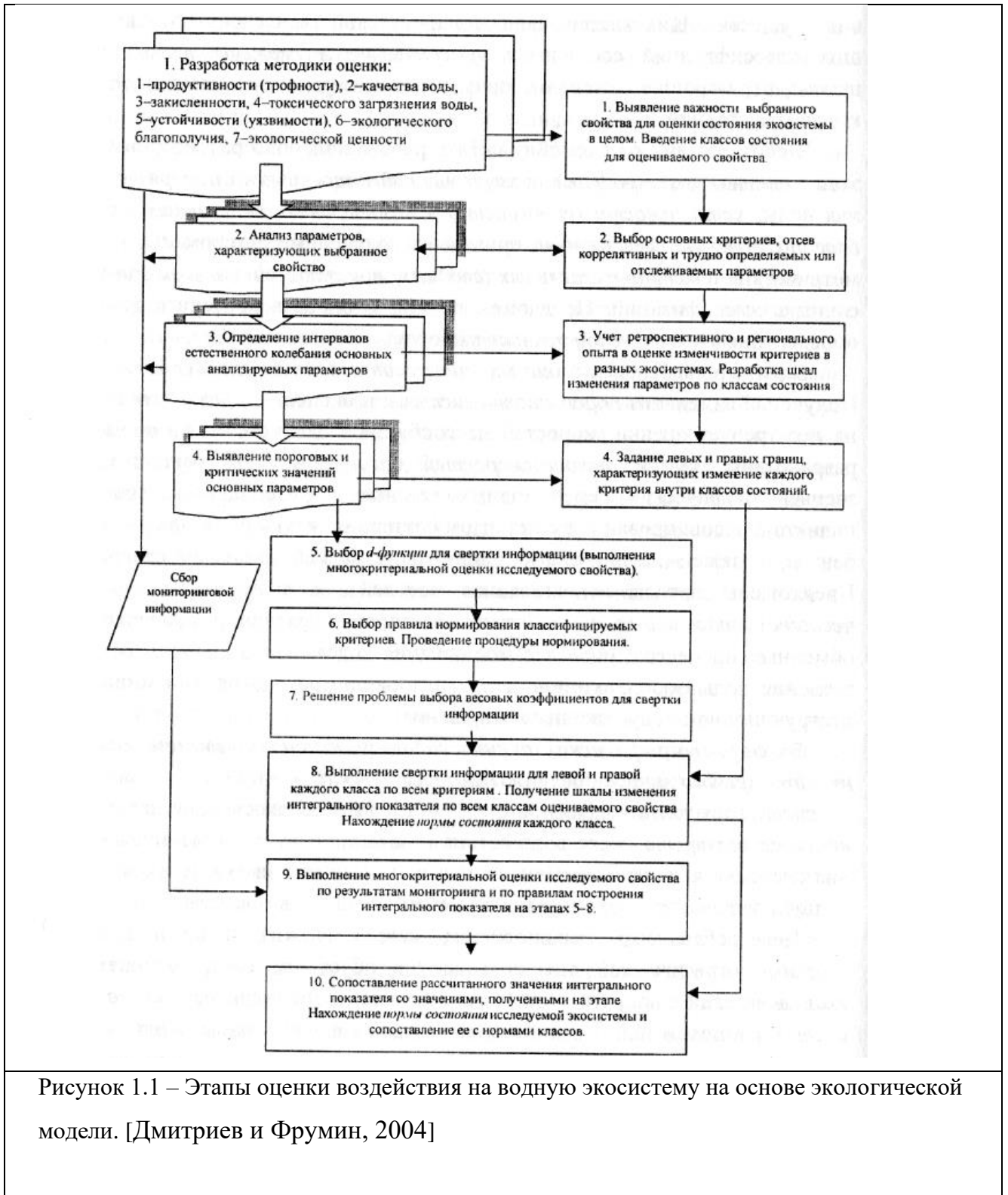


Рисунок 1.1 – Этапы оценки воздействия на водную экосистему на основе экологической модели. [Дмитриев и Фрумин, 2004]



## **ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ ОРОГРАФИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ДЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ БЕРЕГОВОЙ МОРФОСИСТЕМЫ**

В главе будет обоснован факт существования опасности нового типа для устойчивости геоэкологического состояния частей береговой морфосистемы Калининградского полуострова на основе обзора результатов натуральных экспериментов по морфолитодинамике морской прибрежной зоны юго-восточной Балтики в штормовых условиях, а также используя результаты численного моделирования.

### **2.1 Морфолитодинамика морской прибрежной зоны Калининградской области**

Вопросам морфолитодинамики морской прибрежной зоны Калининградской области посвящено достаточное количество работ [Атлас ..., 2010; Балаян и Бабаков, 1989; Бойнагрян, 1966; Жаромскис, 2000; Лашенков и др., 1990; Шуйский, 1982], во многих из которых констатируется наличие квазистационарного во времени интегрального вдольберегового потока наносов, который, собственно, и обеспечивает устойчивое существование наших морских берегов. Однако 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 поперечной миграции донных осадков из прибрежной зоны на глубину рассматривались эпизодически, что, в частности, не позволило объяснить природу возникновения значительных скоплений песка на глубинах от 30 м и глубже [Атлас ..., 2010].

Подробный анализ [Бабаков, 2017] существующих схем вдольбереговых потоков наносов в районе Калининградского полуострова показал, что до сих пор нет единого представления о структуре потока наносов. Приведенный обзор различных критериев (ссылки из статьи), натуральных методов исследования, расчетных методик, а также характер вдольберегового распределения морфологических, литологических и сейсмических особенностей прибрежной зоны, не дают однозначного ответа на данный вопрос.

Хорошо известно также, что поступление осадочного материала в береговую зону моря Калининградской области происходит, главным образом, в результате абразии подводного склона и размыва последствий обрушения берегов. Соотношение вкладов

каждой составляющей непостоянно и зависит от конкретного геологического и геоморфологического строения берега. В связи со сложностью натуральных исследований динамики наносов в прибрежной зоне Балтийского моря, особенно в штормовой период, можно выделить лишь несколько работ, целью которых являлось подробное описание данных процессов.

Одним из первых комплексным международным исследованием гидро и литодинамических процессов в прибрежной зоне Балтийского моря являлась серия натуральных экспериментов «ЕКАМ-73» [The Interaction of the Sea..., 1975], «Любятово-74» [Properties and..., 1976] и «Любятово-76» [Береговые процессы..., 1978]. Основной задачей эксперимента «Любятово-76» было изучение взаимодействия гидросферы и литосферы в зоне их контакта, в частности описание динамики движения донных наносов под действием волн и течений.

В работе [Пустельников, 1978] приведены характеристики основных литологических показателей взвешенных наносов в придонном 2-х метровом слое воды вдоль профиля дна с интервалами глубин от 3,5-18,5 м в районе Любятово во время шторма. Анализ данных показал, что в зоне валов исследуемого профиля распределение наносов определяется взмучивание и размывом донных отложений, перемешиванием, поступление эолового материала с пляжа, а также перенос осадков вдольбереговыми течениями. Отмечается, что наличие и увеличение содержания во внешней зоне профиля (в интервале глубин от 3-26 м) глауконита и кремнистых компонентов, являющихся индикаторами размыва древнечетвертичных и мезо-кайнозойских коренных отложений дна, говорит о перемещении размытого материала вглубь моря (рисунок 2.1). Данное явление, по-видимому, связано с кратковременными притоками и оттоками масс воды перпендикулярно берегу. В зависимости от характера, скорости и направления течений наиболее грубый песчаный, и, частично, гравийный материал выносится в струе придонного потока вниз по исследуемому профилю, где осаждаются на глубинах от 14 м до 20 и более метров. Автор предполагает, что алевритово-пелитовый материал, который является более легким, вовлекается в поверхностную струю вдольбереговых и дрейфовых течений и поступает в глубоководные зоны седиментации.

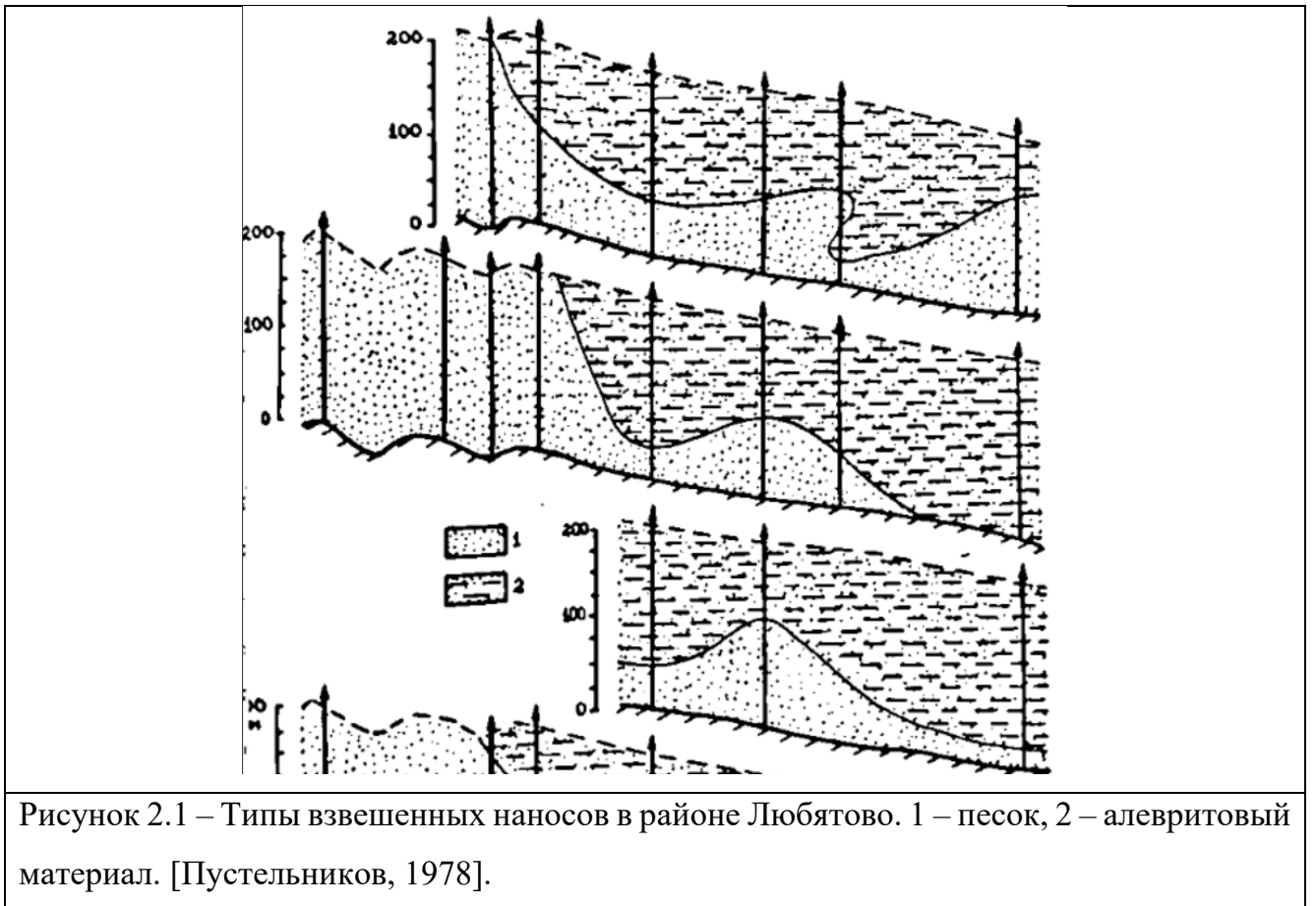


Рисунок 2.1 – Типы взвешенных наносов в районе Любятово. 1 – песок, 2 – алевритовый материал. [Пустельников, 1978].

Изучение строения и кратковременной изменчивости подводного берегового склона [Гижеевски и др., 1978], которое было выполнено также в рамках эксперимента «Любятово-76», позволило получить зависимость между коэффициентом структуры шторма и характером деформации дна. Однако отмечается, что отклонение от полученной зависимости наблюдается лишь на отдельных участках дна, что связано с деятельностью волновых течений, особенно, разрывного течения. Авторы показали, что разрывные течения - «турбидиты», действующие при сильном волнении, формируют неслоистые толщи осадков.

Еще одним важным результатом [Анцыферов и др., 1978] является факт фиксации во всех наблюдениях на глубине 18,5 м взвешенного песчаного и крупноалевритового материала. Причем большие концентрации наблюдались даже при не очень сильном волнении (рисунок 2.2).

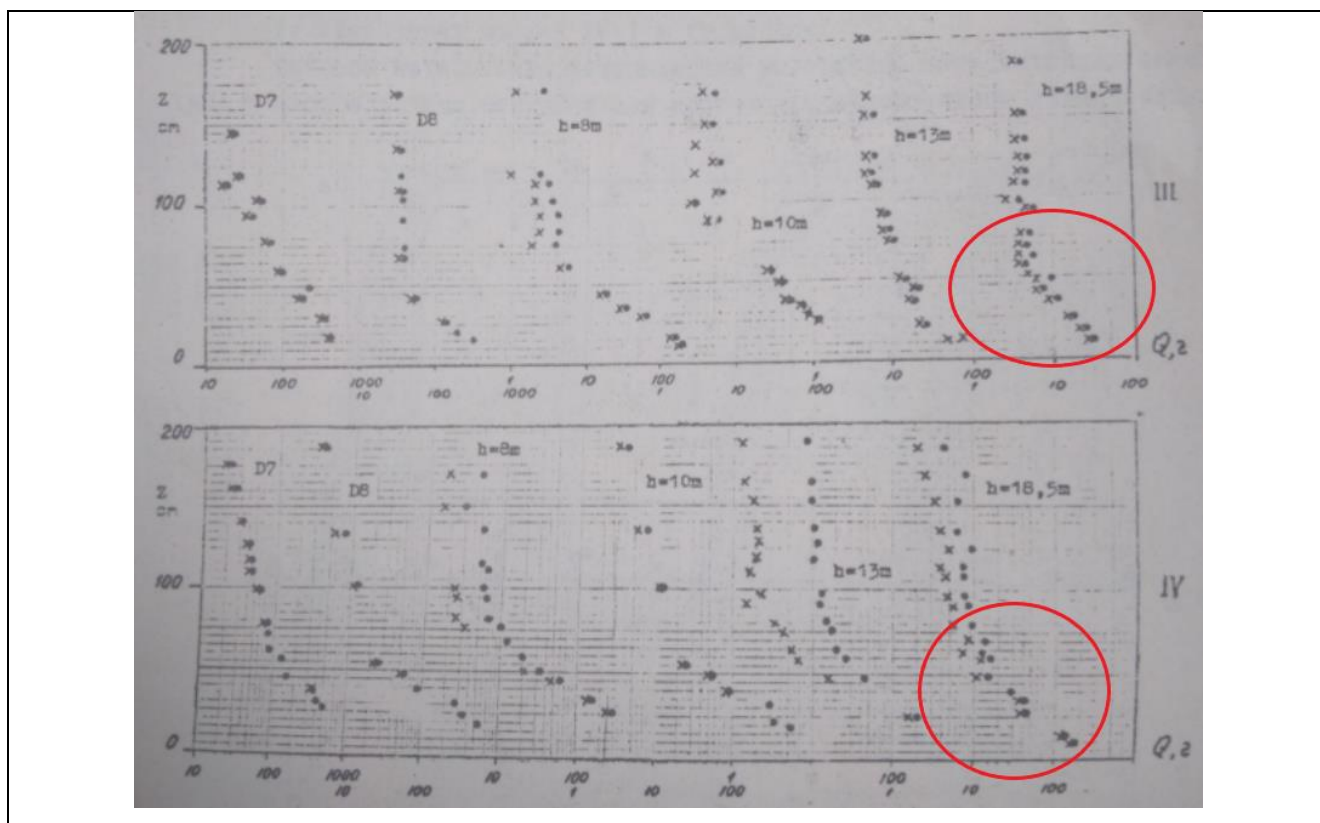


Рисунок 2.2 – Распределение над профилем подводного склона массы взвешенных наносов в районе Любятово [Анцыферов и др., 1978]. Красным показаны повышенные концентрации взвешенного материала на глубине 18,5 м в придонном слое при не очень сильном волнении.

Результаты натуральных экспериментов [Жиндарев, 1997] по исследованию литодинамики береговой зоны расчлененных отмелых побережий бесприливных морей, которые проводились на побережье юго-восточной Балтики, показали, что динамика наносов на подводном склоне и пляже полностью контролируются особенностями распределения волновой энергии и придонных течений. Анализ проб донных отложений показал, что полосы мелкозернистого песка, которые располагаются вдоль уреза на протяжении всего участка за исключение мысов, в пределах бухт расширяются и уходят на глубины 15-16 м (рисунок 2.3). Данные участки выноса песка соответствуют слабовыраженным ложбинам, которые, по мнению автора, маркируют пути движения масс воды, направленных от урезов в сторону моря. В ходе исследования не подтвердилось представление о том, что разрывные течения существуют только до зоны подводных валов. Закономерности распределения донных грунтов показали, что

разрывные течения могут распространяться до глубин 10-15 м и более, даже при слабых волнениях.



Рисунок 2.3 – Распределение донных отложений в Светлогорской бухте (юго-восточная Балтика) [Жиндарев, 1997]. Красным показано место ухода мелкозернистого песка на глубины 15-16 м.

Прямым доказательством существования придонных разрывных течений, которые способны выносить наносы на глубины 12 м и более, являются опыты с люминисцентными трассерами [Жиндарев, 1997] (рисунок 2.4). Обнаружена тенденция, что в условиях расчлененного отмелого берега даже при умеренных волнениях рыхлый материал, взвешенный в двухметровом придонном слое воды, выносится в сторону моря. Таким образом, разрывные течения способны безвозвратно уносить смытый с пляжа и подводного склона материал, что приводит к дефициту наносов в данной области.

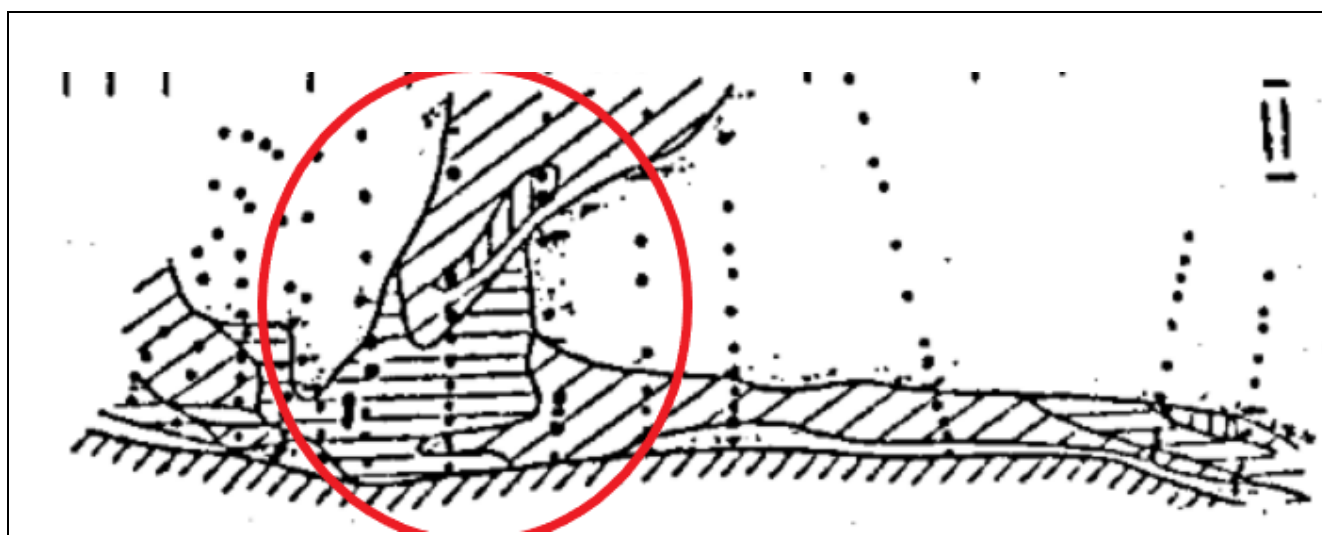


Рисунок 2.4 – Схема разноса люминисцентного трассера в одной из бухт юго-восточного побережья балтийского моря [Жиндарев, 1997]. Красным показано, что трассер, окрашенные частицы уносились локально на глубины до 15 м.

Во время намыва искусственного песчаного пляжа в Филинской бухте (1987-1990 гг.) были выполнены наблюдения за количеством взвешенного материала в прибрежных водах вдоль протяженного участка подводного берегового склона [Бабаков, 2003; Блажчишин и др., 1998]. Измерения производилось на шести стационарных створах в диапазоне глубин от 5 до 20 м на пяти горизонтах (20, 40, 60, 100 и 150 см) от дна. На всем обследуемом побережье фиксировалось преобладание концентрации взвешенного материала в придонном полуметровом слое. На мелководных станциях с глубиной ~ 5 м от поверхности дна и до горизонта 0,4-0,6 м концентрация взвеси быстро падает и далее слабо уменьшается в более высоких от дна слоях. С удалением от берега вертикальные неоднородности в содержании взвешенного материала уменьшаются.

В верхней части подводного склона в окрестности зоны первого обрушения волн (глубина 5-6 м) взвесь обычно состояла из мелкозернистой песчаной фракции с медианным диаметром 0,15-0,18 мм [Блажчишин и др., 1998]. Ниже по склону дна мелкий песок замещался крупным алевритом (0,05-0,1 мм) сначала на удаленных от дна горизонтах (0,6-1,5 м), а за пределами изобаты 10 м – и в придонном слое. Глубже 8-10 м наблюдалось заметное уменьшение объема взвешенного материала.

В период шторма средней силы в 5 см от дна содержание взвеси менялось от 0,5 до 50-70 г/л, при осредненном значении около 10 г/л [Басиньский и др., 1978]. Средние за месяц значения концентрации взвеси в придонных слоях на севере Калининградского полуострова достигали 15 мг/л в зоне обрушения волн, снижаясь до значений 0,5-4,5 мг/л на глубинах 13-15 м [Бабаков, 2003; Блажчишин и др., 1998].

Гидродинамические процессы, которые являются основным фактором, влияющим на перемещение взвешенного материала, зависят, в основном, от интенсивности ветро-волнового воздействия и угла подхода волн к линии берега. Продольная составляющая ветро-волнового воздействия порождает вдольбереговой поток, а поперечная к берегу – нагон вод, наклон уровня водной поверхности и компенсационный отток вод в сторону моря в придонном слое. Интенсивность вдольберегового и поперечного переноса взвеси меняется от участка к участку и определяется изменяющейся силой и углом подхода ветра, величиной нагона, а также морфологическими особенностями подводного берегового склона и береговой линии [Кнапс, 1968; Леонтьев, 2008; Лонгинов, 1963]. На

отмелых берегах Балтийского моря регулярно фиксировался постоянно действующий и непрерывный вдоль берега придонный компенсационный отток [Бабаков, 2003].

Известно [Бабаков, 2003; Леонтьев, 2008], что в направлении открытого моря скорость придонных течений в штормовых условиях быстро ослабевает. Экстремальные значения скорости у северного побережья Калининградского полуострова наблюдались в зоне обрушения наиболее крупных волн (глубина 4-5 м) и достигали 120-150 см/с. На глубинах в 15-20 м придонные течения не превышали уже 30 см/с, сохраняя в период штормов устойчивую вдольбереговую ориентацию. В период типичных штормов устойчивые вдольбереговые придонные течения прослеживались до глубин в 20 м, а в период максимального развития косоподходящих штормовых ветров они достигали 30 метровой глубины. На северном побережье Калининградского полуострова у м. Отрадный на глубине 36 м эпизодически фиксировались усиления течений до 55 см/с [Бабаков, 2003]. Отметим, что все эти измерения выполнены на малом числе створов и в условиях выровненного вдоль изобат рельефа дна. Следует отметить, что угол наклона дна является вторичным фактором в данном процессе [Бабаков, 2003].

Однако, множественные факты, свидетельствующие о наличии переноса взвешенного материала на большие глубины, позволяют утверждать о наличии спорадически возникающего механизма приводящий в действие данный перенос. В работе [Жиндарев, 1997] данный механизм объясняется действием разрывных течений, возникающих в результате нагона воды.

## **2.2 Взвесенесущие течения штормовой природы**

Придонные плотностные или гравитационные течения в Мировом океане представляют собой потоки более плотной воды, распространяющиеся вблизи дна. Такого рода течения обычно разделяют на два типа: термохалинные и взвесенесущие. Первый тип течений возникает вследствие разницы температуры или солености водной массы течения и окружающей ее воды. Во втором типе течений разность в плотности определяется наличием взвешенного материала.

Главной особенностью гравитационных течений является слабое перемешивание через границу раздела вследствие сложной структуры турбулентности в потоке. Благодаря этому эти течения могут распространяться на большие расстояния под влиянием тангенциальной составляющей силы тяжести и градиента давления.

Большое количество актуальных практических приложений, в которых придонные гравитационные течения играют не последнюю роль, способствовало активному изучению данного явления на протяжении уже двухсот лет. Изучением таких течений занимались многие ученые: [Forel, 1885; Kuenen and Migliorini, 1950; Баренблатт, 1953, 1955; Heezen and Hillister, 1964; Benjamin, 1968; Гришанин, 1969; Сафьянов, 1970; Михайлова, 1971; Баренблатт и Голицын, 1973; Лонгинов, 1973; Шадрин, 1976; Шепард, 1976; Simpson, 1987; Войтов и др., 1989; Пыркин, 1996; Жмур и Назаренко, 1994; Самолюбов и Слугев, 1996; Журбас и Пака, 1997].

В итоге, было сформировано общее представление о структуре течений, феноменологические модели и оценки вовлечения и перемешивания. Однако полного понимания процессов связанных с гравитационными течениями нет.

Концепция взвесенесущих придонных гравитационных течений (турбидитов) впервые была предложена в [Kuenen and Migliorini, 1950]. Ярким примером такого рода течений является речные воды, наполненные взвешенным материалом, выпадающие в озера или моря. За счет большей плотности они распространяются по дну до тех пор, пока основная часть взвеси не осядет.

Взвесенесущие течения - один из важнейших механизмов переноса больших объемов наносов и взвешенного вещества, а также являются причиной формирования крупнейших зон аккумуляции в Мировом океане [Talling et al. 2015]. Взвесенесущие течения чрезвычайно энергонасыщены. На склонах всего лишь порядка  $0.3^\circ$  они могут распространяться со скоростями до 20 м/с [Piper et al. 1999] и являются типичной причиной обрыва подводных коммуникационных кабелей [Carter et al. 2009], а измерительные приборы повреждаются или переносятся на значительное расстояние, что осложняет проведение прямых натуральных измерений [Xu et al. 2004; Puig et al. 2004; Ogstona et al. 2000; см. дискуссию в Talling et al. 2015].

Взвесенесущие потоки могут быть инициированы различными процессами геологической и гидрофизической природы [Piper and Normark, 2009], а также антропогенными воздействиями [Xu et al. 2004]. Они возникают в результате сброса с побережья пресной талой или речной воды с высокой концентрацией взвеси, которая обеспечивает потоку более высокую плотность по сравнению с соленой морской водой [Mulder and Syvitski, 1995; Mulder et al., 1997]. Также под действием штормов, приливов и внутренних волн происходит взмучивание осадков в прибрежных областях и на вершине



подводных склонов [Inman et al., 1976; Shepard et al., 1977; Mulder et al., 2001]. Наконец, взвесенесущие потоки формируются из-за обрушения породы в результате подземных толчков [Schwing et al., 1990; Garfield et al., 1994].

Наблюдения [Puig et al. 2004] говорят о более частом чем ранее ожидалось возникновении суспензионных потоков штормовой природы. Так, усиление выноса осадочного материала в каньоне Ил (Eel Canyon) в большей степени коррелирует с крупными штормами, чем с повышением расхода реки Ил (Eel River) [Puig et al., 2003]. Убедительные доказательства зарождения суспензионного течения под действием штормовых волн даны Puig et al. [2004], на основании данных ADCP и прозрачности с донной станции в прибрежной части каньона Ил (Eel Canyon).

Два течения из четырех, зарегистрированных за 2003 год в каньоне Монтерей совпали со штормами в этом районе [Xu et al. 2004]. Детальные измерения на трех донных станциях дают среднюю скорость продвижения головы суспензионного потока около 170-280 см/с в течение 5-8 часов. Вертикальный масштаб течения составил 50-70м (от дна), авторы отмечают приблизительность этой оценки, сообщая о зарегистрированных на расстоянии 170 м от дна отдельных плюмов мутной воды.

После отрыва от дна взвесь удерживается в потоке турбулентными вихрями. Но даже небольшие концентрации взвеси ( $< 0.1\%$  по объему) могут подавлять турбулентность, что приводит к осаждению взвеси и повышению ее концентрации у дна и еще большему подавлению турбулентности (Baas et al. 2009, 2011; Sumner et al. 2009; Cantero et al. 2012 – цит. по Talling et al. 2015). Показано (Winterwerp 2006), что совместное действие этих двух факторов (турбулентного перемешивания и зависимости скорости осаждения частиц от концентрации взвеси) приводит к сильной зависимости режима течения от начальной концентрации. При небольшом отличии начальной концентрации ( $\pm 0.1$  мг/л) течение приходит к двум различным состояниям, в одном из которых происходит, а в другом не происходит коллапса взвесенесущего течения с образованием тонкого придонного потока высокой плотности.

Основной силой, которая определяет существование и движение взвесенесущих течений, является гравитация. В тоже время, важным параметром, который определяется структуру течений, является угол наклона дна [Hsu, 2004]. Минимальный угол наклона

дна  $\theta$ , который требуется для удержания взвешенных частиц со средней скоростью осаждения  $u_s$ , имеется прямую зависимость с коэффициентом сопротивления  $C_f$  и скоростью осаждением.

$$\sin \theta = \left( \frac{1}{2} \frac{C_f}{Ri} + \frac{u_s}{u_f} \right), \text{ где } Ri - \text{ число Ричардсона, } u_f - \text{ скорость жидкости.}$$

В работе [Bagnold, 1962] рассчитано значение минимального угла наклона дна, при котором взвесенесущий поток сможет распространяться в виде придонного гравитационного потока практически бесконечно. Данное значение составило всего 0.5 градуса. Данное значение было подтверждено экспериментально [Hsu, 2004]. Лабораторный эксперимент подтвердил значение угла наклона дна близкого к 0.5 градусам для потока с взвешенными частичками размера, примерно, 3 микрона. Скорость осаждения частичек составляла 0.004 см/с, а скорость формирующегося взвесенесущего течения составила 12 см/с, число Ричардсона равнялось 1.1.

Таким образом, значимым является факт, что взвесенесущие течения, распространяющиеся по дну с углом наклона 0.5 градусов, получают больше энергии за счет гравитации, чем теряют за счет сопротивления окружающей воды.

В [Завьялов и Жмур, 2010] изучались особенности распространения взвесенесущих потоков вдоль дна при условии интенсивного вовлечения в движение донных осадков. Главным отличием изучаемого течения являлось взаимодействие потока с взвесью, находящейся на дне канала. Было показано, что скорость распространения такого потока остается постоянной практически на всем пути движения. Выдвинутое предположение о том, что основной силой, действующей на течение, является реактивная сила, связанная с вовлечением в движение новых донных осадков, позволило получить простую формулу, описывающую движение такого потока:

$$Fr^2 = \frac{u}{u_n} \frac{\rho}{\rho_b} \sin \alpha$$

где  $u$ ,  $\rho$  – скорость и плотность течения,  $u_n$  – скорость завлечения в движение донных осадков и фоновой жидкости,  $\rho_b$  – средняя плотность донных осадков,  $\alpha$  – угол наклона дна.

Как отмечалось ранее, гидродинамические процессы, которые являются основным фактором, влияющим на перемещение взвешенного материала, зависят, в основном, от интенсивности ветро-волнового воздействия и углом подхода волн к линии берега.

Натурные исследования, нацеленные на изучение особенностей переноса взвешенного вещества в районе каньона Ил (Eel Canyon) в осенне-зимний период в 1999-2000 года [Puig et al., 2003], показали, что основными механизмами, способствующими событиям крупного переноса взвеси, являются ветро-волновое воздействие и повышенная концентрация взвешенного вещества в придонном слое во время периодов наводнений.

Измерения на глубине 60 метров, полученные во время сильного шторма 28 октября 1999 года (рисунок 2.5), позволили зафиксировать орбитальные скорости в придонном слое и концентрации взвешенного вещества. 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. Авторы объясняют данный факт тем, что дополнительный объем взвешенного вещества поступает из зоны волнового пограничного слоя, который был захвачен во время максимального волнения.

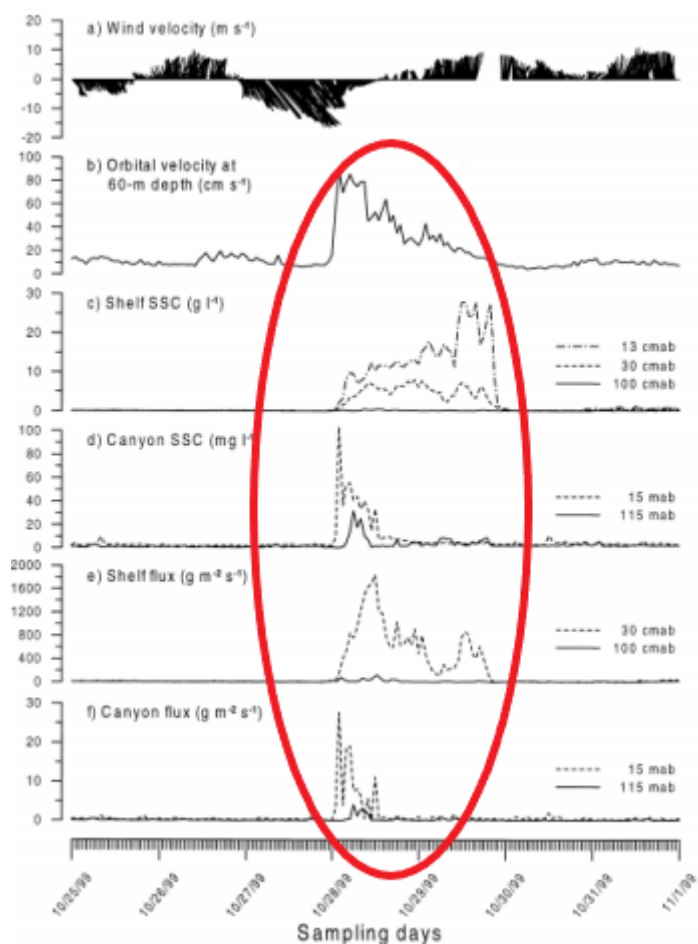


Рисунок 2.5 – Орбитальные скорости и концентрация взвешенного вещества на глубинах 60 м во время шторма в районе каньона Ил [Puig et al., 2003].

Аналогичные результаты получены и для каньона Монтерей [Xu et al., 2002]. Во время шторма на глубине 1450 метров были зафиксированы придонные взвесенесущие течения вниз по каньону, которые переносили значительные объемы взвешенного вещества.

Исследования подводных каньонов на шельфе Пуант-Де-Мон, Канада [Normandeau et al., 2020], расположенные менее чем в 300 метрах от береговой линии и имеющие длину 4-5 км, показали, что придонные взвесенесущие течения, которые распространяются по каньонам, формируются при продолжительных (более 7 часов) штормовых ветрах (более 60 км/ч). Отмечается, что источником наблюдаемых течений является осадочного материал, взвешенный в прибрежной области, который, достигая вершины каналов, переносится по ним на большие расстояния. Аналогичные процессы наблюдаются в Тирренском море у берегов Италии [Gamberi, 2020].

Большое количество исследований показывают, что эти каньоны или каналы являются стандартными участками, которые отвечают за перенос взвешенных донных осадков, выноса рек и др. Каньоны Монтерей, Канада [Greene et al., 2002; Paull et al., 2003], район острова Савари, Канада [Barrie and Conway, 2019], восточное побережье Австралии [Boyd et al., 2008], или побережье Японии [Yoshikawa and Nemoto, 2010] являются типичными примерами, когда орографические особенности подводного берегового склона приводят к отрицательному бюджету наносов в прибрежной зоне.

В [Özgökmen and Chassignet, 2002] также используется негидростатическая двумерная модель для детального исследования структуры гравитационного течения и механизмов перемешивания. Благодаря высокому разрешению модели фиксировалась неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, которая играет важную роль в процессах перемешивания. Исследовался процесс вовлечения для двух режимов течения: ламинарного и турбулентного. Было показано, что изменение во времени вовлечения есть функция только от угла наклона дна, причем при турбулентном режиме зависимость слабее. Также турбулентное перемешивание может быть вычислено, как функция основных параметров системы, таких как угол наклона дна и поток плавучести.

Абразия подводного склона и размыв последствий обрушения берегов являются основными источниками поступления песчаного материала в береговую зону моря. Однако до сих пор нет единого представления о дальнейшей динамике осадочного материала в водной среде, особенно в штормовых условиях.

Для проверки потенциальной возможности формирования придонных взвесенесущих течений, возникающих в прибрежной зоне в штормовых условиях, выполнено численное моделирование. Результаты опубликованы [Килесо и Гриценко, 2018].

В качестве базовой была использована численная модель придонного гравитационного течения [Гриценко и Юрова, 1997, 1999].

Система уравнений двумерной модели имеет вид:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + w \frac{\partial \omega}{\partial z} = \frac{g}{\rho_0} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial x} \cos(\alpha) - \frac{\partial \sigma}{\partial z} \sin(\alpha) \right) + v_{\text{эф}} \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + u \frac{\partial \sigma}{\partial x} + w \frac{\partial \sigma}{\partial z} = D_t \left( \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \sigma}{\partial y^2} \right)$$

$$\Delta \psi = \omega$$

где  $\omega$  - завихренность,  $\psi$  - функция тока,  $\sigma$  - избыточная плотность,  $\Delta$  - оператор Лапласа,  $\alpha$  – угол уклона дна,  $\nu_{эф}$  - эффективная вязкость,  $D_t$  - коэффициент турбулентной диффузии. Также уточним, что  $\omega = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}$ ,  $u = \frac{\partial \psi}{\partial z}$  и  $w = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$ , а  $\sigma = \rho - \rho_0$ .

Для описания динамики взвеси различной крупности использовался Эйлеров подход. В модель было включено дополнительно уравнение переноса для тяжелого трассера.

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + u \frac{\partial c_i}{\partial x} + w \frac{\partial c_i}{\partial z} - w_s \frac{\partial c_i}{\partial z} = D_t \left( \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_i}{\partial y^2} \right)$$

, где  $w_s$  - скорость осаждения трассера.

В работе выполнена серия модельных расчетов для различных значений угла наклона дна модельного пространства. Данные значения подбирались так, чтобы соответствовать характерным значениям угла наклона дна для подводного склона у берегов Калининградской области. Более высокие значения данного параметра характерны для наблюдаемых мелкомасштабных отрицательных, так и положительных форм донного рельефа.

Для параметризации ветро-волнового взвешивания осадочного материала в зоне обрушения волн, в модельном пространстве задавался участок с повешенным значением турбулентной вязкости (рисунок 2.6). Значение выбрано так, чтобы соответствовать натурным данным, полученным на штормовой эстакаде в Любятово [Пустельников, 1978]. Кроме того, данным подход использовался при численном моделировании в [Gritsenko and Sviridov, 1999], и показал свою физическую непротиворечивость.

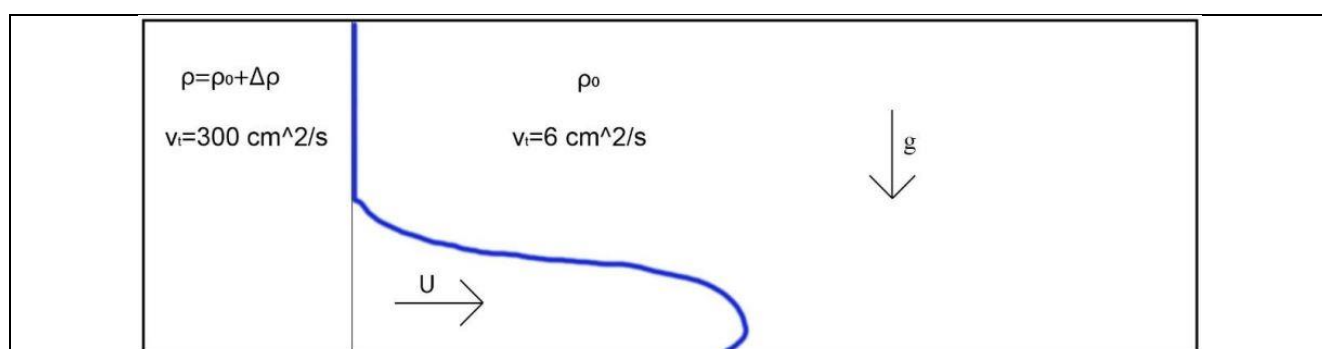


Рисунок 2.6 – Схема модельного пространства

На рисунке 2.7 представлен результат модельного расчета для угла наклона дна 0.5 градуса.

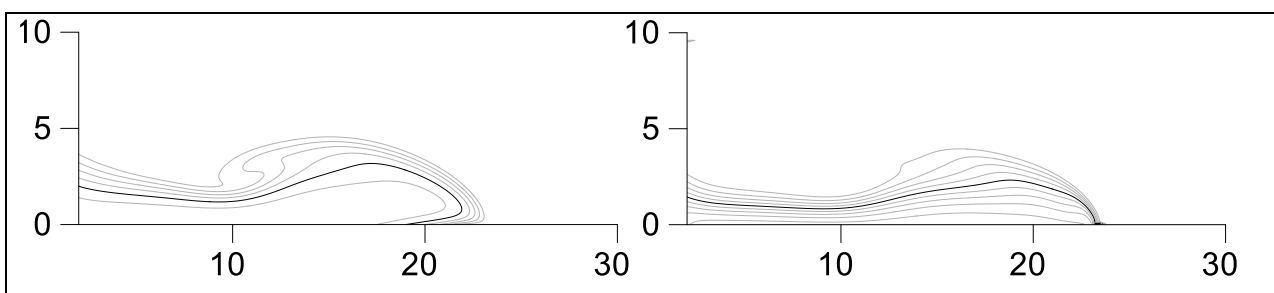


Рисунок 2.7 – Распределение полей безразмерной избыточной плотности (левый рисунок) и трассера, который определяет динамику взвешенного материала (правый рисунок) для одного из моментов времени. Изолинии: от 0 до 1 с шагом 0.15 (для левого) и 0.1 (для правого). Сетка 1500x200. Характерные значения:  $\alpha = 0.052$ ,  $U = 3 \frac{\text{см}}{\text{с}}$ ,  $H = 6 \text{ см}$ ,  $\Delta\rho = 0.01 \text{ г/см}^3$ .

Сформированный в зоне ветро-волнового воздействия большой объем взвешенного осадочного материала (рисунок 2.8) под действием силы тяжести устремляется вниз по склону в виде гравитационных потоков. Постепенно происходит осаждение осадочного материала, что приводит к затуханию придонного течения.

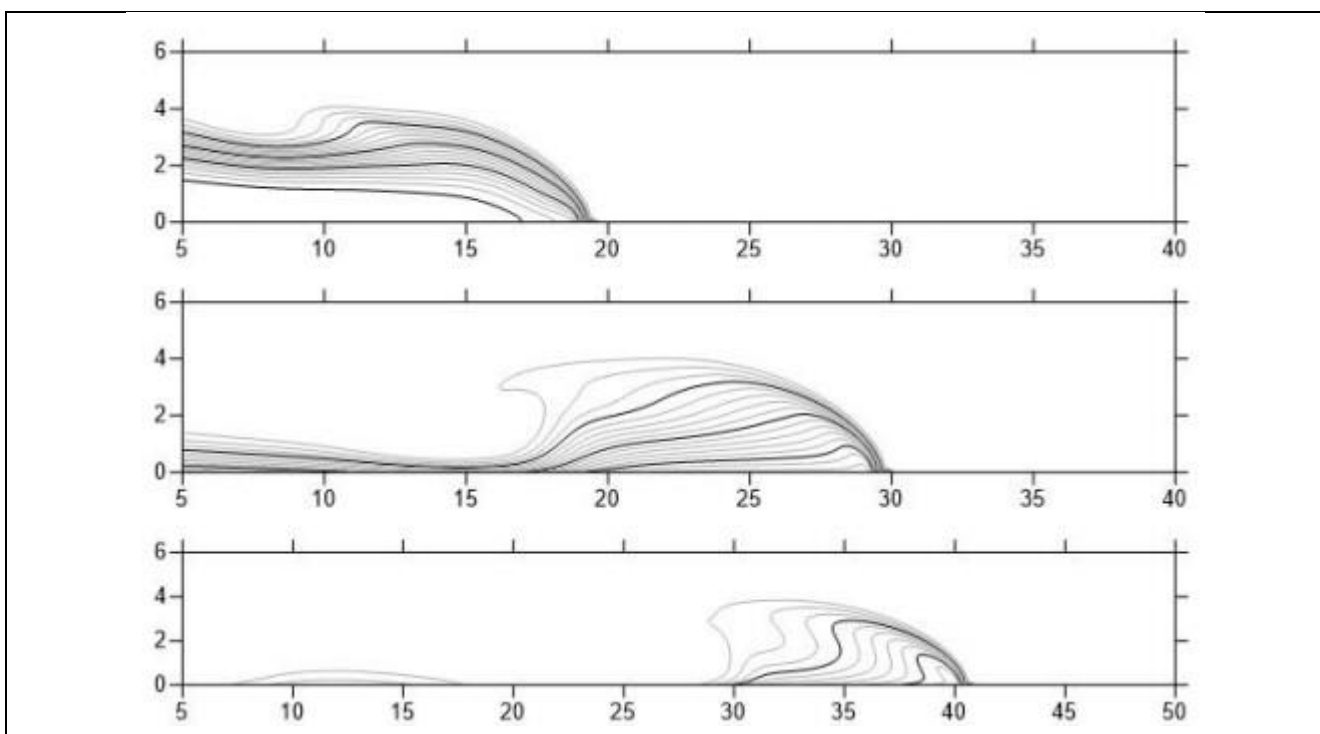


Рисунок 2.8 – Распределение полей безразмерного трассера, который определяет динамику взвешенного материала, для трех моментов времени. Изолинии: от 0 до 1 с 0.1. Сетка 1500x200. Характерные значения:  $\alpha = 0.052$ ,  $U = 3 \frac{\text{см}}{\text{с}}$ ,  $H = 6 \text{ см}$ ,  $\Delta\rho = 0.01 \text{ г/см}^3$ .

На рисунок 2.9 приведен результат расчета вязкого напряжения  $\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial z}$  на линии дна для рассчитанного течения.

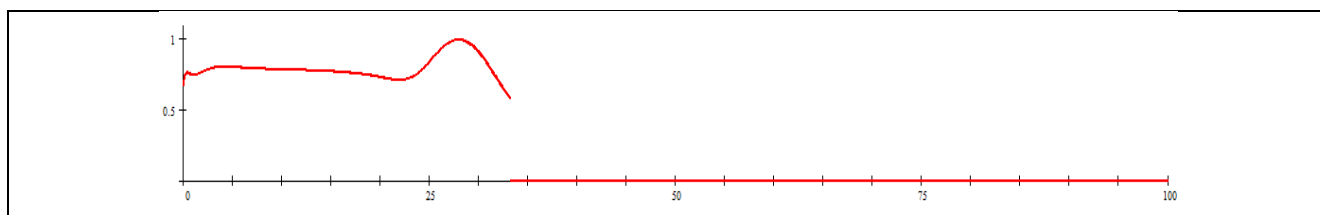


Рисунок 2.9 – График изменчивости вдоль линии дна касательного напряжения  $\tau$  для второй фазы одного из расчетных течений с условием вязкого прилипания на дне. Характерные параметры течения:  $\Delta\rho=0.001$  г/см<sup>3</sup>,  $u_0=6$  см/с,  $\nu_{\text{эфф}}=10^{-1}$  см<sup>2</sup>/с, уклон дна равен 0.5 градуса, сетка 2001x501.

График касательного напряжения показывает, наличие существенного перепада величины вязких касательных напряжений на линии дна. В головной части течения наблюдается резкое возрастание касательного напряжения, что может способствовать более интенсивной ресуспензии донных осадков или вовлечению взвеси именно в этой части течения.

Анализ полученных модельных расчетов показал, что даже незначительное увеличение угла наклона дна может способствовать уносу взвешенного материала на большие глубины в сторону моря.

**Вывод:** Выполненный анализ литературных источников и результатов численного моделирования позволяет утверждать, что в штормовых условия сформировавшийся большой объем взвесенесущей воды будет уноситься, вглубь моря в виде придонных взвесенесущих течений. Причем, стоит отметить, что часто траектории выноса приурочены к морфологическим особенностям морского дна, таких как, подводные каньоны. Даже незначительное увеличение уклона дна может приводить к более интенсивному формированию такого рода течений, а орографические особенности подводного берегового склона, имеющих кросс-склоновую ориентацию, способны фокусировать данные течения, чтобы приводит к их более дальнему распространению вглубь моря. Результатом таких процессов будет недостаток песчаного материала для питания пляжей, что, в свою очередь, будет приводить к их более интенсивной абразии.



Интенсивная абразия берегов и соответствующее разрушение инфраструктуры и др., приводящее к ухудшению природопользования приводят к потерям как экономического, так и экологического характера. Для уменьшения данных потерь и принятия решения о том или ином экономическом действии необходимо проанализировать потенциальные источники потерь, которые, согласно [Карлин и Абрамов, 2006], называют опасностями.

Таким образом, данный тип опасности, проявляющийся в более интенсивной абразии берега в следствии уноса песчаного материала в виде придонных взвесенесущих течений в штормовых условия, сфокусированных орографическими особенностями подводного берегового склона, имеющих кросс-склоновую ориентацию, предлагается называть орографической опасностью для береговой морфосистемы.

### **2.3 Ветровое воздействие как определяющий фактор появления орографической опасности для частей береговой морфосистемы**

Хорошо известно, что одним из ключевых механизмов, который определяет баланс наносов в прибрежной зоне, является скорость изменения относительного уровня моря [Жиндарев, 1997; Бабаков, 2003; Леонтьев, 2008]. Вдольбереговой транспорт наносов, создаваемый волнами и течениями, в большой степени определяет развитие берегов [Леонтьев, 2014]. Описанные выше факторы определяются особенностями ветрового режима.

Господствующий в регионе ветер определяет многие важнейшие параметры среды: течения прибрежных вод Балтики и их волнение, теплопотки через водную поверхность, а значит, и механизмы перемешивания, распространение продуктов загрязнения в поверхностном слое моря. Основные черты и характеристики глобальной атмосферной циркуляции над регионом юго-восточной Балтики изучены достаточно хорошо: Калининградская область находится под влиянием переноса умеренных воздушных масс и западного переноса из Атлантики. Важнейшая особенность географического положения Гданьского бассейна — это его открытость для проникновения западных транзитных воздушных масс. Транзит атлантических циклонов происходит при отсутствии орографических препятствий, что и определяет местную специфику ветрового режима.

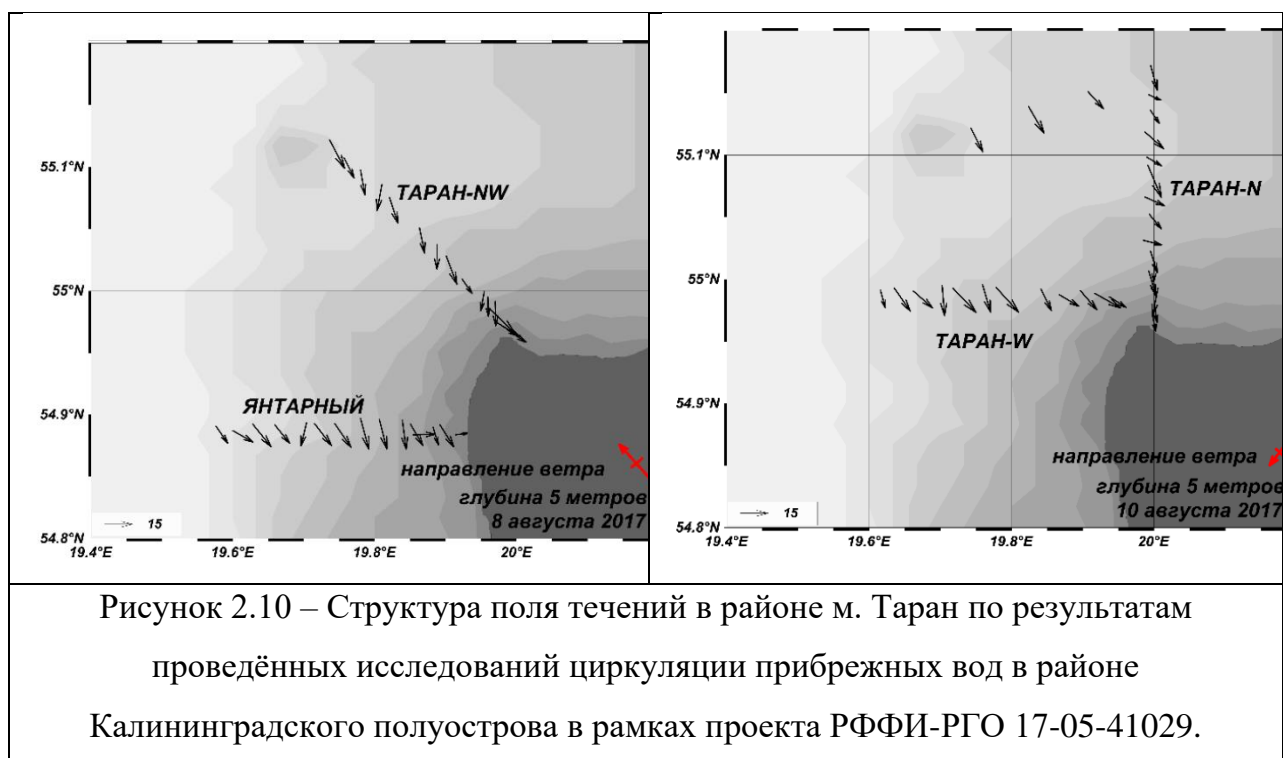
В осенне-зимний период над Балтийским морем активизируется циклоническая деятельность. На южные, юго-восточные берега Балтики обрушиваются штормы, во время которых интенсивность литодинамических процессов достигает максимума. За

относительно короткий промежуток времени в буферной зоне между сушей и морем происходит активная переработка берегов, особенно дюнных, что отмечается многими исследователями [Болдырев и др., 2008; Бобыкина и Стонт, 2015; Ryabchuk et. al., 2020].

Большинство траекторий штормовых циклонов, проходящих над юго-восточной частью Балтийского моря, ориентированы с юго-запада на северо-восток и располагаются в пределах 50-60° с.ш. Особо опасными являются циклонические вихри с большими барическими градиентами, которые перемещаются со скоростью до 100 км/ч. При этом скорость ветров западных румбов достигает 25-28 м/с, в порывах до 40 м/с. При прохождении циклонов возможен подъем уровня моря у Калининградского побережья до опасных отметок 150 см БС. При этом наблюдается сильное волнение – высота волн в прибрежных районах не менее 4 м, в открытом море не менее 6 м [Морские ..., 2021]. Эти критерии определяют характеристики опасных явлений для морского побережья Калининградской области. Главенствующая роль в штормовых размывах берегов отводится максимальному поднятию уровня моря, энергия волнения играет второстепенную роль [Бобыкина и Стонт, 2015; Бадюкова и Соловьева, 2015; Néquetto et. al., 2019].

В ходе морских экспедиций в период с 2017-2019 года проведены исследования циркуляции прибрежных вод в районе Калининградского полуострова в рамках проекта РФФИ-РГО 17-05-41029. Измерения выполнялись с использованием точечного акустического доплеровского измерителя скоростей FSI 2D АСМ. Первичные результаты опубликованы в [Зуев и др., 2017]. В ходе многолетних наблюдений подтвердилось, что природа течений в данной части Балтийского моря ветровая, и отмечены следующие закономерности (рисунок 2.10):

- При господствующих ветрах С, СВ, В и ЮВ румбов у западного побережья Самбийского полуострова наблюдается южное течение, у северного побережья - западное;
- При господствующих ветрах СЗ, З, ЮЗ и Ю румбов у западного побережья Самбийского полуострова наблюдается северное течение, у северного побережья – восточное.



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. Наиболее масштабные преобразования происходят во время сильных штормов, как например, в январе 2012 г. [Łabuz, 2014; Бобыкина и Стонт, 2015]. Аналогичный шторм, также от северных румбов с поднятием уровня моря более 1 м, был отмечен в январе 2019 г. Он явился причиной значительных разрушений в курортных городах на севере Самбийского п-ва, прорыва вод штормового нагона в коренной части Куршской косы с затоплением прилегающего леса [Стонт и др., 2019]. Вероятно, с этим штормом связан и размыв морского берега Балтийской косы и образование на склоне авантюны свежего уступа размыва по всему периметру, наблюдавшегося в начале лета 2019 г. В предыдущие годы таких значительных переработок берега не наблюдалось.

Массив данных, описывающий скорость и направление ветра, взят с метеостанции, расположенной на морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП) Д-6 на месторождении Кравцовское в Балтийском море. Данные массивы предоставлены ООО «Морское венчурное бюро». В данной работе рассмотрены данные за одиннадцатилетний период с 2006 по 2017 года. Дискретность по времени составила 1 час. На рисунке 2.11

представлена векторная диаграмма, характеризующая режим ветра за рассматриваемый период.

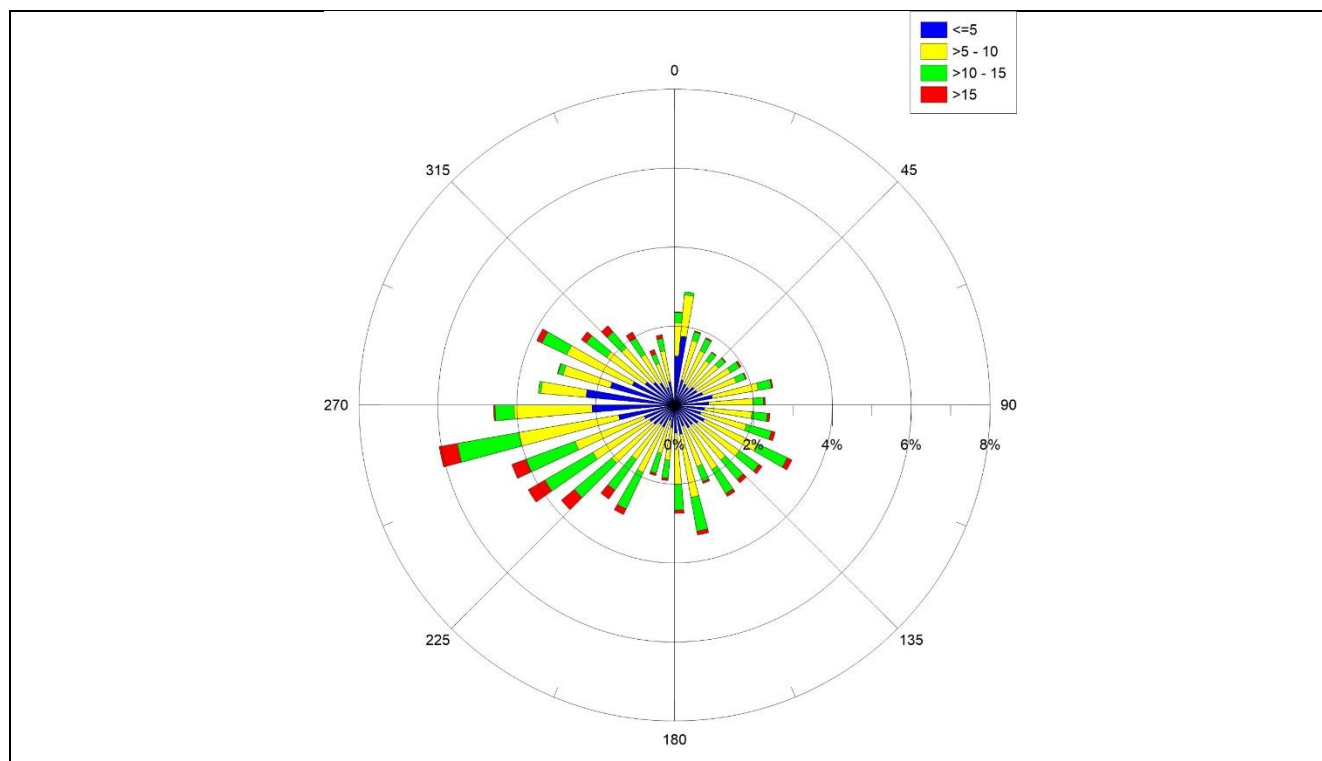


Рисунок 2.11 – Векторная диаграмма, характеризующая режим ветра за период с 2006 по 2017 по данным метеостанции, расположенной на морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП) Д-6 на месторождении Кравцовское в Балтийском море.

**Выводы:** Оценка потенциальной орографической опасности для береговой морфосистемы в следствии возникновения и развития коротко живущих придонных взвесенесущих течений, невозможна без рассмотрения характера поля ветра и возникающего ветрового нагона вод, который является одним из основных фактором, приводящий к интенсивной абразии берегов.

### **ГЛАВА 3. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА ОРОГРАФИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ НА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ БЕРЕГОВОЙ МОРФОСИСТЕМЫ**

В заключительной главе будет выполнена пространственная классификация частей береговой морфосистемы Калининградского полуострова по степени потенциальной значимости фактора орографической опасности для ее геэкологического состояния. При помощи трехмерного численного моделирования и статистического анализа метеоданных будет дана оценка повторяемости орографической опасности для геэкологического состояния береговой морфосистемы.

#### **3.1. Пространственная оценка степени возможного влияния фактора орографической опасности**

Известно [Айбулатов, 1990; Свиридов с др., 1997; Онищенко и Косьян, 1989; Анцыферов, 1973; Пыхов и Дачев, 1981], что на мелководье Балтийского моря во время штормов в прибрежной зоне моря образуются разного рода течения, которые играют существенную роль в переносе осадочного вещества из зоны обрушения волн в глубинную часть моря.

На уровне фактов можно констатировать, что во время шторма в зоне волнового воздействия и обрушения волн происходит значительное насыщение взвешенным материалом прибрежных вод. Несмотря на заметное превышение плотности этих вод по сравнению с мористее расположенными водными массами, они формируют свой значительный объем непосредственно у берега.

Ранее в работе на модельных расчетах было показано [Gritsenko and Sviridov, 1999], что такого рода ситуация вполне возможна и на качественном уровне хорошо соответствует реально зафиксированным при измерениях со штормовых эстакад в Любятово [Анцыферов и др., 1978] и Камче [Пыхов и др., 1980]. Параметризация эффекта штормового воздействия позволила доказать, что экстремально высокие значения коэффициента турбулентного перемешивания ( $k = 300 \text{ см}^2/\text{с}$ ) в прибойной зоне моря способны поддерживать квазистационарный объем насыщенной взвесью воды, которая переносится в виде придонных гравитационных потоков на большие глубины (рисунок 3.1).

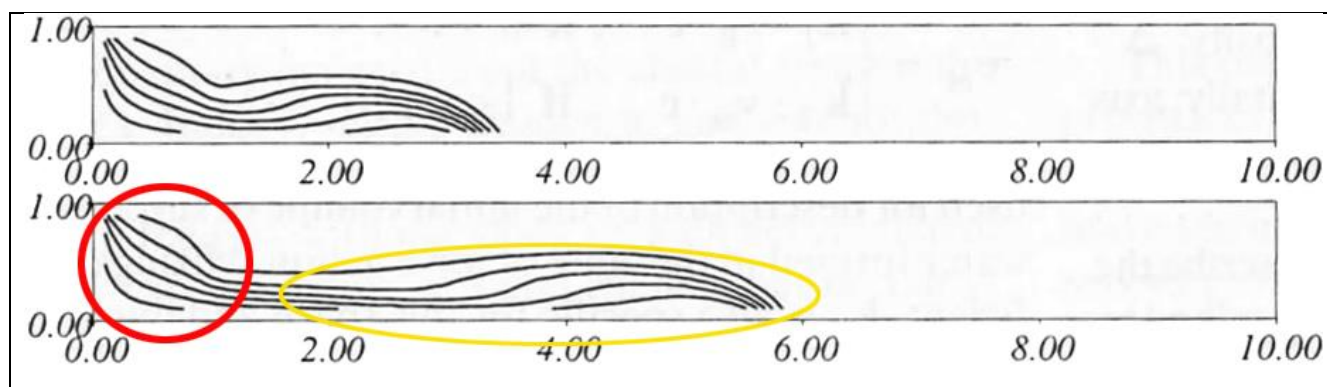


Рисунок 3.1 – Последовательные фазы движения взвесенасыщенных вод по слону дна в модельном пространстве. Красным кругом отмечен квазистационарный объем насыщенной взвесью воды. Желтым овалом обозначено сформировавшееся придонное взвесенесущее течение. Изолинии избыточной плотности на рисунке имеют значения (снизу-вверх): 0.1; 0.25; 0.4; 0.55; 0.7; 0.85. [Gritsenko and Sviridov, 1999]

Наконец, возникающие во время длительного шторма придонные течения обладают очень высокой эродирующей способностью [Анцыферов и др., 1978; Свиридов и др., 1997]. Кроме того, многочисленные исследования динамики вод в подводных каньонах [Леонтьев, 2008; Сафьянов и др., 2007; Hsu, 2004] показали, что такого рода морфологические особенности рельефа дна являются основными маршрутами уноса из прибрежной зоны моря в его глубинную часть значительных по величине объемов насыщенных взвесью вод во время штормов в виде придонных гравитационных потоков.

Так, многолетние комплексные геолого-геоморфологические исследования на прибрежных мелководьях в Финском заливе Балтийского моря с помощью акустических методов [Рябчук и др., 2012] выявили подводные эрозионные ложбины. Протяженность данных ложбин достигала нескольких километров, а ширина 10-50 метров. Кроме того, обладая малой относительной глубиной, ложбины устойчивы во времени. Характер и особенности осадочного материала, а именно крупность материала, обнаруженные серии валиков ряби, ориентированные перпендикулярно простиранию ложбин, позволили констатировать, что по данные подводные ложбины являются траекториями оттока взвесенесущей воды от берега в сторону моря, образованной в период штормов. В работе [Леонтьев и др., 2011], на глубинах 5-8 метров и более зафиксированы эрозионные ложбины стока глубиной 0.3-0.5 метров (рисунок 3.2). В данных ложбинах четко фиксируются знаки ряби, что, вероятно, определяется компенсационным оттоком воды после штормов и нагонов.

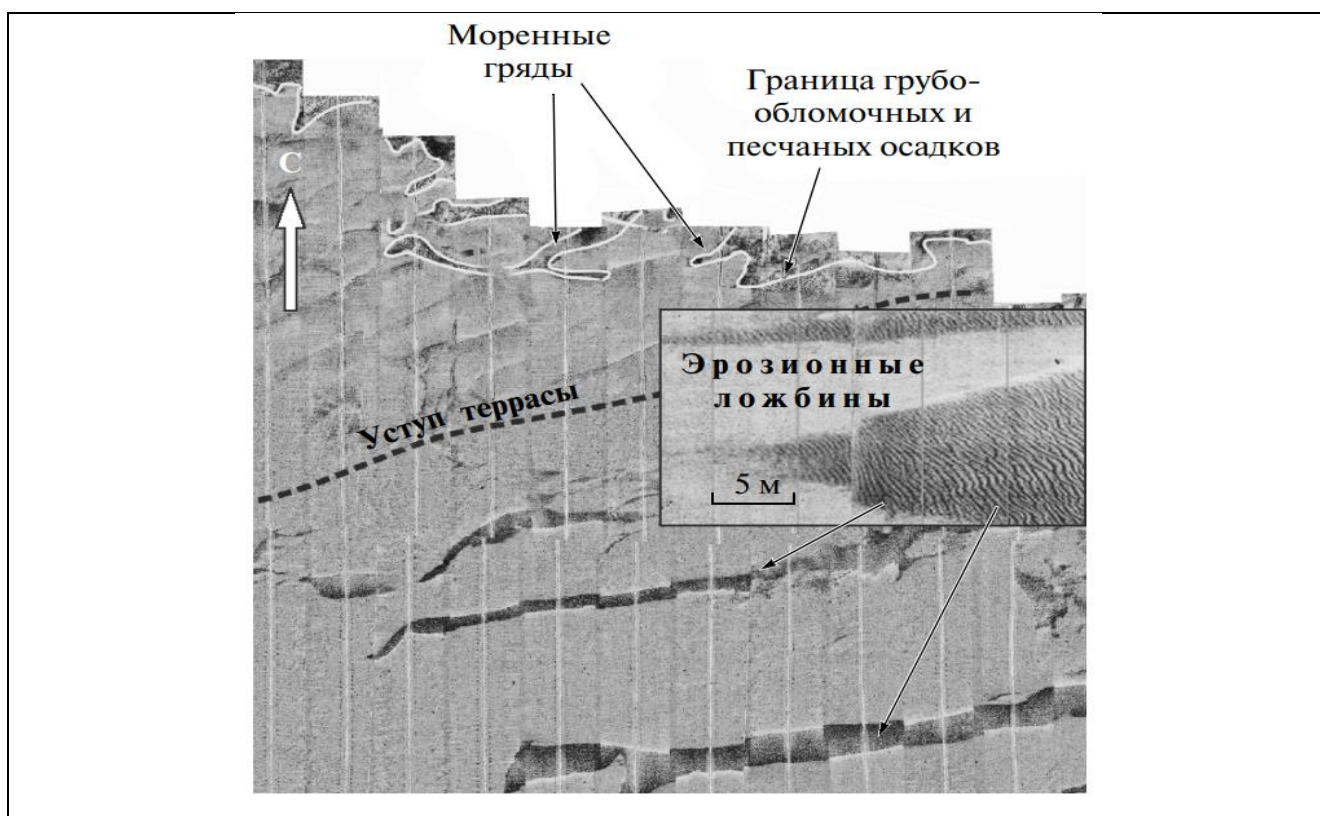


Рисунок 3.2 – Результаты промеров глубин в районе расположения песчаных гряд и эрозионных ложбин в районе северной прибрежной зоны Финского залива. [Леонтьев и др., 2011]

Комплексные исследования процессов седиментации в прибрежной зоне Куршской косы (Калининградская область, Балтийское море) [Zhamoïda et al., 2009] с помощью технологии бокового сканирования, выполненные в рамках совместной экспедиции АОИОРАН и ВСЕГЕИ в 2006-2007 годах показали, что на подводном берегу склоне на участке между городами Зеленоградск и Лесной отмечаются следы движения песка в сторону моря. Данные следы стока песчаного материала направлены перпендикулярны береговой линии и характеризуются рябью. Относительная глубина 0.8-1 м. Длина данных образований превосходит 100 м при средней ширине 4-5 метров (рисунок 3.3).



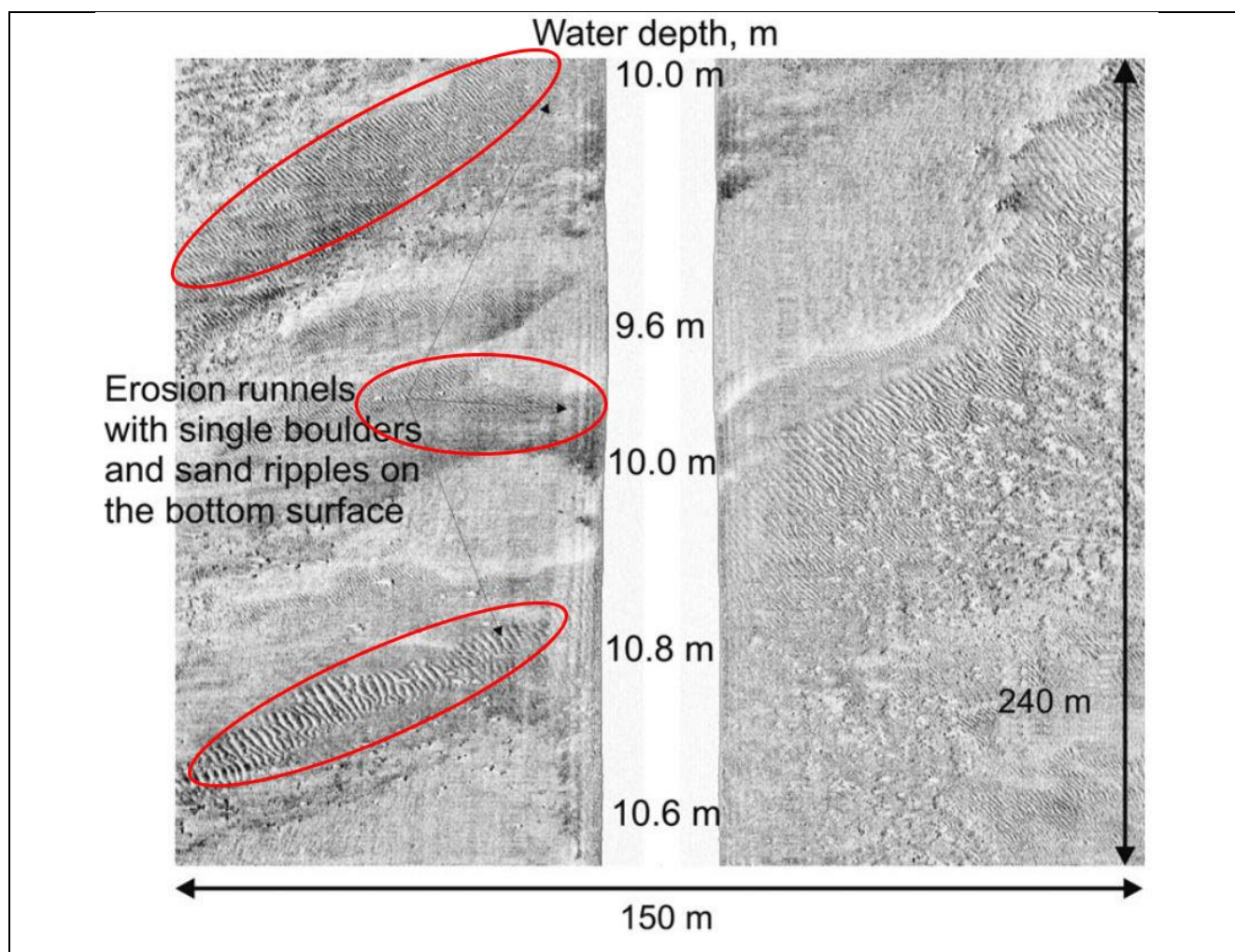


Рисунок 3.3 – Результаты сканирования морского дна в районе г. Зеленоградск со следами песчаного стока с ярко выраженной рябью, направленные перпендикулярно береговой линии (красные овалы). [Zhamoïda et al., 2009]

**Вывод:** Выполненный обзор экспериментальных наблюдений за морфодинамикой в прибрежных водах показал, что, оценка влияния на транспорт взвешенного и осадочного материала будет неполной без учета конкретных особенностей рельефа дна и их влияния на возможности возникновения и развития придонных гравитационных течений.

Целью данной главы является исследование рельефа подводного берегового склона Калининградской области в контексте их способности обеспечивать формирование локализованных в пространстве интенсивных взвесенесущих потоков в условиях сильных штормов.

### 3.1.1 Построение цифровой модели рельефа исследуемого района

Экспериментальные наблюдения подтверждают факты значительных деформаций берега и склона дна в периоды штормового воздействия. Наличие песка на глубинах более



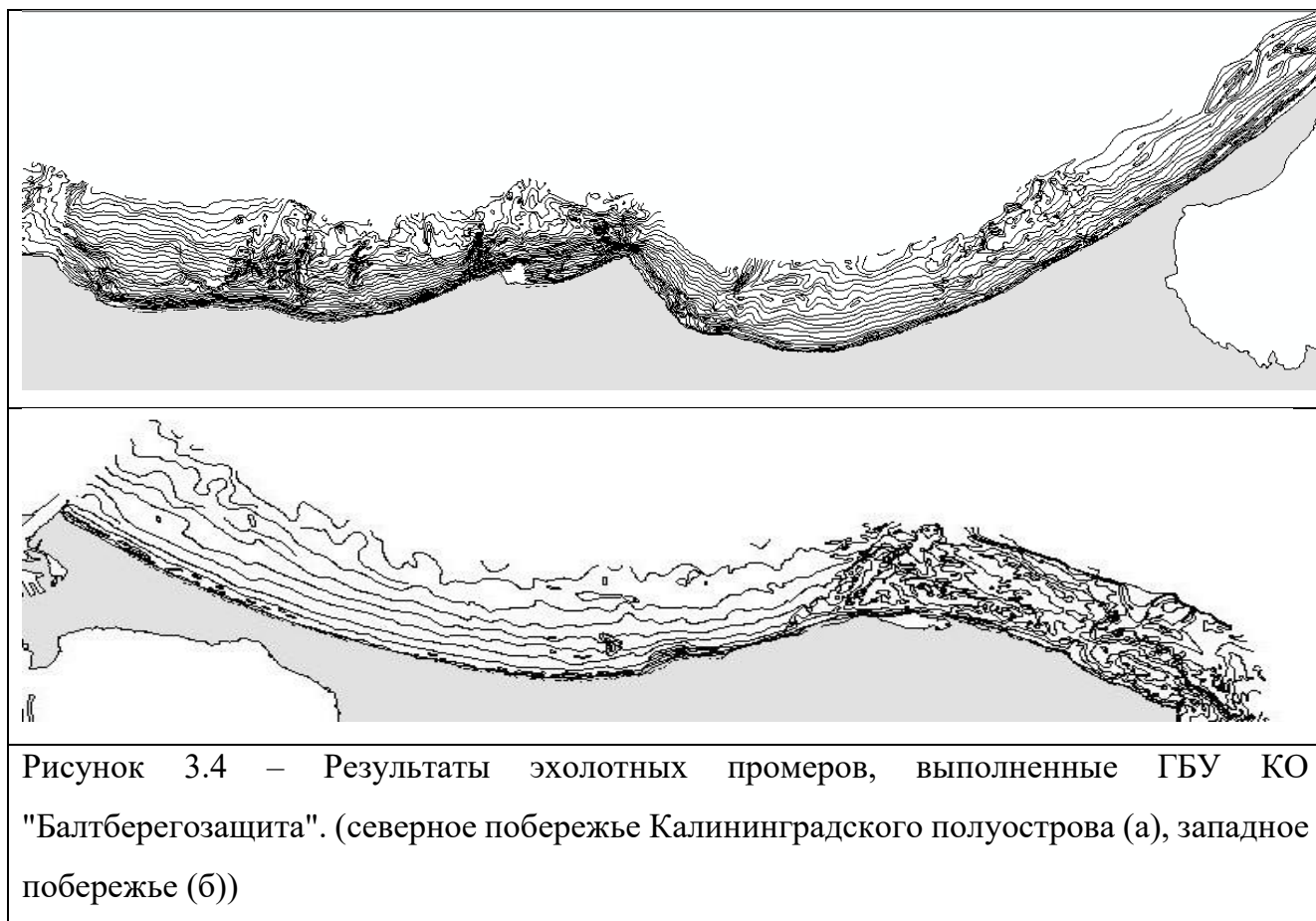
30 м подтверждают возможность ухода песка в глубинную часть моря [Krek et al., 2016, Ryabchuk et al., 2020]. Однако, на протяженных участках относительно гладкого рельефа обычно наблюдаются только почти постоянные и слабые по величине компенсационные течения, не способные выполнить транспорт осадочного материала на глубину. Вместе с тем весь объем инструментальных измерений скорости вод был ориентирован на оценку средних, квазистационарно существующих течений [Лентьев, 2008, Жиндарев, 1997; Бабаков, 2003]. Таким образом, существующие представления о поперечной к берегу динамике вод вполне справедливы только для протяженных участков прибрежных акваторий с выровненной вдоль изобат (гладкой в дифференциально геометрическом смысле) топографией дна и пространственно осредненных течений. Однако выполненные эксперименты и полученные результаты не позволяют описать возникновение локализованных в пространстве интенсивных придонных струйных течений, способных выполнить транспорт осадочного материала из зоны прибоя в глубинную часть моря.

Первичный анализ общедоступных массивов данных показал, что практически все такого рода карты донной топографии [Атлас..., 2010; Baltic Sea Bathymetry Database; Seifert et al., 2001; EMODnet Bathymetry, 2020] имеют грубое пространственное разрешение для российской части Балтийского моря. Пространственное разрешение таких батиметрических карт в лучшем случае составляет 1 км. Современная уточненная батиметрическая карта юго-восточной части Балтийского моря (российский сектор) [Dorokhov et al., 2019] основанная на данных 25 морских экспедиций, выполненных АОИОРАН в период с 2004 по 2018 года, имеет масштаб 1:500000 и также недостаточно описывает прибрежную часть. Данный факт не позволяет использовать их для исследования мелкомасштабных неоднородностей рельефа, способных спровоцировать движение насыщенных взвесью вод поперек берегового склона.

В качестве исходных данных при исследовании рельефа в контексте поставленной в работе задачи использовались результаты эхолотных промеров первых трех километров подводного берегового склона Калининградской области (Калининградский полуостров), полученные в результате многолетних мониторинговых работ ГБУ КО "Балтберегозащита". Полученные материалы представляют собой изобаты в виде векторных данных (shp-файлы) (рисунок 3.4). Подводный береговой склон северного побережья Калининградского полуострова лучше обеспечен данными эхолотных

промеров. Высота сечения рельефа морского дна составила 1 метр. Для подводного берегового склона западного побережья высота сечения составила 2.5 метра.

Имеющиеся данные были дополнены эхолотным промером полигона в районе Светлогорской бухты (северное побережье Калининградского полуострова), выполненный 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 горизонтальным пространственным разрешением 30 x 30 метров. Диапазон глубин составил от 0 до 26 метров. (рисунок 3.5)



Построение цифровой модели рельефа делалось на базе программного продукта ERSI ArcGis ([www.esri.com](http://www.esri.com)). Преобразование изобат и авторских точечных данных в цифровую модель рельефа в виде растра (geoTiff) выполнено с помощью инструмента «Торо-to-Raster». В основе данного инструмента лежит интерполяция, которая использует дискретизованный метод плоского сплайна, адаптированная для создания гидрологически корректных ЦМР [Hutchinson et al, 2011].

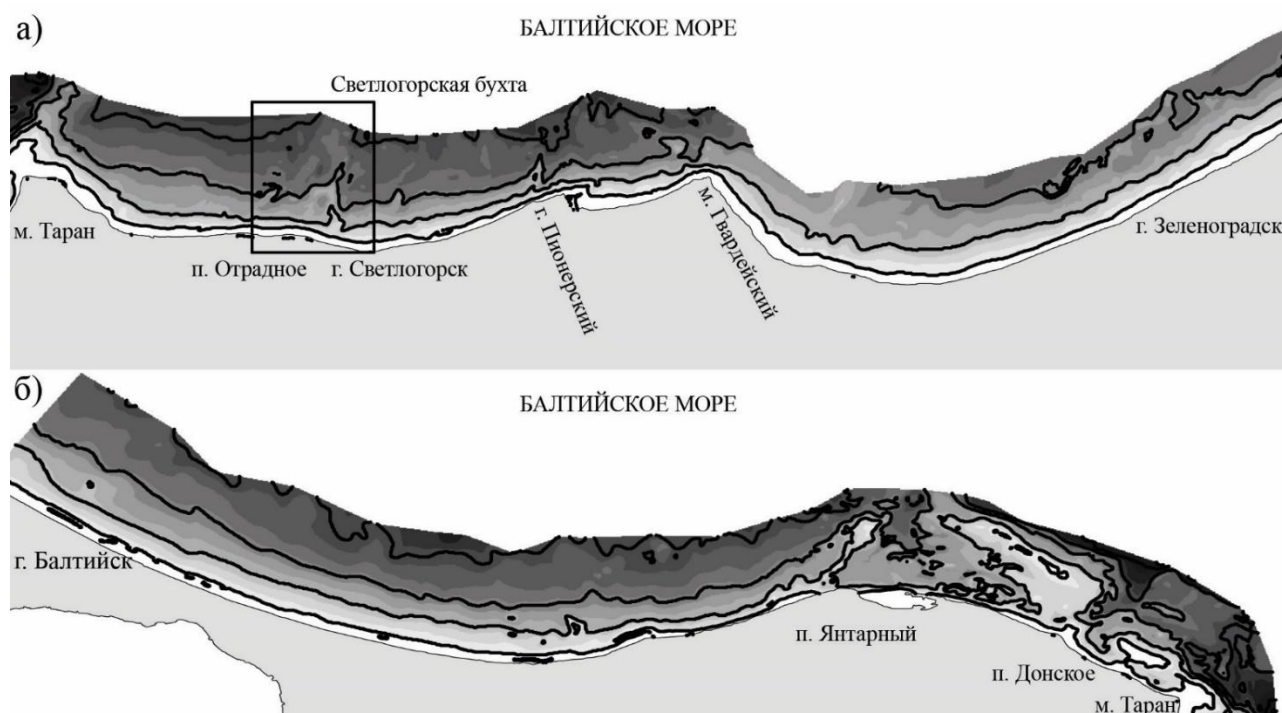


Рисунок 3.5 – Цифровая модель рельефа подводного берегового склона северного (а) и западного (б) побережья Калининградского полуострова. Квадратом на рисунке а) отмечен дополнительный полигон в Светлогорской бухте. Изобаты пробегают последовательно от 5 м до 25 м с шагом 5 м.

Полученная цифровая модель рельефа была проанализирована на наличие одиночных локальных понижений или пиков («выбросов»), которые могут являться ошибками интерполяции, связанные с разрешением исходных данных и округление высот до ближайшего целого значения. Кроме того, фильтрация точечных локальных понижений необходима для дальнейшего расчета потенциальных траекторий движения взвешенного вещества, т.к. они могут вносить ошибки при расчете градиентов глубин. Данная процедура выполнена с помощью инструмента «Fill» доступном в программном продукте ERSI ArcGis ([www.esri.com](http://www.esri.com)), который основан на методике, описанной в [Planchon and Darboux, 2002].

### 3.1.2. Анализ градиентов и уклона дна береговой морфосистемы

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 [Kileso et al., 2017]. Сочетание гряды и эффекта Кориолиса могут

привести к фокусировке вдольсклонового течения у ее подножия. Канал же просто может стать проводником взвесенесущей воды от источника в глубинную часть моря.

Изучение структуры и развития форм земной поверхности, как на суше [Трофимов, 1974, Ананьев, 1976], так и под водой [Леонтьев и др., 2011], является актуальной проблемой и требуют знаний многих физических характеристик. При моделировании подобных процессов часто [Бронгулеев, 2011] рассматриваются основные морфологические параметры – высоты, уклоны, кривизны. Так, одно из стандартных и давно применяемых в геоморфологии уравнений [Поздняков и Ройхваргер, 1980; Howard, 1997], которое использует для описания скорости изменения склона, является дифференциальным уравнением параболического типа, выражающее зависимость скорости изменения от градиента склона, вертикальной кривизны и внешних факторов. Таким образом, для корректного выделения интересующих нас геоморфологических особенностей и получение различного рода их количественных оценок, следуя классическим работам, выполним анализ основных морфологических характеристик.

Подробный анализ цифровой модели рельефа прибрежной зоны Балтийского моря у берегов Калининградской области выполнялся стандартным методом цифровой обработки растровых изображений – фильтрация [Гонзалес и Вудс, 2005; Burrough and McDonell, 1998]. Основным принципом 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 (рисунок 3.6а).

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 рельефа (например, для участка Светлогорской бухты, район дополнительного полигона (рисунок 3.5а) в направлении с запада на восток выполнялся по формуле 1. Соответствующий данной формуле фильтр представлен на рисунке 3.6б. Расчет поперечного градиента в направлении с юга на севере рассчитывался по формуле 2, вид соответствующего фильтра изображен на рисунке 3.6в. Уклон дна подводного берегового склона в точке растра рассчитывался по формуле 3.

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{(c + 2f + i) - (a + 2d + g)}{8 * \text{размер\_ячейки}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{(a + 2b + c) - (g + 2h + i)}{8 * \text{размер\_ячейки}} \quad (2)$$

$$\text{Уклон} = \arctg \left( \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \right) * 57.29578 \quad (3)$$

a)	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"><tr><td>a</td><td>b</td><td>c</td></tr><tr><td>d</td><td style="background-color: #cccccc;">e</td><td>f</td></tr><tr><td>g</td><td>h</td><td>i</td></tr></table>	a	b	c	d	e	f	g	h	i
a	b	c								
d	e	f								
g	h	i								

б)	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"><tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>-2</td><td style="background-color: #cccccc;">0</td><td>2</td></tr><tr><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>	-1	0	1	-2	0	2	-1	0	1
-1	0	1								
-2	0	2								
-1	0	1								

в)	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"><tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td style="background-color: #cccccc;">0</td><td>0</td></tr><tr><td>-1</td><td>-2</td><td>-1</td></tr></table>	1	2	1	0	0	0	-1	-2	-1
1	2	1								
0	0	0								
-1	-2	-1								

Рисунок 3.6 – Общий вид оператора (фильтра) (а). Значения весов ячеек фильтра при расчете вдольберегового градиента в направлении с запада на восток (б) и поперечного градиента с юга на север (в).

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 Калининградского полуострова: Светлогорская бухта (от мыса Таран до г. Пионерский) (рис. 3а), район мыса Гвардейский до г. Зеленоградск (рис. 3б). На западном побережье особенности отмечены на участке от п. Янтарный до п. Донское (рис. 3в). В данных районах на картах с рассчитанными значениями вдольберегового градиента рельефа отчетливо прослеживаются положительные и отрицательные формы рельефа, которые имеют поперечную к береговой линии ориентацию.

В районе Светлогорской бухты, который особенно важен для Калининградской области с точки зрения рекреационной ценности, можно выделить несколько потенциальных путей «ухода» пляжевого материала от берега на глубину (рисунок 3.7а, рисунок 3.8а, рисунок 3.9а). Район мыса Таран характеризуется положительной формой рельефа, имеющей поперечное берегу направление. Подножье с восточной стороны данного возвышения имеет уклон в сторону моря. Уклон дна варьируется от 0.4 до 1 градуса. В районе п. Отрадное наблюдается чередование положительных и

отрицательных форм рельефа, имеющих сложную геометрию, а среднее значение уклона дна достигает 0.9 градуса. Показательной является форма рельефа в районе г. Пионерский. Последовательное чередование положительной, отрицательной и еще раз положительной форм формирует канал. Его длина примерно составляет 2 км, ширина 300-400 м, уклон дна от 0.3 до 0.9 градусов. На западном склоне данного канала уклон дна достигает значений в 2 градуса. Как было показано в [Hsu, 2004], для образования самоподдерживающегося взвесенесущего гравитационного потока достаточно угла наклона дна всего в 0.5 градуса. В то время как наклон дна примерно в 3 градуса [Жмур и др., 2002] может приводить к возникновению катастрофических придонных взвесенесущих течений.

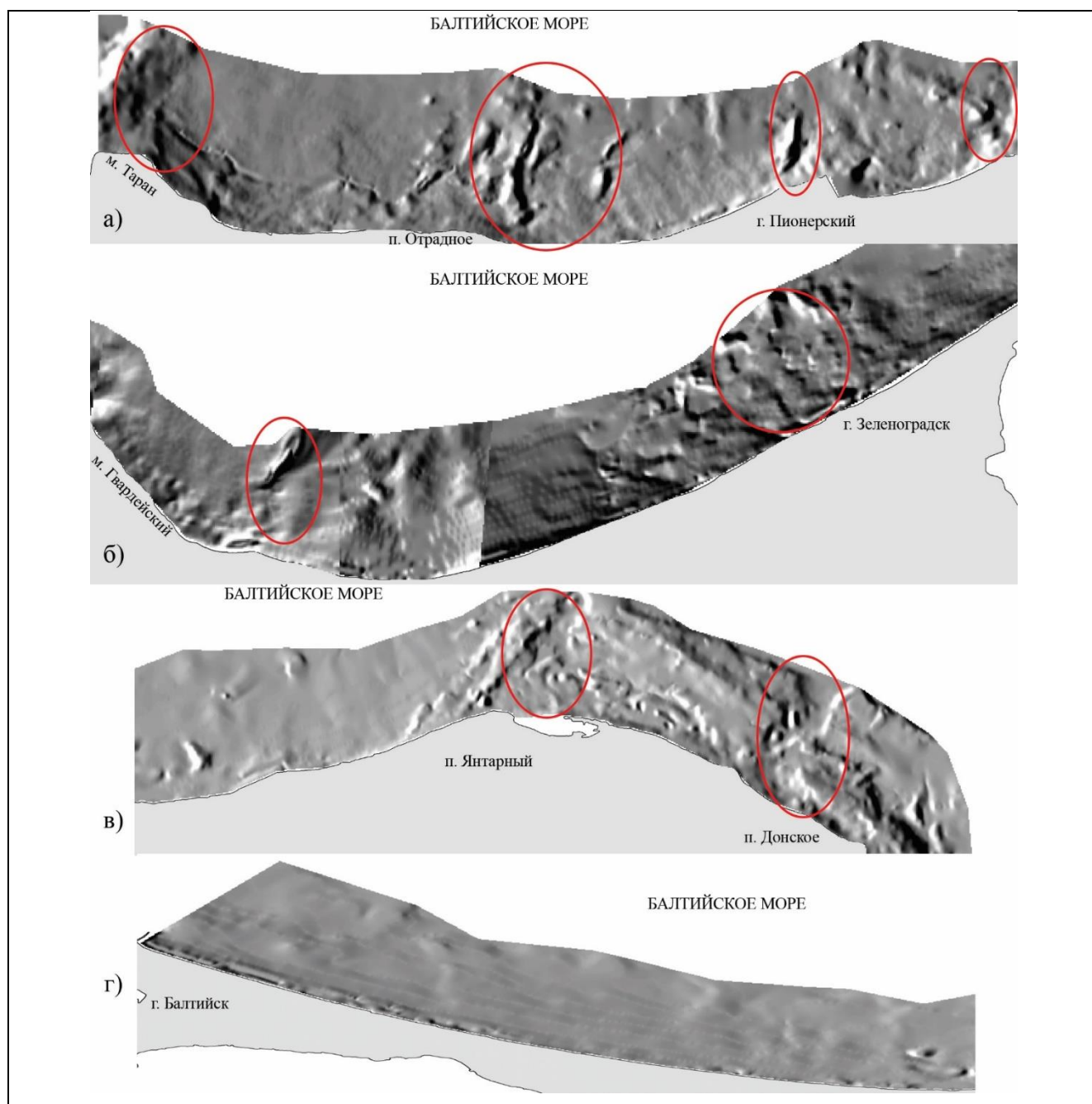


Рисунок 3.7 – Значения вдольберегового градиента рельефа подводного берегового склона для Светлогорской бухты (от мыса Таран до г. Пионерский) (а), района мыса Гвардейский до г. Зеленоградск (б), района от п. Янтарный до п. Донское (в) и района от г. Балтийск до п. Янтарный (г). Белый цвет соответствует положительным значениям градиента, черный – отрицательным, а серый цвет – близким к нулю значениям. Красными овалами выделены районы с характерными морфологическими особенностями.



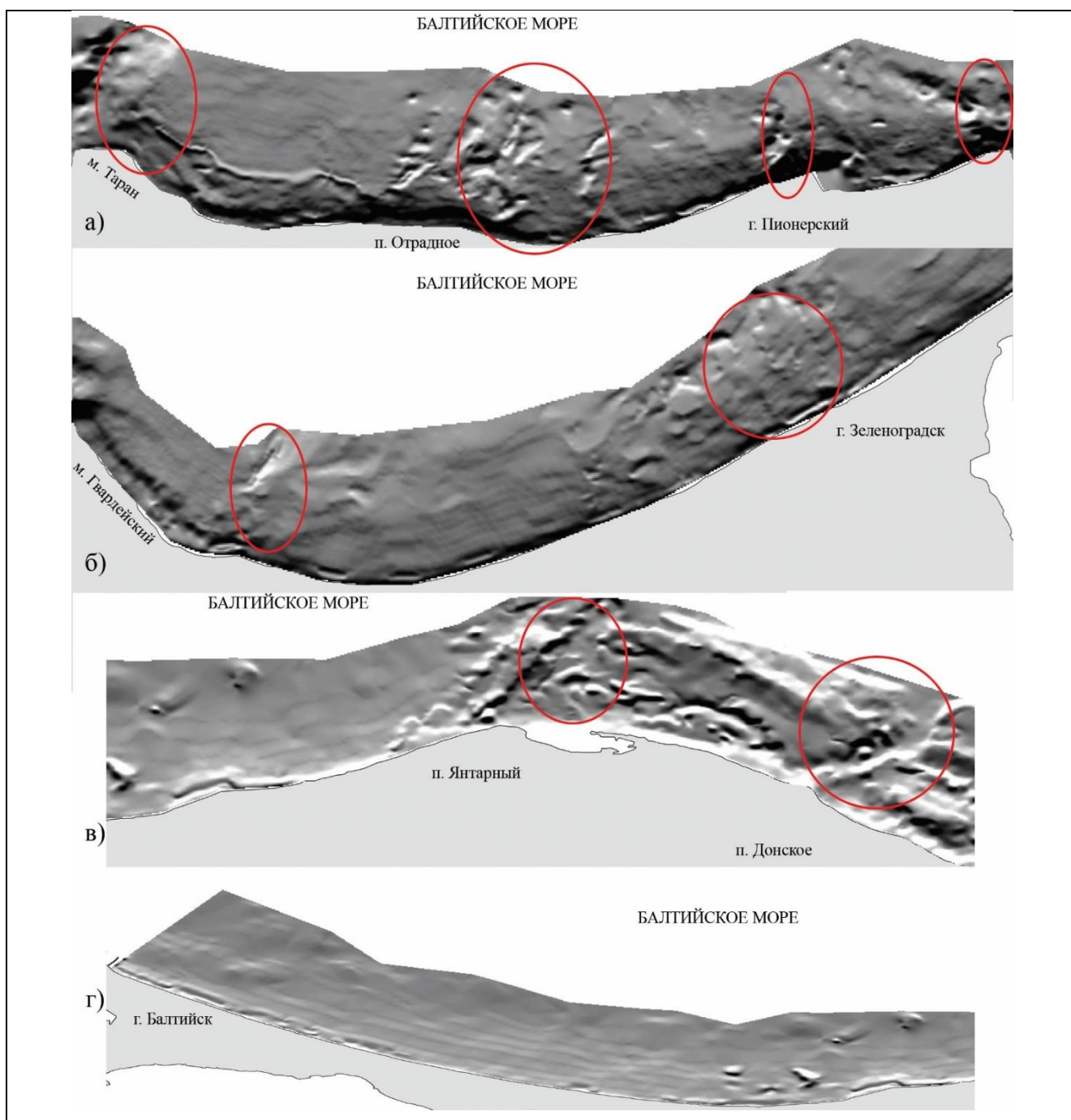


Рисунок 3.8 – Значения поперечного к берегу градиента рельефа подводного берегового склона для Светлогорской бухты (от мыса Таран до г. Пионерский) (а), района мыса Гвардейский до г. Зеленоградск (б), района от п. Янтарный до п. Донское (в) и района от г. Балтийск до п. Янтарный (г). Белый цвет соответствует положительным значениям градиента, черный – отрицательным, а серый цвет – близким к нулю значениям. Красными овалами выделены районы с характерными морфологическими особенностями.



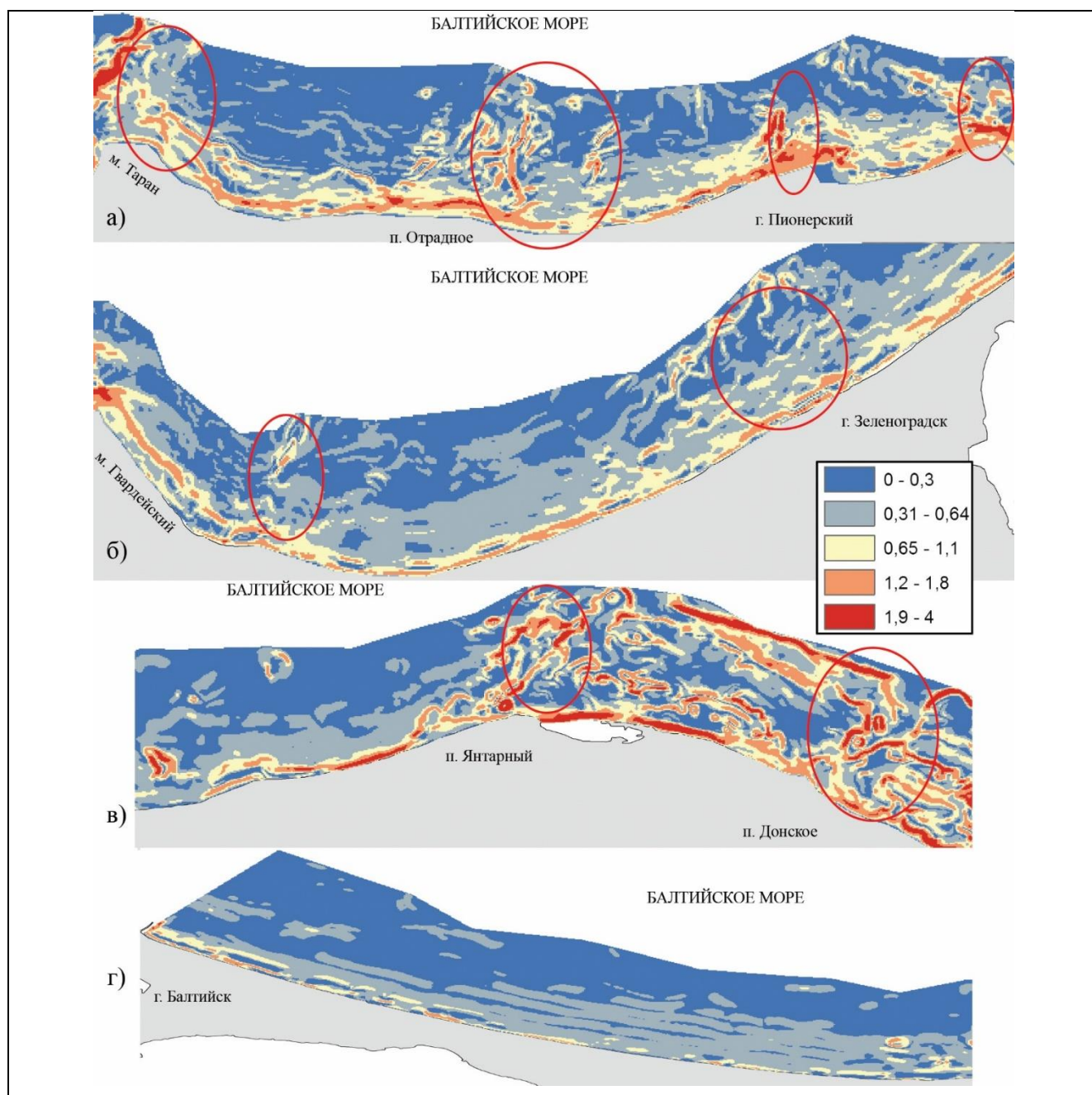


Рисунок 3.9 – Значения уклона дна подводного берегового склона для Светлогорской бухты (от мыса Таран до г. Пионерский) (а), района мыса Гвардейский до г. Зеленоградск (б), района от п. Янтарный до п. Донское (в) и района от г. Балтийск до п. Янтарный (г). Красными овалами выделены районы с характерными морфологическими особенностями.

В районе от мыса Пионерский до г. Зеленоградск (рисунок 3.7б, рисунок 3.8б, рисунок 3.9б) также можно выделить 2 участка. Первый участок отмечается в районе п. Куликово в котором присутствует положительная форма рельефа. Высота данного образования достигает трех метров. Вдоль его подошвы с восточной стороны отмечается канал, имеющих ориентацию перпендикулярную береговой линии. Глубина которого варьируется от полуметра до двух метров. Уклон дна варьируется от 0.2 до 0.6 градусов. В районе г. Зеленоградск также отмечается достаточно большой участок с расчлененным рельефом подводного берегового склона. По данным рассчитанных градиентов и уклона дна можно выделить несколько траекторий потенциального переноса взвешенного материала, однако, явно выраженного канала не наблюдается.

Подводный береговой склон северной части западного побережья Калининградского полуострова (рисунок 3.7в, рисунок 3.8в, рисунок 3.9в) характеризуется сильно расчлененным рельефом. В рамках комплексных геофизических работ [Информационный ..., 2014] в данном районе отмечается многочисленные подводные клифы, крупные останцы, гряды и ложбины. Отмечается повсеместный размыв морского дна (рисунок 3.10). На данном участке хорошо прослеживаются два потенциальных района для выноса взвешенного материала (выделены красными овалами рисунок 3.7в, рисунок 3.8в, рисунок 3.9в).

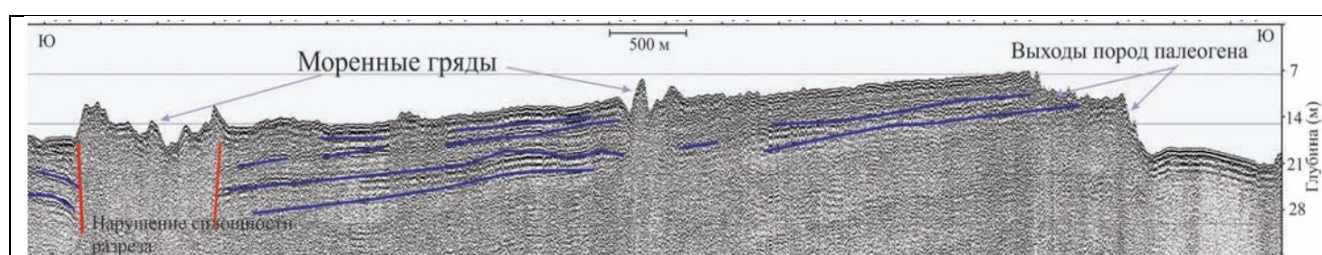


Рисунок 3.10 – Фрагмент акустического профиля в районе Бакалинской банки. [Информационный ..., 2014]

В районе подводного береговой склона западного побережья Калининградского полуострова (рисунок 3.7г, рисунок 3.8г, рисунок 3.9г) на участке от г. Балтийск до п. Янтарный не отмечаются интересующие нас морфологические структуры. Рельеф практически гладкий.

**Вывод.** Выполненный подробный анализ рельефа подводного берегового склона позволил выделить участки с морфологическими особенностями, которые имеют поперечное к берегу направление. На северном побережье Калининградского полуострова: Светлогорская бухта (от мыса Таран до г. Пионерский), район мыса Гвардейский до г. Зеленоградск. На западном побережье особенности отмечены на участке от п. Янтарный до п. Донское.

### 3.1.3. Анализ кривизны поверхности береговой морфосистемы и траекторий градиентного спуска

Для проверки гипотезы (результат опубликован в [Kilesio et al., 2017] о том, что данные формы рельефа могут способствовать уходу больших объемов взвешенного в виде локализованных в пространстве интенсивных взвесенесущих потоков в условиях сильных штормов для выделенных участков был выполнен расчет траекторий наискорейшего спуска и кривизны для используемой цифровой модели рельефа [Jenson and Domingue, 1988]. Траектория движения из каждой ячейки цифровой модели рельефа определяется направлением наиболее крутого спуска или максимального понижения, т.е. в направлении максимального градиента, рассчитанного для значений высот в соседних точках. Данный подход позволяет оценить наиболее вероятные траектории движения взвешенного вещества в виде придонных течений по дну штормовой природы. Данная процедура выполнена с помощью инструментов «FlowDirection» и «FlowAccumulation» доступных в программном продукте ERSI ArcGis ([www.esri.com](http://www.esri.com)), которые основаны на методике, описанной в [Tarboton et al., 1991].

Кривизна поверхности, которая характеризует уклон уклона, определяет выпуклость или вогнутость поверхности. Положительные значения кривизны характеризуют выпуклые части поверхности (например, хребты), отрицательные значения соответствуют вогнутым частям поверхности (например, каналы).

Для расчета кривизны использовались следующие формулы [Moore et al., 1991]:

$$\text{Кривизна} = -2(D + E) * 100, \text{ где} \quad (3)$$

$$D = \frac{0.5(d + f) - e}{\text{размер\_ячейки}^2} \quad E = \frac{0.5(b + h) - e}{\text{размер\_ячейки}^2}$$

Значения  $d, f, h, e$  – значения высот в советующих ячейках окна фильтра (рисунок 3.6а).

Рассчитанные траектории (рисунок 3.11а) для района Светлогорской бухты хорошо коррелируют с выделенными формами рельефа. Так в районе м. Таран и п. Отрадное траектория следуют вдоль обнаруженной положительной форме рельефа. Одна из траекторий проходит вдоль обнаруженного канала в районе г. Пионерский. Расположение данных траекторий хорошо согласуется с данным площадной съемки методов ГЛБО [Информационный ..., 2014] на участках Светлогорской и Пионерской бухт (участок от м. Гвардейский до Отрадненского выступа, глубины 5-15). Совместное сравнение рассчитанных потенциальных траекторий с классификацией типа донных осадков из [Информационный ..., 2014] (рисунок 3.13) показало, что данные траектории хорошо согласуются с участками дна подводного берегового склона на которых наблюдаются крупные рифели, относительно грубозернистый состав песков, что, по мнению авторов [Информационный ..., 2014], свидетельствует о активной придонной литодинамике и транзите мелкопесчаных фракций. Также авторы [Информационный ..., 2014] делают следующий вывод: «...Характер осадков и микрорельеф дна свидетельствуют об активной придонной гидродинамике, но при этом динамическое воздействие водной толщи на морское дно имеет строго локальный и при этом перманентный характер...». Данный факт хорошо согласуется с выдвинутым предположением о квазистационарном характере в траектории движения сформированных высокоэнергетических взвесенесущих вдольсклоновых придонных течений штормовой природы, способных осуществить транспорт взвешенных наносов из приурезной зоны до внешней границы береговой зоны моря.

В районе от м. Гвардейский и до г. Зеленоградск на северном побережье Калининградского полуострова (рисунок 3.11б) также отмечаются характерные траектории, которые приурочены к обнаруженным морфологическим особенностям. В п. Куликово данные траектории располагаются вдоль западного и восточного склонов вытянутого локального поднятия. В прибрежных водах г. Зеленоградска на фоне отсутствия явно выраженных морфологических особенностей с поперечной к берегу ориентацией, неоднородности на дне все же формируют несколько потенциальных траекторий для уноса взвешенных наносов.

Рассчитанные траектории наискорейшего спуска на участке от п. Янтарный до п. Донское (рисунок 3.11в) четко повторяют геометрию морфологических особенностей. В

районе севернее г. Балтийск (рисунок 3.11г), который характерен гладким дном подводного берегового склона, ярко выраженных траекторий не наблюдает.

Расчет кривизны поверхности подводного берегового склона (рисунок 3.12) подтверждает результаты расчетов траекторий наискорейшего спуска. Участки, для которых значения кривизны принимают отрицательные значения, что соответствует вогнутой форме поверхности, отмечаются для всех ранее выделенных участков.

**Вывод.** Расчет траекторий наискорейшего спуска и кривизны поверхности подводного берегового склона для данных участков показал, что в совокупности с большими объемами взвешенного вещества в штормовых условиях в прибрежной зоне данные формы рельефа способны обеспечивать формирование локализованных в пространстве интенсивных взвесенесущих потоков. Данный орографический фактор влияет на баланс наносов, путем уноса взвешенного вещества на большие глубины, тем самым приводит к его недостатку для питания пляжей. Данный фактор важно учитывать при оценке динамики взвешенного материала и динамики берегов.

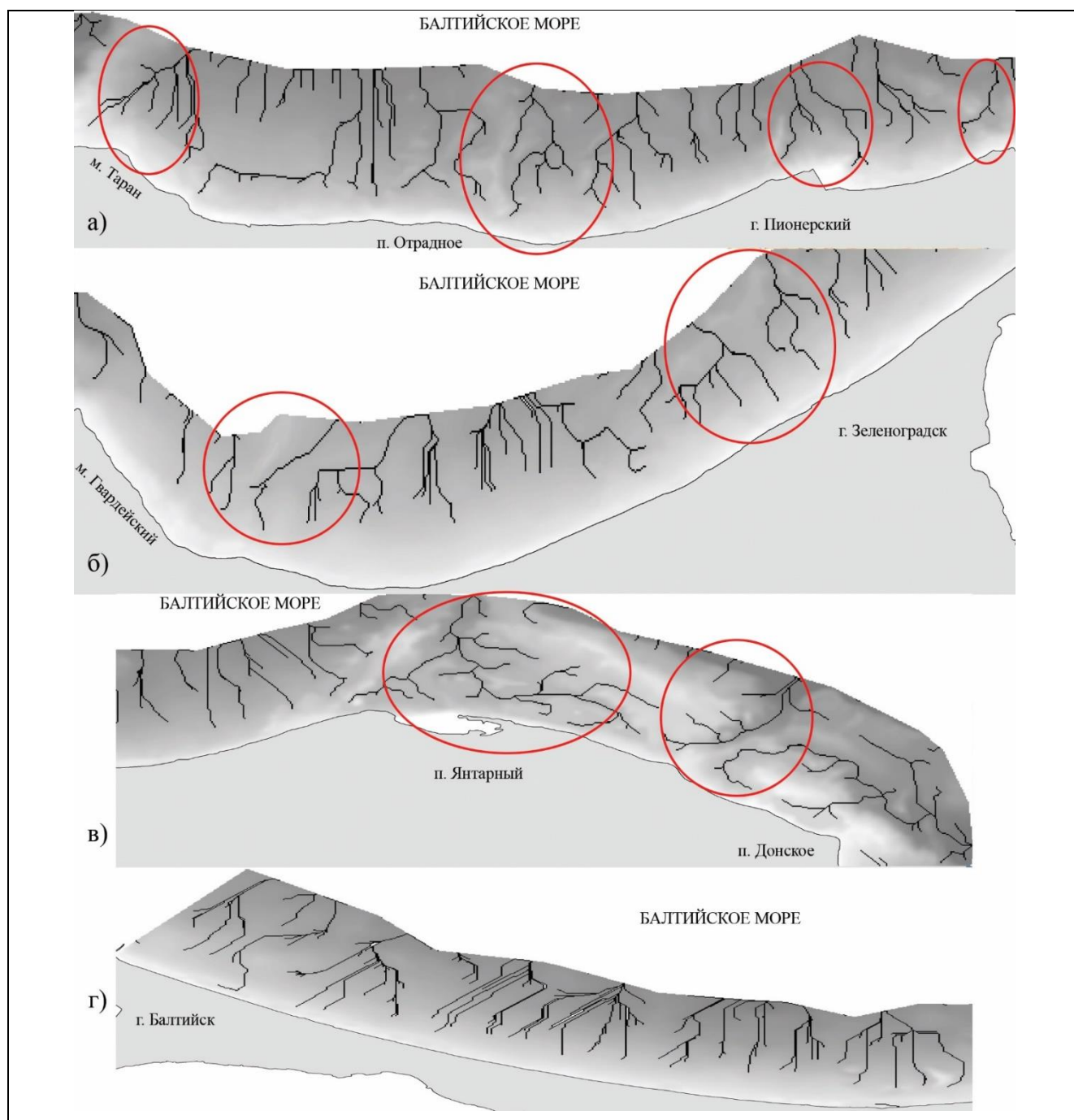


Рисунок 3.11 – Траектории наискорейшего спуска для используемой цифровой модели рельефа для Светлогорской бухты (от мыса Таран до г. Пионерский) (а), района мыса Гвардейский до г. Зеленоградск (б), района от п. Янтарный до п. Донское (в) и района от г. Балтийск до п. Янтарный (г). Красными овалами выделены районы с характерными морфологическими особенностями.



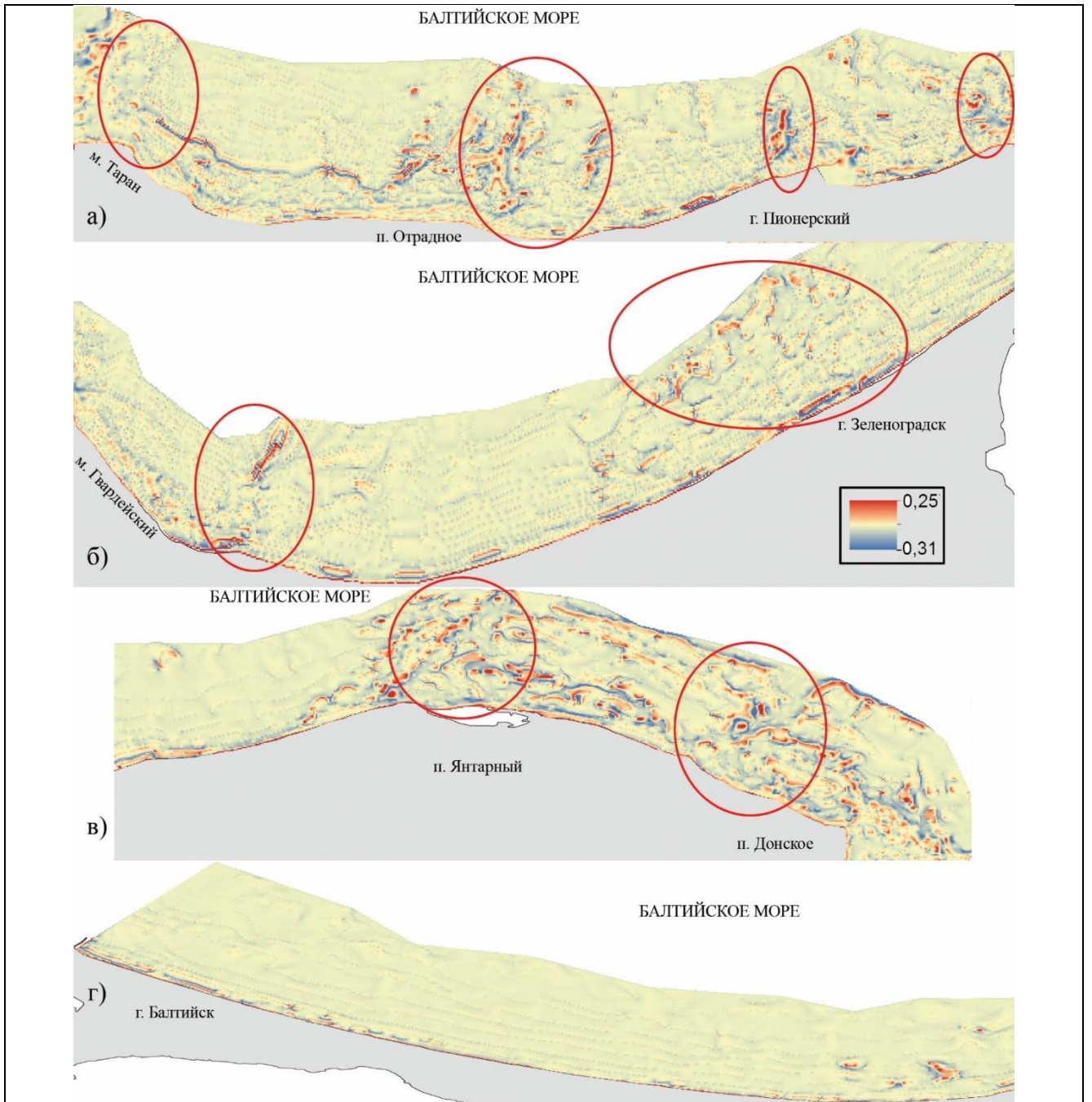


Рисунок 3.12 – Рассчитанная кривизна поверхности для используемой цифровой модели рельефа для Светлогорской бухты (от мыса Таран до г. Пионерский) (а), района мыса Гвардейский до г. Зеленоградск (б), района от п. Янтарный до п. Донское (в) и района от г. Балтийск до п. Янтарный (г). Красными овалами выделены районы с характерными морфологическими особенностями Синие цвет соответствует вогнутым участкам поверхности, красный цвет – выпуклым. Желтый цвет обозначает участки выровненной поверхности.

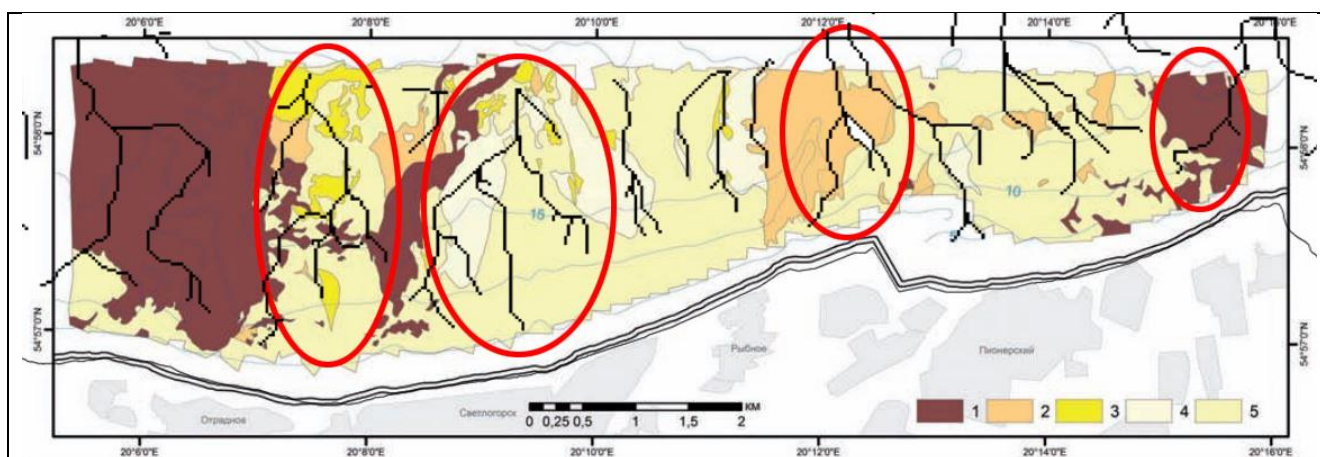


Рисунок 3.13 – Сравнение результатов схемы интерпретации площадной съемки методом ГЛБО [Информационный ..., 2014] и рассчитанных траекторий наискорейшего спуска в районе Светлогорской и Пионерской бухт. Красными овалами выделены участки с отмеченными морфологическими особенностями на дне. Легенда: 1 – преимущественно грубообломочные отложения (валуны, галька, гравий) с крупнозернистыми песками (сильная донная абразия); 2 – разнозернистые пески с гравием, галькой и мелкими валунами (донная абразия); 3 – крупно-среднезернистые пески с примесью гравийно-галечного материала с отчетливыми знаками ряби (рифелями) на поверхности дна (транзит); 4 – крупно-среднезернистые покровные пески с примесью гравийно-галечного материала с выровненной поверхностью морского дна (транзит); 5 – мелкозернистые покровные пески с выровненной поверхностью морского дна (транзит – аккумуляция).

### 3.1.4. Классификация участков береговой морфосистемы

Эффективная хозяйственная деятельность человека на побережье Калининградского полуострова требует полного понимания происходящих литодинамических процессов на подводном береговом склоне. Крайне важно понимать потенциальные финансовые затраты, которые могут возникнуть в ходе тех или иных мероприятий. Так, рекреационная деятельность и строительство в прибрежной зоне Калининградского полуострова требует затрат на постоянный мониторинг состояния берегов, своевременную ликвидацию последствий их разрушения, а также проведения дорогостоящих берегозащитных и берегоукрепительных мероприятий. Поэтому актуальной задачей является крупномасштабное районирование береговой зоны по

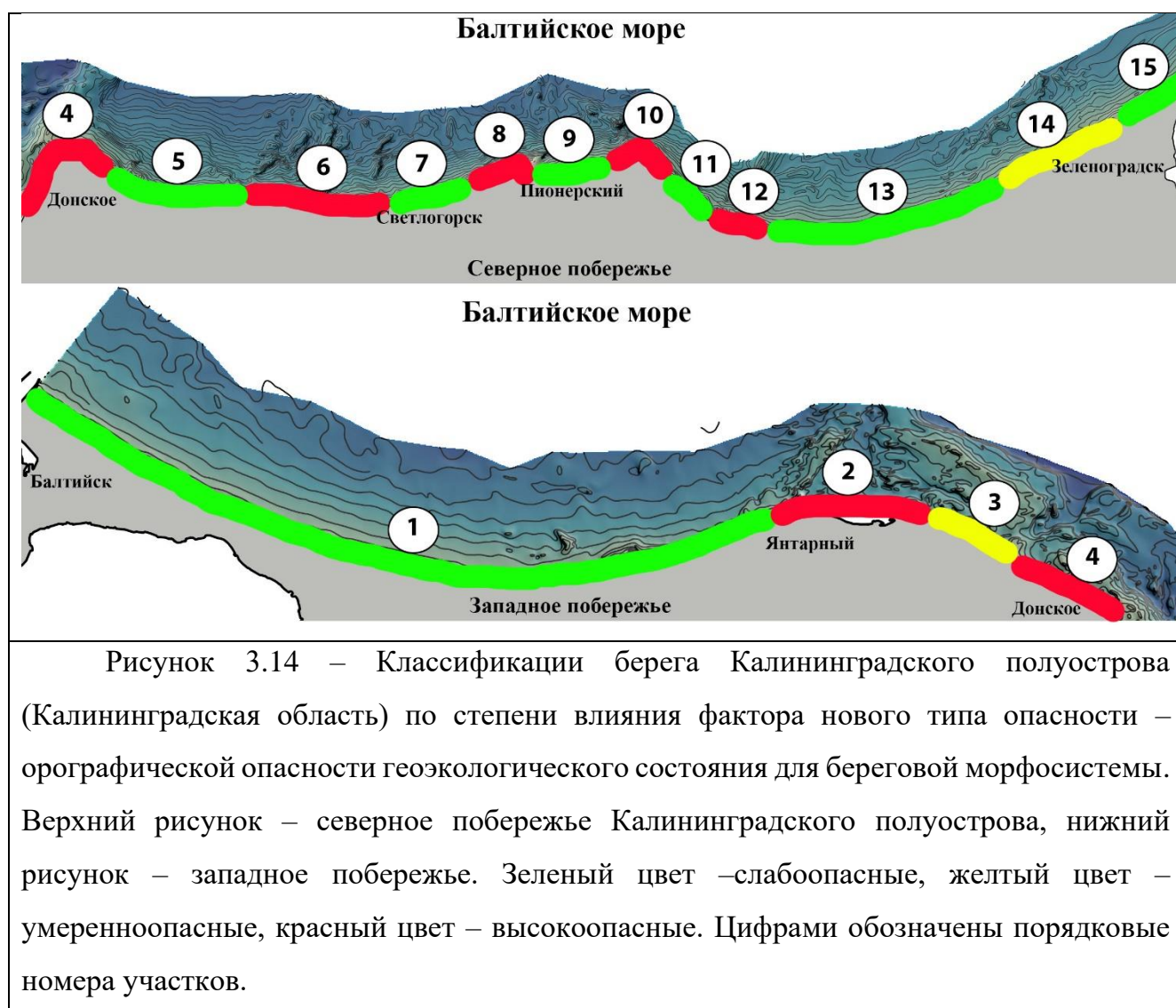


степени влияния опасности ранее описанного орографического фактора подводного берегового склона.

Положение границ выделяемых районов основывается на результатах расчетов основным морфологических характеристик, описанных в разделе 3.1.2, а также расчетов траекторий наискорейшего спуска и кривизны поверхности, описанных в разделе 3.1.3. Совместный учет двух полученных компонент позволил выделить 3 типа районов по степени влияния орографической опасности для береговой морфосистемы (рисунок 3.14, таблица 3.1). *Первый тип (слабоопасные)* соответствует участкам подводного берегового склона, для которых не обнаружено чередование положительных и отрицательных форм рельефа. Для данных районов характерен гладкий рельеф подводного берегового склона. *Второй тип (умеренноопасные)* характеризуется наличием морфологических неоднородностей на дне, однако в данном районе не наблюдаются явно выраженные морфологические особенности с поперечной к берегу ориентацией, но неоднородности на дне все же формируют несколько потенциальных траекторий для уноса взвешенных наносов. *Для третьего типа (высокоопасные)* отмечается хорошая корреляция между выделенными формами рельефа и рассчитанными траекториями. Именно в районах третьего типа в штормовых условиях наиболее вероятен вынос больших объемов взвешенных наносов из приурезовой зоны к морской границе береговой зоны.

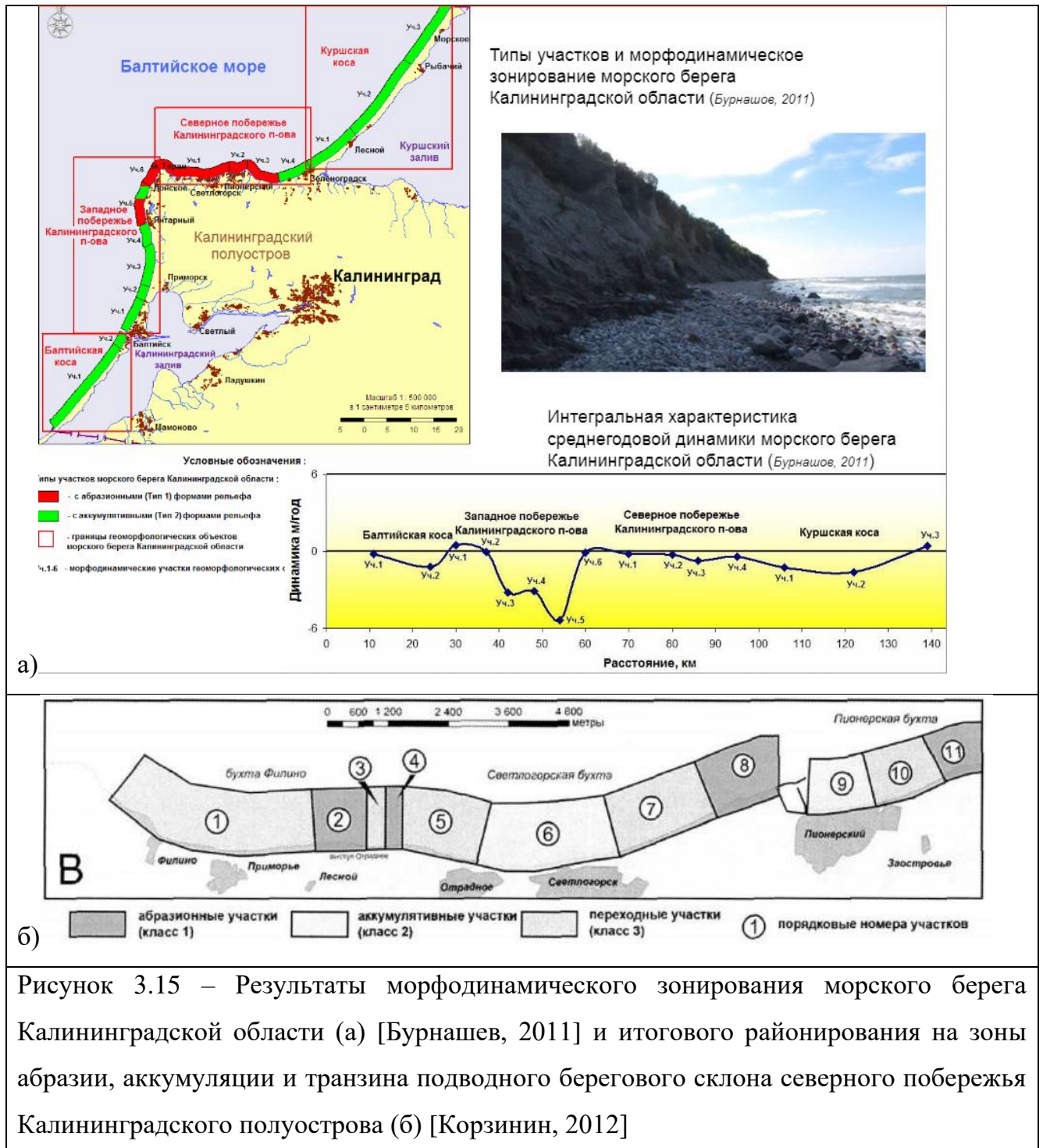
Таблица 3.1 – Критерии, используемые при классификации морского побережья Калининградского полуострова по степени влияния фактора орографической опасности для береговой морфосистемы.

Тип	Наличие неоднородностей	Наличие выраженных траекторий наискорейшего спуска
Первый тип <i>(слабоопасные)</i>	Отсутствуют, гладкое дно	Отсутствуют
Второй тип <i>(умеренноопасные)</i>	Присутствуют, но нет выраженной кросс-склоновой ориентации	Присутствуют
Для третьего типа <i>(высокоопасные)</i>	Присутствуют, имеется выраженная кросс-склоновая ориентация	Присутствуют



К участкам первого типа, для которых степень влияния орографической опасности минимальна, относятся участки подводного берегового склона от г. Балтийск до п. Янтарный (участок 1), участки в пределах Филинской, Светлогорской и Пионерской бухт (участки 5, 7, 9), участок восточнее м. Гвардейских (участок 11), участок от п. Куликово до г. Зеленоградск и основание Куршской косы (участки 13 и 15). Участки второго типа отмечаются на участке между поселками Синявино и Донское (участок 3), а также в районе г. Зеленоградск (участок 14). Участки третьего типа, для которых степень влияния орографической опасности максимальна, приурочены к участкам берега, для которых характерны интенсивные абразионные процессы. Их положение хорошо согласуется с исследованиями, направленными на изучение динамики берегов. Так, участки 1 и 2 типов хорошо коррелируют с положением аккумулятивными формами рельефа для участков морского берега Калининградской области [Бурнашев, 2011, Ostrowski et al., 2014]

(рисунок 3.15а). В пределах Филинской, Светлогорской и Пионерской бухт получено очень хорошее соответствие с разделением подводного берегового склона на зоны абразии и аккумуляции выполненным в [Корзинин, 2012] (рисунок 3.15б).



**Вывод.** Таким образом, данный подход классификации берега Калининградского полуострова (Калининградская область) по степени влияния ранее не выделяемой

орографической опасности для береговой морфосистемы позволяет на основе набора данных о рельефе подводного берегового склона определить участки наиболее подверженные потенциальному разрушению в результате уноса взвешенного вещества на большие глубины в штормовых условиях в виде придонных взвесенесущих течений, тем самым приводит к его недостатку для питания пляжей. Данный фактор важно учитывать при планировании рекреационных, рыбопромысловых и строительных мероприятий на берегах Калининградского полуострова.

### **3.2. Вероятностная оценка повторяемости фактора орографической опасности**

Хорошо известно, что устойчивость берега к абразии зависит от большого числа различного рода факторов. Данные факторы достаточно полно определены в классических работах В.П.Зенковича [1958], В.В.Лонгинова [1963], Ю.Д.Шуйского [1982], Н.А.Айбулатова [1990] и многих других.

Гидродинамические процессы, которые являются одним из основным фактором, влияющим на перемещение взвешенных наносов, зависят, в основном, от интенсивности ветро-волнового воздействия и угла подхода волн к линии берега. Интенсивность вдольберегового и поперечного переноса взвеси меняется от участка к участку и определяется изменяющейся силой и углом подхода ветра, величиной нагона, а также морфологическими особенностями подводного берегового склона и береговой линии [Шадрин, 1972; Massel, 1989; Жиндарев, 1997; Бабаков, 2003]. В частности, увеличение уровня моря в условиях шторма способствует усилению разрушительного действия волн на прибрежную зону. Ярким примером такого рода штормового воздействия в Калининградской области (Россия) является период с конца ноября 2011 года по январь 2012 года [Бобыкина и Стонт, 2015; Соколов и др., 2016]. Численное моделирование уровня штормового нагона в районе г. Зеленоградск (Калининградская область, Россия) за период с 11 по 15 января 2012 года и осредненных по глубине течений, выполненного в [Соколов и др., 2016], показало, что усиление ветра западных румбов до 22 м/с в ночь с 12 на 13 января (рисунок 3.16) может привести к существенному росту уровня моря. Нагон составил около 48 см, а штормовые ветра северо-западных румбов привели к нагону в 57 см. Кроме того, осредненные по глубине скорость течения составляли 50-80 см/с. Стоит отметить, что таких скоростей течений, совместно с значительным волновым

воздействием, вполне достаточно для формирования больших объемов взвесенасыщенных вод. Данный шторм привел к значительному материальному ущербу, который составил более 100 млн. руб. [Рекомендации ..., 2012; Бобыкина и Стонт, 2015]

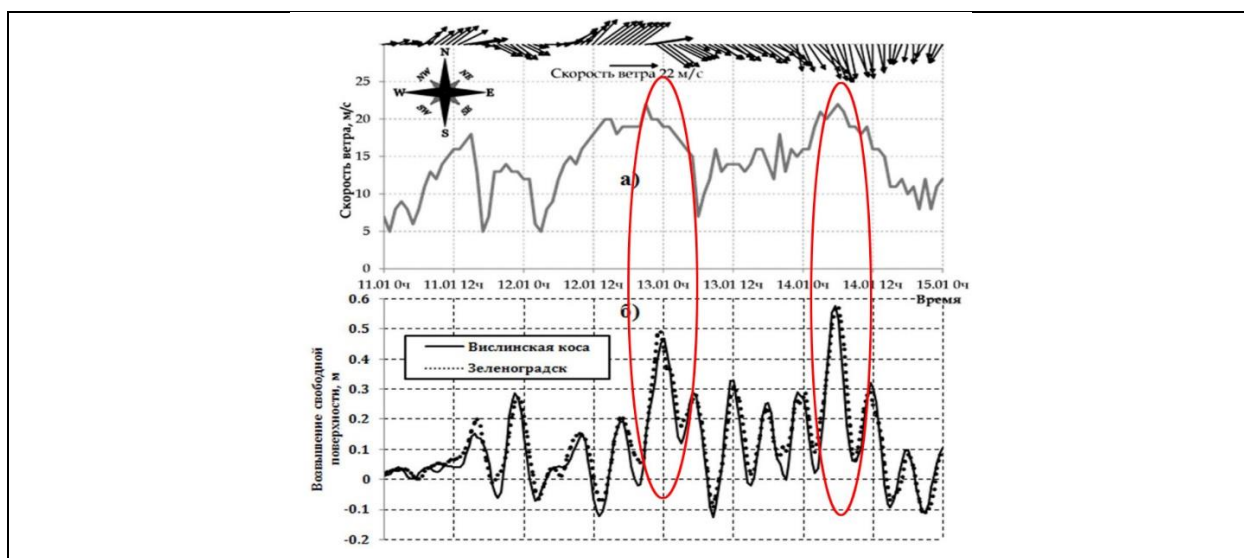


Рисунок 3.16 – Временные ряды параметров приземного ветра (а) и модельный уровень штормового нагона (б) [Соколов и др., 2016] в районе г. Зеленоградск 11-15 января 2012 года. Отчетливо прослеживается взаимосвязь между штормовым ветром, скорость которого временами превышает 20 м/с, и существенным повышением уровня моря в районе г. Зеленоградск. Штормовой нагон достигал значений в 60 см. На рисунке данные ситуации максимального нагона отмечены красными овалами.

Анализ натуральных данных за период с 1972 по 2008 года [Tylkowski, 2017], характеризующие зависимость между объемами потерь песчаного материала с морского берега Польши (юго-восточная Балтика) и уровнем моря показал (рисунок 3.17), что максимальный штормовой нагон наблюдается по ветрах западных и северо-западных румбов. При этом повышение уровня моря может превышать 1 метр, что приводит к потере более 300000 м<sup>3</sup> песчаного материала. Данный процесс приводит к значительному разрушению дюнных берегов, которые могут отступить до 10 метров за один штормовой период. Авторы отмечают, что обнаруженная связь между уровнем моря и потерями песчаного материала имеет экспоненциальный характер.

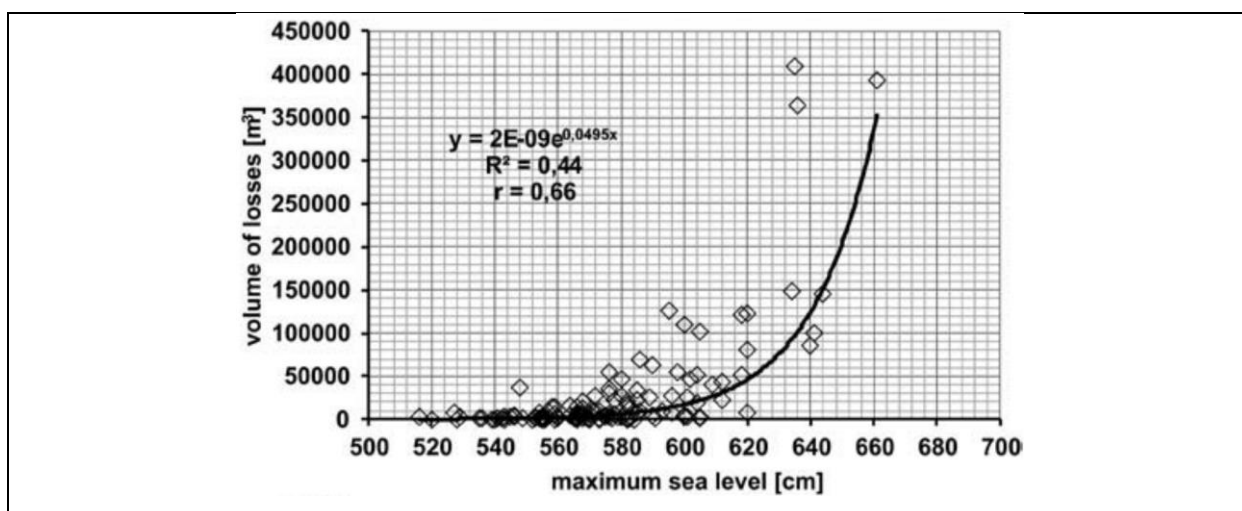


Рисунок 3.17 – График зависимости между объемами потерь песчаного материала с берега Польши и уровнем моря [Tylkowski, 2017]. По горизонтальной оси отложены значения максимального уровня моря (см), а по вертикальной – объем потерь песчаного материала ( $m^3$ ). Данная зависимость имеет явный экспоненциальный характер и описывается уравнением  $y = (2 * 10^{-9}) * e^{0.0495x}$ . График показывает, что рост уровня моря более чем на 50-80 см, приводит к объемам потерь более 50000-100000  $m^3$ .

Таким образом, важной задачей является оценка потенциального роста уровня моря для различных участков берега Калининградского полуострова в штормовых условиях. Ветровой нагон и ветро-волновое воздействие при штормовых ситуациях рассматриваются как основные процессы, приводящие к возникновению ранее обозначенного фактора орографической опасности для береговой морфосистемы Калининградского полуострова.

### 3.2.1. Описание модели прибрежной динамики юго-восточной Балтики

Моделирование потенциальных максимальных значений уровня моря в прибрежной зоне выполнено с использованием гидродинамической модели SHYFEM [Ungiesser et al., 2004]. Данная модель основана на интегрированных по вертикали уравнениях мелкой воды как в двумерной, так и трехмерной постановках.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + RU + X = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + RV + Y = 0$$



$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0$$

где  $\zeta$  – уровень воды;  $u, v$  – компоненты скорости в направлении  $x$  и  $y$ ;  $U, V$  – проинтегрированные по вертикали компоненты скорости:  $U = \int_{-h}^{\zeta} u dz$ ;  $V = \int_{-h}^{\zeta} v dz$   
 $g$  – ускорение свободного падения,  $H = h + \zeta$  – глубина воды,  $h$  – глубина при спокойной воде,  $t$  – время и  $R$  – коэффициент трения.

В данной модели также реализована модель ветрового волнения, модель переноса для Эйлера и Лагранжевого подходов. Метод конечных элементов, который используется в данной модели, позволяет моделировать бассейны со сложной морфологией и батиметрией. SHYFEM имеет возможность учитывать водную среду как баротропную, так и бароклинную, ветровое воздействие, трение на дне, вращение Земли. Для моделирования динамики взвеси в SHYFEM интегрирована модель переноса взвеси SEDTRANS [Neumeier et al., 2008]. Данная модель позволяет оценить уровень эрозии и седиментации под действием течений и волнения. Данная модель широко применяется при решении большого круга практических задач. (частичный список публикаций можно посмотреть по <https://sites.google.com/site/shyfem/list-of-publications>). Разработкой занимается Институт морских наук (Венеция, Италия).

Модельное пространство представляет собой район юго-восточной Балтики, полностью охватывающий побережье Калининградской области, а также глубоководную часть Гданьской впадины (рисунок 3.18). Для более подробного учета особенностей береговой линии и прибрежного подводного рельефа использовалась неравномерная сетка из треугольных элементов. В прибрежной части сделана более подробная сетка. В качестве батиметрических данных использовались данные эхолотных промеров АОИРАН, данные о глубинах в акватории открытого моря [Seifert and Kayser, 1995]. В прибрежной части в качестве данных о батиметрии использовались данные промеров ГБУ КО "Балтберегозащита". Закрытые границы сетки максимально удалены от исследуемого района, чтобы минимизировать их потенциальное влияние. Ветер задавался, как единственная движущая сила. Для описания вертикальной структуры модельного пространства использовалось 13 z-слоев: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 50, 100 м.

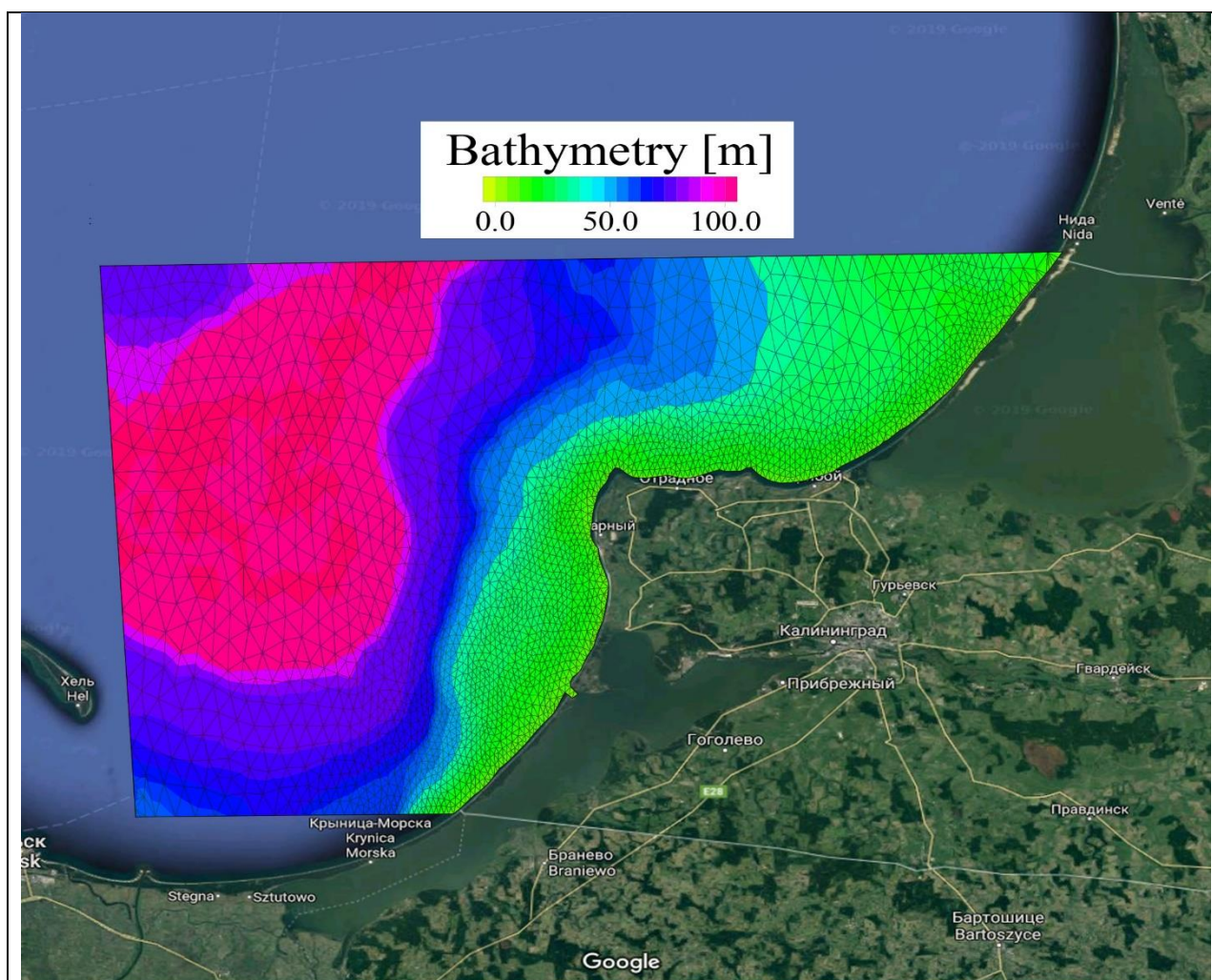


Рисунок 3.18 – Карта-схема модельного пространства, описывающая район юго-восточной Балтики, полностью охватывающий побережье Калининградской области, а также глубоководную часть Гданьской впадины. Цветовая шкала описывает батиметрию данного района. Основа для построения карты-схемы взята из maps.google.ru.

### 3.2.2. Калибровка модели по натурным данным с прибрежной мониторинговой станции

На первом этапе была выполнена калибровка основных параметров численной модели, в частности, коэффициентов трения ветра о водную поверхность и трения воды о дно. Для этого выполнено моделирование реальной штормовой ситуации, которая наблюдалась в период с 24 апреля 2019 по 5 мая 2019 года (рисунок 3.19). Данный период характеризовался активным атлантическим циклон и связанным с ним атмосферным фронтом. Во второй половине дня 1 мая вызвали усиление юго-западного ветра до 12-16



м/с и резкое падение уровня ниже ординара до  $-40$  см. Снижение скорости западного ветра до  $5$  м/с привело к быстрому росту уровня до ординара.

В результате калибровки получено хорошее соответствие модельного и реального уровня моря в районе мониторинговой станции НП «Куршская коса» (рисунок 3.20). Величина значимого при  $\alpha=0.05$  коэффициента корреляции составила  $0.73$ . Отмечается практически синхронная реакция на ветровое воздействие, однако модель несколько занижала максимальные значения при нагонном ветре. Данный факт, по-видимому, объясняется тем, что в модельном пространстве ветер задавался однородным над всей областью модельного пространства, шаг по времени в данных по ветру составлял  $6$  часов. Таким образом, неоднородность пространственного распределение ветра, а также достаточно грубый шаг по времени вносят свое влияние в результаты численного моделирования.

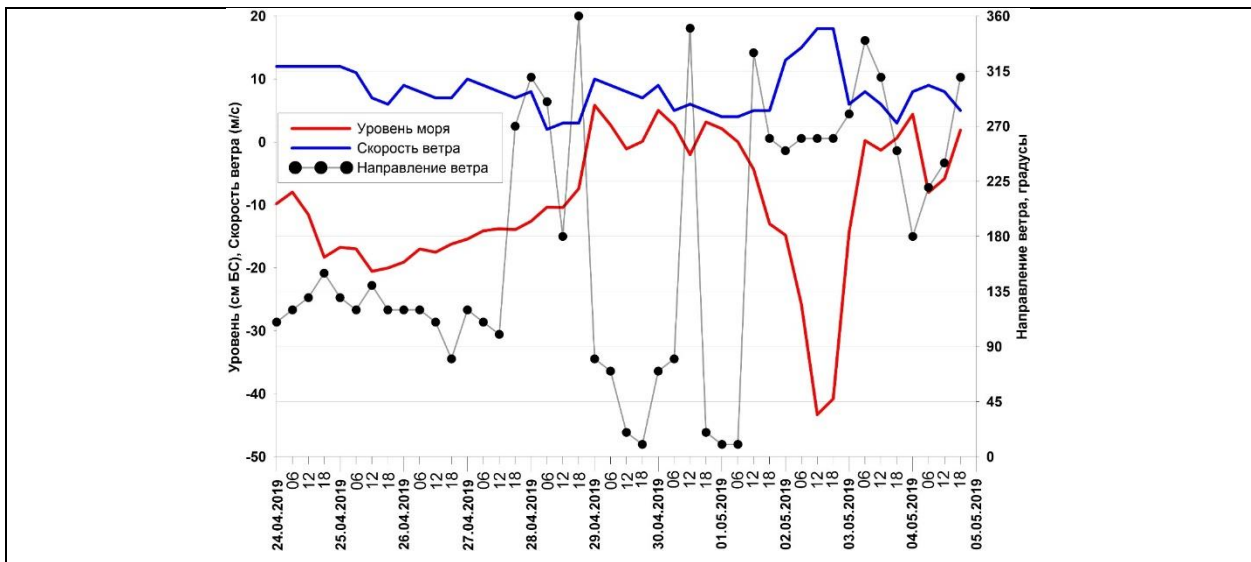


Рисунок 3.19 – Временные ряды скорости ветра (синяя линия), направления ветра (черная линия) и уровня моря (красная линия) для периода с 24 апреля 2019 по 5 мая 2019 года. Данные зафиксированы на мониторинговой станции НП «Куршская коса».

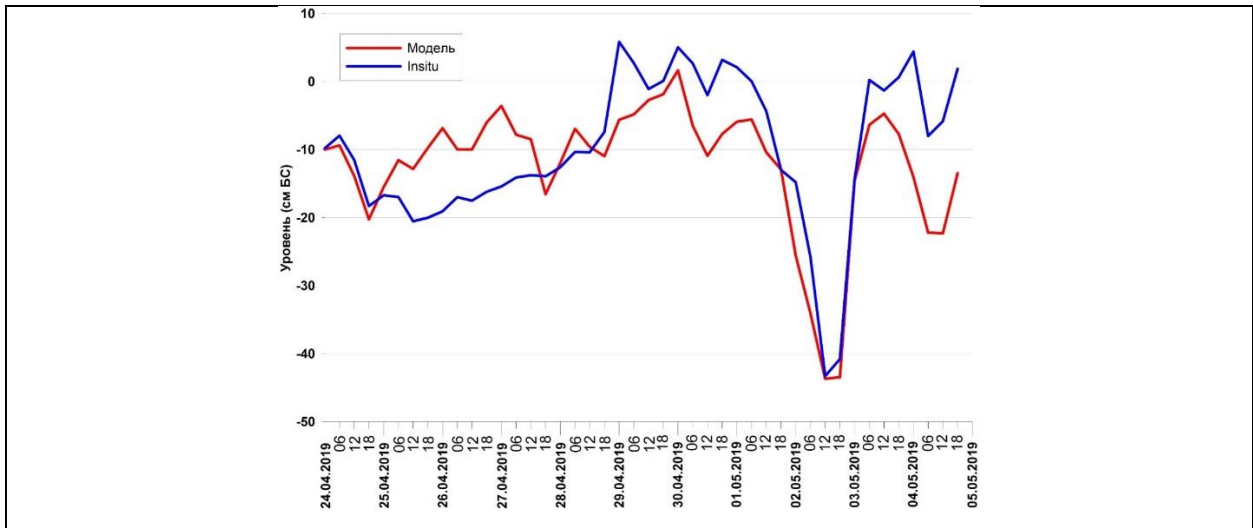


Рисунок 3.20 – Результаты калибровки численной модели на реальных данных по уровню моря в период с 24 апреля 2019 по 5 мая 2019 года. Синяя линия описывает временной ход уровня моря по натурным данным; красная линия – модельные расчеты для той же точки пространства.

В ходе калибровки модели удалось подобрать значения коэффициентов трения ветра о поверхность воды, а также трения воды о дно. Наилучшее совпадение модельных расчетов и натурных данных получилось при значении безразмерных коэффициентов 0.0015.

### 3.2.3. Моделирование ветровых сценариев

Основной целью выполненного моделирования является определить ветра каких румбов способствую формированию максимального роста уровня моря для ранее выделенных участков при классификации побережья Калининградского полуострова по степени влияния орографической опасности для береговой морфосистемы (см. раздел 3.1.4, рисунок 3.14). Для каждого из пятнадцати выделенных участков выбрана точка, для которой выполнен расчет ветрового нагона. Данные точки выбирались в середине участков на некотором удалении от берега, чтобы снизить потенциальное влияние расчетной границы. Координаты соответствующих точек представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Координаты пробных точек для выделенных участков при классификации побережья Калининдского полуострова по фактору орографической опасности для береговой морфосистемы.

№	Координаты точки	№	Координаты точки
---	------------------	---	------------------

участка		участка	
1	19,95245//54,73299	9	20,244431//54,95916
2	19,931789//54,8652	10	20,275379//54,96463
3	19,943119//54,91589	11	20,2955//54,95229
4	19,972059//54,954769	12	20,315519//54,9453588
5	20,0345//54,94949	13	20,387011//54,9446
6	20,11779//54,95	14	20,45//54,95787
7	20,17149//54,954029	15	20,507259//54,979382
8	20,20743//54,961441		

Для решения сформулированной задачи выполнен расчет следующих модельных сценариев:

- 1) Скорость ветра: 10 м/с. Данное значение выбрано, как нижняя граница характерная для штормового ветра.
- 2) Направления: северный (0°), северо-западный(315°), западный(270°), юго-западный (225 °), южный(180°), юго-восточный (135 °), восточный(90°), северо-восточный (45 °).
- 3) Расчетное время: 10 дней. Данное значение выбрано так, чтобы в модельном пространстве поле течений и уровень моря вышли на некоторый стационарный уровень. Предварительные расчеты показали, что данное условие достигается примерно за 60 расчетных часов.

Результаты численного моделирования по уровню моря и скорости осредненных по вертикали скоростей течений представлены в таблице 3.3 и 3.4 соответственно.

Общей чертой для всех пробных точек является то, что в 4 из 8 сценариях наблюдается сгон воды. Так, для участков 2, 3, 4 сгон фиксировался при северном (0°), северо-восточном (45 °), восточном (90°), юго-восточном (135 °) ветрах. Для всех остальных участков 1, 5-15 сгон возникает при северо-восточном (45 °), восточном (90°), юго-восточном (135 °) и южном (180°) ветрах. Максимальное падение уровня моря для всех рассматриваемых участков формирует восточный (90°) ветер. Уровень моря опускается до 9 см. Ветра северо-восточного (45 °) и юго-восточного (135 °) румбов

приводят к понижению уровня в диапазоне от 4 до 7 см. Наименьшее воздействие на водную поверхность создают северные и южные ветра. Значения сгона находятся в пределах 1 см. Стоит отметить, что сгон на северном побережье Калининградского полуострова всего больше, чем на западном.

Поднятие уровня моря у берега Калининградского полуострова также наблюдался в 4 из 8 ветровых сценариях. Для участков 2, 3, 4 нагон фиксировался при северо-западном ( $315^\circ$ ), западном ( $270^\circ$ ), юго-западном ( $225^\circ$ ) и южном ( $180^\circ$ ) ветрах. Для всех остальных участков 1, 5-15 нагон возникает при северном ( $0^\circ$ ), северо-западном ( $315^\circ$ ), западном ( $270^\circ$ ) и юго-западном ( $225^\circ$ ) ветрах. Максимальный нагон воды к берегу формируется при западном ( $270^\circ$ ) ветре. Для западного побережья Калининградского полуострова (участки 1-4) значения нагона составляют 6-7 см. На северном побережье (участки 5-15) нагон несколько больше и составил от 6-9 см. Северо-западный ( $315^\circ$ ) ветер тоже способствует поднятию уровня моря, значения варьировались от 4 до 7 см. Юго-западный ( $225^\circ$ ) ветер тоже приводит к нагону, но значения еще меньше, чем в предыдущих случаях, и варьировались в диапазоне от 4 до 6 см. В остальных ветровых сценариях при западном и северном ветрах нагон практически не наблюдался и составил от нескольких миллиметров до 1 см. Общей чертой для всех модельных сценариев является тот факт, что западное побережье Калининградского полуострова подвержено несколько меньшему повышению уровня моря при постоянных ветрах со скоростью 10 м/с, чем северное побережье. Для северного побережья Калининградского полуострова тоже наблюдается некоторая дифференциация. Так, в Филинской, Светлогорской и Пионерской бухтах (участок 5-10) нагон несколько меньше, чем для района г. Зеленоградск (участки 13-15). Участки 13-15 подвержены максимальному ветрово-волновому воздействию, связанному со нагоном, сгоном воды. Увеличение глубины моря в прибрежной части, связанной с ветровым нагоном, способствует формированию благоприятных условий для подхода волн ближе к урезу. Кроме того, недостаточная ширина и высота песчаных пляжей также способствует интенсивному разрушению берегов в периоды штормов.

Рассчитанные осредненные по глубине скорости течений показали на возможность формирования достаточно интенсивных течений в зоне вблизи уреза (таблица 3.4). Так, при ветрах, формирующих максимальный нагон, скорости течений варьируются от 30-40

см/с. Таких скоростей течений достаточно для запуска процессов переноса взвешенного материала из зоны ветро-волнового воздействия.

Таблица 3.3 – Значение рассчитанных изменений уровня моря в пробных точках при различных ветровых сценариях.

Направление ветра	Уровень моря (м)							
	0	45	90	135	180	225	270	315
1	0,01	-0,04	-0,07	-0,03	-0,01	0,05	0,07	0,05
2	0,00	-0,05	-0,06	-0,04	0,01	0,05	0,06	0,04
3	-0,01	-0,05	-0,06	-0,04	0,01	0,05	0,06	0,04
4	-0,01	-0,05	-0,07	-0,04	0,01	0,05	0,06	0,04
5	0,01	-0,04	-0,03	-0,05	0,00	0,04	0,06	0,05
6	0,01	-0,04	-0,07	-0,05	0,00	0,04	0,06	0,05
7	0,01	-0,04	-0,07	-0,05	-0,01	0,04	0,07	0,05
8	0,00	-0,05	-0,07	-0,05	0,00	0,05	0,07	0,05
9	0,00	-0,05	-0,07	-0,06	0,00	0,05	0,07	0,05
10	0,00	-0,05	-0,07	-0,06	0,00	0,05	0,07	0,06
11	0,01	-0,04	-0,07	-0,06	-0,01	0,04	0,07	0,06
12	0,01	-0,05	-0,08	-0,06	-0,01	0,05	0,08	0,06
13	0,01	-0,05	-0,09	-0,07	-0,01	0,05	0,08	0,07
14	0,00	-0,06	-0,09	-0,07	-0,01	0,06	0,09	0,07
15	0,00	-0,06	-0,09	-0,07	0,00	0,06	0,09	0,07

Таблица 3.4 – Значение рассчитанных осредненных по глубине скоростей течений (м/с) в пробных точках при различных ветровых сценариях.

Направление ветра	Скорость течения (м/с)							
	0	45	90	135	180	225	270	315
1	0,32	0,30	0,16	0,26	0,35	0,31	0,15	0,26
2	0,35	0,22	0,24	0,38	0,38	0,23	0,22	0,38
3	0,32	0,30	0,15	0,23	0,35	0,32	0,14	0,23
4	0,37	0,40	0,30	0,21	0,41	0,44	0,28	0,21
5	0,08	0,25	0,34	0,29	0,08	0,27	0,31	0,29
6	0,06	0,27	0,37	0,31	0,06	0,30	0,34	0,31
7	0,11	0,29	0,34	0,25	0,13	0,31	0,31	0,25
8	0,18	0,30	0,34	0,22	0,19	0,33	0,31	0,22
9	0,16	0,29	0,32	0,19	0,18	0,32	0,29	0,19
10	0,15	0,35	0,41	0,30	0,17	0,38	0,38	0,30

11	0,22	0,02	0,26	0,30	0,24	0,02	0,24	0,30
12	0,12	0,24	0,35	0,32	0,13	0,26	0,32	0,32
13	0,19	0,31	0,34	0,21	0,21	0,34	0,31	0,21
14	0,22	0,31	0,33	0,18	0,23	0,34	0,30	0,18
15	0,24	0,33	0,34	0,16	0,27	0,37	0,31	0,16

### 3.2.4. Анализ вероятности повторяемости фактора орографической опасности

Хорошо известно, что рекреационные ресурсы морского побережья являются значимыми факторами устойчивого развития Калининградской области.

Для Калининградской области, являющейся типичным примером прибрежной зоны, развитие своих рекреационных ресурсов на фоне продолжающегося мирового экономического кризиса жизненно необходимо. К сожалению, по своим климатическим условиям регион нельзя отнести к благоприятным для всех видов туризма [Гидрометеорология ..., 1992]. Лишь в июле-августе прибрежные морские воды прогреваются до минимально необходимой температуры комфортной для массового купания. Однако рекреационные возможности прибрежных ландшафтов имеют существенно более широкий временной диапазон - с апреля-мая по сентябрь-октябрь. Вместе с тем именно берега моря, как один из значимых факторов рекреационного потенциала региона, регулярно разрушаются в той или иной степени, часто безвозвратно теряя песок со своих пляжей. Поэтому полнота понимания основных закономерностей существования и эволюции своих морских берегов, безусловно, необходима для развития Калининградской области.

Деятельность человека всегда происходит в пределах существующих геосистем. В Калининградской области в современной береговой зоне наблюдается активное развитие экономической деятельности человека, которая выражается в рекреационной, строительной, промышленной и других видах деятельности. В результате подобной экономической деятельности происходит постоянное взаимодействие между береговой морфосистемой и человеком, что может привести к ее разрушению или угнетению. В свою очередь, возникающие опасные природные явления также оказывают значительное влияние на человеческую деятельность. Результатом данных опасных явлений, которые проявляются, например, в виде интенсивной абразии берегов, разрушении инфраструктуры и др., являются потери как экономического, так и

экологического характера. Для уменьшения данных потерь и принятия решения о том или ином экономическом действии необходимо проанализировать потенциальные источники потерь, которые, согласно [Карлин и Абрамов, 2006], называют опасностями. Основной целью анализа данных опасностей является оценка и прогноз возможного ущерба и разработка мер по его уменьшению. Данная информация обычно носит вероятностный характер.

Для прогноза возможного ущерба  $U_A$  от опасности  $A$  автором [Карлин и Абрамов, 2006] предложено использовать так называемый риск  $R_A$ , зависящий от вероятности  $P_A$  появления этого события:

$$R_A = R(U_A, P_A), \quad (4)$$

где  $R$  – некоторый функционал. Вид данного функционала может быть разным и зависит от задач прогноза и способов использования этой оценки.

В рамках данной работы не предполагается непосредственно выполнять расчет какого-либо риска, задаваемого формулой (4). Однако будет выполнена вероятностная оценка ранее описанной орографической опасности для береговой морфосистемы  $P_A$ . Данный параметр позволит в дальнейшем выполнить оценку возможного ущерба от опасности  $A$ .

Как уже было показано в данной работе, оценка потенциальной орографической опасности для береговой морфосистемы в следствии возникновения и развития коротко живущих придонных взвесенесущих течений невозможна без рассмотрения характера поля ветра. Как было показано в [Жиндарев и Луговой, 2016], прогноз развития берегов сводится к прогнозу уровня режима Балтики. Ветро-волновое воздействие является основным фактором, который запускает данный механизм на рассматриваемом нами временном масштабе.

При исследовании режима штормового ветра данные по скорости ветра были разделены на 4 класса: 1) слабый ветер, скорость до 5 м/с; 2) умеренный ветер, скорость от 5 до 10 м/с; 3) сильный ветер, скорость от 10 до 15 м/с; 4) штормовой ветер, скорость от 15 м/с. По направлению было выделено 8 диапазонов, соответствующие принятым румбам. Для каждого выбранного класса и диапазона направлений рассчитана вероятность возникновения такой ветровой ситуации (таблица 3.5). Статистический

анализ повторяемости направлений ветров по данным с метеостанции, расположенной на морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП) Д-6 на месторождении Кравцовское в Балтийском море за период с 2006 по 2017 года показал (рисунок 3.21, таблица 3.5), что ветра западных румбов имеют наибольшую повторяемость, которая составила 22.1% от общего числа. Так же отмечается, что на три из восьми румбов, а именно юго-западный, западный и северо-западный, приходится практически 50% всех измерений. Сильные ветра, характерная скорость для которых составляет от 5 до 10 м/с, наибольшую повторяемость в 4.8% имеют для юго-западных ветров. Для ветров юго-западных румбов также преобладает и повторяемость штормовых ветров, значение которой равняется 1.4%. Повторяемость штормовых ветров западных и северо-западных румбов несколько меньше, 0.9% и 0.7% соответственно.

Таблица 3.5 – Детальное описание, характеризующее режим ветра в районе морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП) Д-6 на месторождении Кравцовское в Балтийском море за период с 2006 по 2017 года

Диапазон направлений	Общее количество	Скорость ветра (м/с)			
		<=5	>5 - 10	>10 - 15	>15
>22.5 - 67.5	7,4%	2,5%	3,6%	1,1%	0,1%
>67.5 - 112.5	12,1%	4,2%	5,7%	2,0%	0,3%
>112.5 - 157.5	11,5%	3,0%	5,3%	2,8%	0,5%
>157.5 - 202.5	12,3%	3,1%	5,9%	3,0%	0,4%
>202.5 - 247.5	14,4%	2,7%	5,6%	4,8%	1,4%
>247.5 - 292.5	22,1%	8,5%	9,0%	3,7%	0,9%
>292.5 - 337.5	11,8%	3,6%	5,1%	2,4%	0,7%
>337.5 - 22.5	8,3%	3,6%	3,6%	0,9%	0,3%



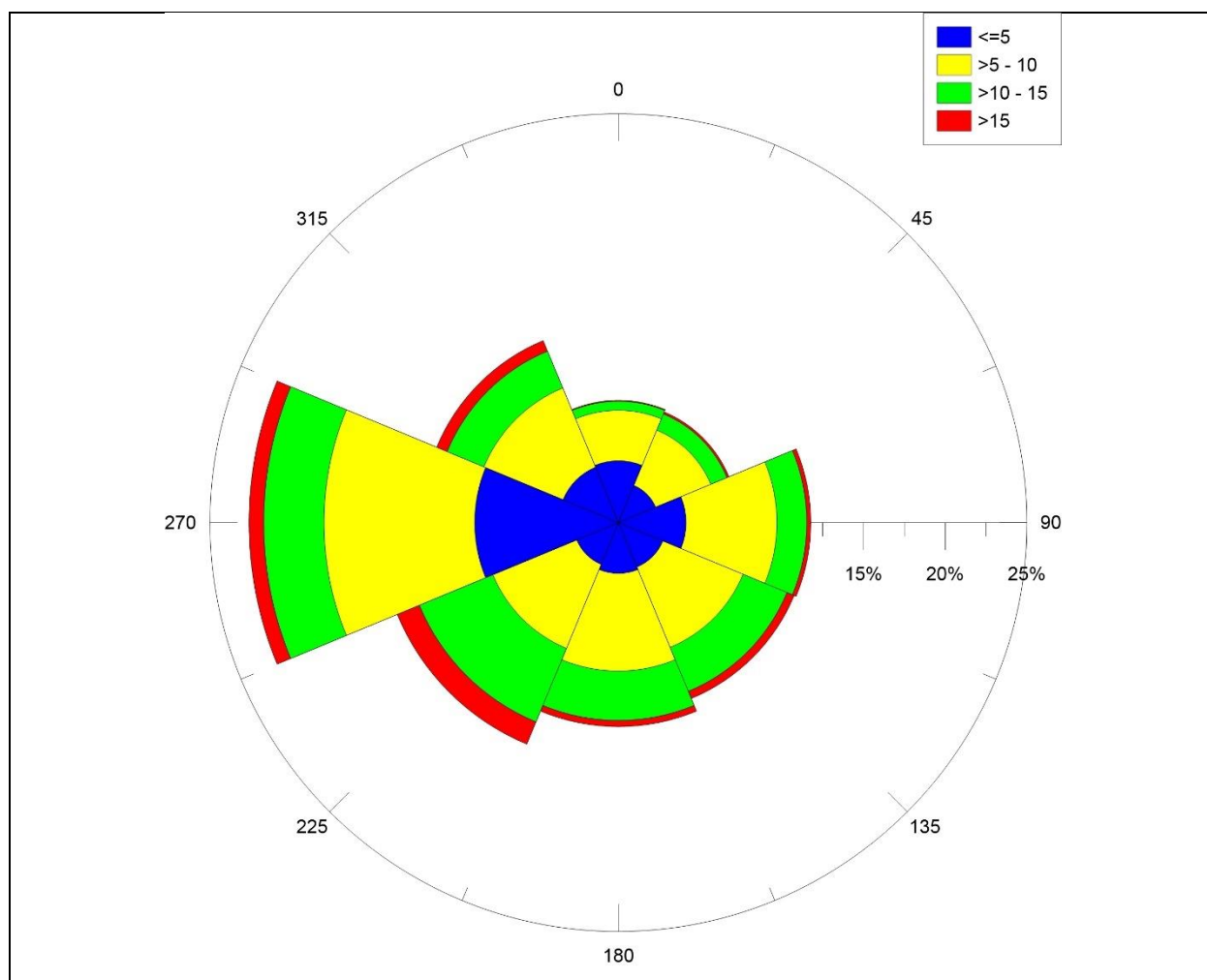


Рисунок 3.21 – Векторная восьмилучевая диаграмма, характеризующая режим ветра в районе морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП) Д-6 на месторождении Кравцовское в Балтийском море за период с 2006 по 2017 года. Отчетливо прослеживается преобладание ветров западных румбов. Наибольшее количество экстремальных штормовых ситуаций отмечается для ветров юго-западных румбов.

На сильные ветра (скорость от 10-15 м/с) юго-западного, западного и северо-западного румбов суммарно приходится чуть более 50% от числа ситуаций сильных ветров, а именно 10.9% при общем числе 20.6%. На штормовые ветра (скорость более 15 м/с) этих же румбов приходится уже 67% от числа ситуаций штормовых ветров, а именно 3% при общем числе 4.5%. Как показали результаты численного моделирования, именно ветра юго-западного, западного и северо-западного румбов приводят к максимальному повышению уровня моря у берегов Калининградского полуострова.

Расчет вероятностной оценки повторяемости (за 10-летний период) ранее описанной орографической опасности для береговой морфосистемы  $P_A$  выполнялось по следующей схеме. Для каждого участка, выделенного при классификации побережья Калининградского полуострова по фактору орографической опасности подводного берегового склона, выполнено нормирование значений рассчитанных изменений уровня моря в пробных точках при различных ветровых сценариях (таблица 3.3) на максимальное значение. Стоит отметить, что ситуации, при которых наблюдалась падение уровня моря, не учитывались. Данная процедура нормирования позволит оценить степень влияния ветров различных румбов в процентном соотношении от направления ветра, при котором наблюдается максимальный нагона. Так, на примере участка №15, из таблицы 3.3 видно, что максимальный нагон наблюдается при западном ветра и достигает 9 см. Выполним нормировку значений повышения уровня моря по следующей формуле (5):

$$\zeta_{d\_norm} = \frac{\zeta_d}{\zeta_{max}}, \quad (5)$$

где  $\zeta_d$  – уровень нагона в пробной точке при ветре, имеющим направление  $d$ ;  $\zeta_{max}$  – значение максимального нагона среди всех модельных сценариев. Результат нормирования для участка №15 представлен в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Пример результата процедуры нормирования на примере участка №15.

	Нормированный уровень моря (безразмерный)							
Направление ветра	0	45	90	135	180	225	270	315
Участок №15	0,02	сгон	сгон	сгон	сгон	0,67	1,00	0,77

Расчет вероятностной оценки ранее описанной орографической опасности для береговой морфосистемы  $P_A$  для данного участка при сильных ветрах (скорость от 10-15 м/с) рассчитывался, как сумма произведений вероятности повторяемости ветра соответствующего румба и скорости (таблица 3.5) на соответствующий данному направлению безразмерный нормированный уровень моря. Данное действие описывается формулой (6):

$$P_A = \sum_d (\zeta_{d\_norm} * P_{d\_w}), \quad (6)$$

где  $P_{d\_w}$  – вероятность повторения сильного ветра, имеющим направление  $d$  (таблица 3.5).

Аналогичная процедура выполнена и для штормовых ветром по формуле (7):

$$P_{A\_ext} = \sum_d (\zeta_{d\_norm} * P_{d\_ext}), \quad (7)$$

где  $P_{d\_ext}$  – вероятность повторения штормового ветра, имеющим направление  $d$  (таблица 3.5).

Данные показатели, представленные формулами (6) и (7), представляют собой интегральный показатель, который характеризует вероятность повторяемости ситуации (за десятилетний период), при которой ветро-волновое воздействие способствуют возникновению орографической опасности для береговой морфосистемы. Данные показатели учитывают различный характер воздействия ветров различных румбов.

**Выводы:** таким образом, результат расчетов данных показателей (таблица 3.7) показал, что из-за преобладания ветров западных румбов вероятность повторяемости (за десятилетний период) орографической опасности для устойчивости геоэкологического состояния береговой морфосистемы для участков, находящихся на западном побережье Калининградского полуострова, достигает для сильных и штормовых ветров 9.6% и 2.6% соответственно. Для участков на северном побережье Калининградского полуострова вероятность несколько ниже и составила 8.7% и 2.4% соответственно для сильных и штормовых ветров.

Таблица 3.7 – Вероятностная оценка повторяемости орографической опасности для береговой морфосистемы для сильных ветров (10-15 м/с)  $P_A$  и штормовых ветров (>15 м/с)

$P_{A\_ext}$ .

Участок	$P_A$ сильный ветер (10-15 м/с)	$P_{A\_ext}$ штормовой ветер (более 15 м/с)
1	8,9%	2,4%
2	9,5%	2,6%
3	9,6%	2,6%
4	9,3%	2,5%
5	8,8%	2,4%
6	8,8%	2,4%

7	8,8%	2,4%
8	8,7%	2,4%
9	8,4%	2,3%
10	8,8%	2,4%
11	8,7%	2,4%
12	8,7%	2,4%
13	8,7%	2,4%
14	8,7%	2,4%
15	8,7%	2,4%

### **3.3. Фактор орографической опасности и морской потенциал приморских территорий**

Основной задачей геоэкологии является изучение изменений жизнеобеспечивающих ресурсов геосферных оболочек под влиянием природных и антропогенных факторов, их охрана, рациональное использование и контроль с целью сохранения для нынешних и будущих поколений людей продуктивной природной среды.

Устойчивое социально-экономическое развитие тех или иных территорий в значительной степени зависит от планирования и принятия верных управленческих решений. Особенно остро проблема устойчивого развития стоит для приморских территорий. Согласно прогнозу ЮНЕСКО, в ближайшие двадцать лет на расстоянии менее 500 км от береговой линии будет проживать порядка 75% населения мира. Постоянно увеличивающееся антропогенное воздействие, выражающееся в развитии морехозяйственного комплекса, т.е. предприятий, которые располагаются на морском побережье, интенсивном развитии рекреационного комплекса, приводят к негативным последствиям, которые непосредственно влияют на человека.

Развитие приморских территорий, являющихся базой всех отраслей морской деятельности, характеризуется понятием морского потенциала приморских территорий [Гогоберидзе и др., 2010; Синецкий, 2007], которое описывает их экономическую значимость. Важность оценки данного потенциала приморских территорий является важной задачей стратегии национальной безопасности Российской Федерации и концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации [О некоторых вопросах..., 2008; об утверждении концепции..., 2008]. Существует достаточно большое количество факторов, воздействующих на морской потенциал

приморских территорий. Согласно [Гогоберидзе, 2008а, 2008б], упрощенно можно рассмотреть оценку морского потенциала приморских территорий в виде суммы природно-экологического и социально-экономического факторов воздействия.

Для оценки влияния различных факторов в последние десятилетия широко применяются различные системы индикаторов для целей географического и геоэкологического описания. Однако, до сих пор не выработана единая система. Обзоры, выполненные в работах [Домнин, 2017; Музалевский, 2009; Проблемы ..., 2019] показывают, что, как в отечественных, так и в зарубежных публикациях очень часто нет четкого определения таких понятий как «индикатор», «индекс» и тд. Количество различных «индикаторов» постоянно растет. Так, одним из индикаторов геоэкологического риска для морского потенциала приморских территорий [Гогоберидзе и др., 2010] является индикатор штормоопасности, который определяется по среднегодовым интегральным по площади значениям скорости ветра. Однако, как было показано в данной работе, значительное воздействие оказываются экстремальные штормовые ситуации. Причем влияние на береговую морфосистему данных экстремальных явления достаточно неоднородно по пространству.

Таким образом, принятие верных управленческих решений, а также экономическое планирование не будет полным без учета экстремальных факторов. В частности, фактор нового типа опасности – орографической опасности подводного берегового склона, который позволяет на основе минимального набора данных определить участки наиболее подверженные потенциальному разрушению в результате уноса взвешенного вещества на большие глубины в штормовых условиях в виде придонных взвесенесущих течений, тем самым приводит к его недостатку для питания пляжей, должен быть рассмотрен.

В данном разделе будет рассмотрено влияние орографической опасности на основные отрасли человеческой деятельности, а именно, рекреационные, рыбохозяйственные и строительные (берегозащитные) мероприятия на берегах Калининградского полуострова.

**Туризм.** Туризм и рекреационная деятельность в Калининградской области активно развивается в последние десятилетие. Принятая Правительством Калининградской области в 2013 году государственная программа Калининградской области «Туризм» [О Государственной..., 2013] направлена на создание условий для развития конкурентоспособной туристской индустрии, формирование туристического

продукта и позиционирование Калининградской области как туристического центра на внутреннем и мировом туристских рынках, а также развитие инфраструктуры туристских кластеров на территории Калининградской области. Данная программа планируется реализовываться до 2024 года, что показывает важность данного направления в экономике региона.

На побережье Калининградской области наиболее развит пляжный туризм и санаторно-курортное лечение в санаториях, расположенных в непосредственной близости от Балтийского моря. Практически все основные города прибрежной зоны в какой-то части являются курортными городами [Емельянова и Феоктистова, 2019]. В Калининградской области можно выделить четыре района, основной целью которых является длительное санаторно-курортное лечение и отдых: 1) Зеленоградский; 2) Светлогорский; 3) Пионерский и 4) Янтарный. Исследования показывают [Бандюкова и др., 2020], что практически 25% туристов предпочитают пляжный туризм. Проведенный опрос [Дробница и Семенова, 2019] показал, что гости региона и местные жители предпочитают рекреационный туризм познавательному. Таким образом, привлекательность туристской территории - важнейший фактор развития туристической отрасли региона.

Таким образом, на побережье Калининградской области можно выделить следующие районы туристической и санитарно-курортной отраслей региона:

- городской пляж г. Балтийск
- городской пляж п. Янтарный
- городской пляж п. Донское
- пляж Филинской бухты и Балтийский Артек
- городские пляжи и санатории в п. Отрадное и г. Светлогорск
- городской пляж и санатории в г. Пионерский
- городской пляж и санатории в г. Зеленоградск

Сопоставление на качественном уровне между выполненным районированием по фактору нового типа опасности – орографической опасности для геоэкологического состояния береговой морфосистемы и основными районами с развитым санаторно-курортным лечением и отдыхом показал (рисунок 3.22), что наибольшему влиянию орографической опасности подвержены районы в п. Янтарный (участок 2), п. Донское (участок 4), п. Отрадное и частично г. Светлогорск (участок 6). Городской пляж в г.

Зеленоградск подвержен среднему уровню орографической опасности (участок 14). Городские пляжи в г. Балтийск и г. Пионерский, а также пляж Филинской бухты слабо подвержены орографической опасности. Данный сравнительный анализ хорошо коррелирует с шириной пляжей и интенсивностью абразионных процессов в рассматриваемых районах. Так, для пляжей в г. Балтийск, г. Пионерский, Филинской бухте не наблюдается интенсивных абразионных процессов. В п. Донское и Отрадное, г. Светлогорск и Зеленоградск фиксируются абразионные процессы, вплоть до полного их исчезновения после сильных штормов. Влияние данного фактора на городской пляж в п. Янтарный трудно оценить, в связи с постоянным сбросом в море больших объемов вскрыши АО "Калининградским янтарным комбинатом". Благодаря значительным объемам поступающего в море песчаного материала в п. Янтарном наблюдаются широкий пляж без признаков абразии.

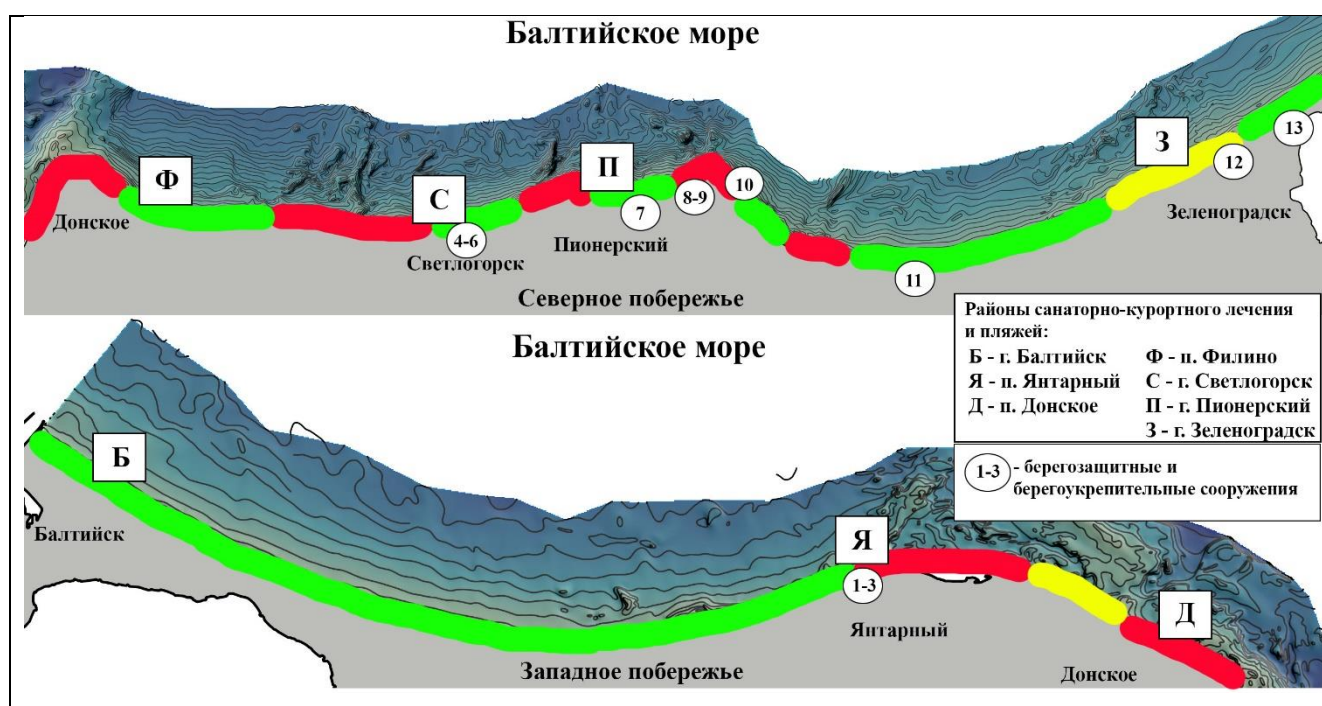


Рисунок 3.22 – Карта-схема взаимодействия на качественном уровне между выполненным районированием нового типа опасности – орографической опасности для береговой морфосистемы, основными районами с развитым санаторно-курортным лечением и отдыхом, берегозащитными и берегоукрепительными сооружениями. Зеленый цвет – первый тип (низкая опасность), желтый цвет – второй тип (средняя опасность), красный цвет – третий тип (высокая опасность). Цифрами обозначены порядковые номера участков. Буквами отмечены районы туристической и санитарно-

курортной отраслей региона: Б – городской пляж г. Балтийск; Я – городской пляж п. Янтарный; Д – - городской пляж п. Донское; Ф – пляж Филинской бухты и Балтийский Артек; С – городские пляжи и санатории в г. Светлогорск и п. Отрадное; П – городской пляж и санатории в г. Пионерский; З – городской пляж и санатории в г. Зеленоградск. Нумерация берегозащитных и берегоукрепительных сооружений описана в таблице 3.8.

**Рыбохозяйственная отрасль.** Рыбохозяйственная отрасль, которая является значимой частью в экономике Калининградской области также подвержена влиянию орографической опасности. Промышленный и спортивный вылов рыбы все чаще сталкивается с рядом проблем, такими как, ограниченные нерестовые акватории, неблагоприятные солевые или температурные режимы, колебания уровня воды, а также общее антропогенное воздействие. На фоне прогнозируемых увеличений объемов потребления рыбы в будущем, данные проблемы становятся особенно актуальными. Данные проблемы приводят, например, к разработке методов искусственного воспроизводства водных биологических ресурсов [Хайновский и Ульянов, 2015], а также к строгим ограничениям на вылов в прибрежной полосе шириной 2,5 морских миль [МИНИСТЕРСТВО..., 2014]. В данной прибрежной полосе располагаются основные места нереста некоторых видов рыб. К одному из таких важных объектов промысла в Балтийском море относится камбала-тюрбо, запасы которой находятся сейчас в депрессивном состоянии [Ульянов и Хайновский, 2012; Хайновский и Ульянов, 2015]. Одной из причин, которая ограничивает увеличение запасов камбалы-тюрбо является влияние на икру и личинки гидродинамических процессов на зоне мелководья. В случае сильных штормовых ситуаций, из-за отсутствия укрытий, икра и личинки подвержены сильному механическому воздействию в следствии ветро-волнового воздействия и перемещения большого объема наносов в придонном слое.

Таким образом, фактор нового типа опасности – орографической опасности, непосредственно влияет на потенциальные запасы камбалы-тюрбо, через пагубное механическое влияние на икру и личинки в результате уноса взвешенного вещества на большие глубины в штормовых условиях в виде придонных взвесенесущих течений. В районах с высокой (участки 2, 4, 6, 8, 10, 12) и средней (участки 3, 14) уровнями орографической опасности не рекомендуется проводить мероприятия по искусственному воспроизводству морских биологических ресурсов.



**Производство.** Промышленными центрами в прибрежной зоне можно считать два города – г. Пионерский и п. Янтарный. В г. Пионерский расположен Пионерский морской порт, который непосредственно располагается на берегу Балтийского моря. Данный объект непосредственно располагается на участке №10, для которого характерен высокая степень опасности орографической опасности. В прибрежной зоне п. Янтарный расположен АО "Калининградский янтарный комбинат". Данный промышленный объект расположен на участке №2 с характерной высокой степенью опасности рассматриваемого фактора. Однако, как уже отмечалось выше, Степень абразии берега в данном районе оценить проблематично в связи с постоянным сбросом в море больших объемов вскрыши.

Таким образом, основные промышленные центры на побережье Калининградского полуострова находятся в районах, для которых характерна высокая степень влияния орографической опасности.

**Берегозащитные мероприятия.** В следствии преобладания в регионе ветров северо-западных румбов, а также участвовавших в последние годы штормовых ситуаций [Стонт и др., 2010], берега Калининградской области подвергаются интенсивной абразии. Скорость абразии берега может достигать значений более 1 метра в год [ссылка на Бабакова, Бобыкину, Бурнашев]. В связи с этим, на побережье Калининградского полуострова активно ведутся берегоукрепительные мероприятия: строительство габионов, волн-отбойных стенок, бун, укрепление склонов с помощью геосинтетических материалов, а также размещение в районах интенсивной абразии геотекстильных мешков (geotextile bags, geocontainers), наполненных песком. Большинство берегозащитных сооружений находятся в оперативном управлении ГБУ КО «Балтберегозащита». Всего имеется 13 берегозащитных и берегоукрепительных сооружений (таблица 3.8).

Ветро-волновое, в частности экстремально-штормовое, воздействие приводит к частичному разрушению инженерных конструкций и обнажению геосинтетических материалов, которые с течением времени стареют и становятся источником загрязнения прибрежной зоны моря.

Таким образом, при планировании берегоукрепительных мероприятий рекомендуется оценивать потенциальное негативное влияние орографической опасности для береговой морфосистемы, которое может проявляться более быстрой деградации данных сооружений. Данный факт приводит к деградации и разрушению берегозащитных

сооружений, которые, в свою очередь, становятся источниками загрязнения прибрежной зоны (пляжей, подводного берегового склона) остатками геосинтетических материалов и пластиком различной размерности.

Таблица 3.8. – Перечень берегозащитных и берегоукрепительных сооружений, расположенных на морском побережье Калининградской области.

№ п.п.	Наименование берегозащитного или берегоукрепительного сооружения	Ведомственная принадлежность
1	Подпорная стенка в районе очистных сооружений п. Янтарный	ГБУ КО «Балтберегозащита»
2	Берегозащитное сооружение в районе насосной станции п. Янтарный	АО «Калининградский янтарный комбинат»
3	Укрепление авандюны у променада в пос. Янтарный	(Администрация поселка Янтарный)
4	Габионы в районе набережной г. Светлогорска	ГБУ КО «Балтберегозащита»
5	Строительство променада в г. Светлогорске	ГБУ КО «Балтберегозащита»
6	Противооползневые мероприятия в г. Светлогорске	ГБУ КО «Балтберегозащита»
7	Участок соединения городского променада с променадом Государственной резиденции в г. Пионерский	ГБУ КО «Балтберегозащита»
8	Променад Государственной резиденции в г. Пионерский	ГК «Янтарь»
9	Лестничный спуск в п. Заостровье с габионами	ГБУ КО «Балтберегозащита»
10	Габионы в районе выхода коллекторов ОКЭС в п. Заостровье	В перспективе ГБУ КО «Балтберегозащита»

11	Два берегозащитных сооружения (западное и восточное) в районе газового терминала в п. Куликово	ПАО «Газпром»
12	Берегозащитные мероприятия в районе кафе «АмБар» и «Дача»	владельцы кафе «АмБар» и «Дача»
13	Комплекс берегозащитных сооружений на прикорневом участке Куршской косы (ГБУ КО «Балтберегозащита»)	ГБУ КО «Балтберегозащита»

Таким образом, качественный анализ влияния орографической опасности на геоэкологическое состояние береговой морфосистемы в условиях шторма, которое оказывает непосредственно влияние на хозяйственную и другие виды деятельности человека на берегах Калининградского полуострова, показал (таблица 3.9), что практически половина из всех рассмотренных единиц деятельности находятся в опасной зоне влияния фактора орографической опасности.

Таблица 3.9. – Интегральная таблица по степени влияния орографической опасности на основные отрасли человеческой деятельности в исследуемом районе.

Участки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Туризм	Б	Я		Д	Ф	С			П					З	
Рыбохозяйственная отрасль															
Производство		К						П							
Берегозащитные мероприятия		*				*	*	*	*			*	*	*	*

Туризм - пляжный туризм и санаторно-курортное лечение: Б – городской пляж г. Балтийск; Я – городской пляж п. Янтарный; Д – - городской пляж п. Донское; Ф – пляж Филинской бухты и Балтийский Артек; С – городские пляжи и санатории в г. Светлогорск и п. Отрадное; П – городской пляж и санатории в г. Пионерский; З – городской пляж и санатории в г. Зеленоградск. Рыбохозяйственная отрасль - промышленный и спортивный вылов рыбы, искусственное воспроизводство. Промышленность - АО "Калининградский янтарный комбинат" (К), Пионерский морской порт (П).

### 3.4. Роль гидродинамической неустойчивости Рэля-Тейлора в существовании береговой морфосистемы

В классической гидродинамике хорошо известны два вида неустойчивости - Кельвина-Гельмгольца и Рэля-Тейлора. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца возникает, как правило, в результате касательного взаимодействия на границе между двумя слоями воды двигающихся с различными скоростями [Тернер, 1977; Альбом течений..., 1986]. Неустойчивость Рэля-Тейлора возникает в условиях, когда более тяжелая жидкость находится над менее тяжелой [Taylor, 1950], и обычно возникает при сезонном выхолаживании воды с поверхности, а также в качестве одного из этапов при возникновении двойной диффузии в океане.

Из многочисленных натурных исследований известно, что в прибрежной зоне моря в штормовых условиях в зоне обрушения ветровых волн формируются большие объемы насыщенных взвешенным материалом, и, соответственно, вод с добавочной плотностью. Сочетание более плотных морских вод, в контексте возможного вдольсклонового движения, вместе с наличием менее плотных вод, расположенных мористее, создает благоприятные условия для возникновения неустойчивости Рэля-Тейлора с учетом замены ускорения силы тяжести  $g$  на ее вдольсклоновую компоненту  $g \cdot \sin(\alpha)$ . В условиях относительно гладкого дна в зоне ветро-волнового воздействия неустойчивость Рэля-Тейлора, как это следует из классических исследований (Биргхов и др), будет приводить к спорадическому формированию отдельных плюмов, насыщенных наносами, проникающих в процессе своего распространения вдоль склона дна в менее плотные воды (картинка с язычками), и быстро прекращающими свое существование из-за множества возникающих плюмов. Очевидно, что при этом будет происходить перенос взвешенного в воде вещества, но - на небольшие расстояния.

В условиях же наличия на дне различного рода орографических особенностей (гряда, канавка, каньон и т.д.), имеющих кросс-склоновую ориентацию, вместо возникновения неустойчивости Рэля-Тейлора, будет возникать организованное движение воды в виде кросс-склонового устойчивого в условиях шторма течения, фокусирующего в окрестности перечисленного типа орографических особенностей. Возникающее таким образом среднее течение может провоцировать интенсивный вынос насыщенных наносами вод на большие глубины. Более того, данное течение, как было

показано еще в 1955 г Г.И. Баренблаттом [Баренблатт, 1955], после его «подныривания» под слой ветро-волнового воздействия может ускориться и «захватить» по дороге донные осадки на пути следования.

Приведенные качественные физико-географические соображения, позволяют заключить, что эффект неустойчивости Рэля-Тейлора для акваторий без явно выраженных орографических особенностей приводит к относительно равномерному распределению наносов по склону дна. В этом случае взвешенный в воде материал будет распространяться в виде случайного ансамбля плюмов, быстро теряющих свою энергию и носимый материал. Наносы на малых глубинах в дальнейшем могут стать источником для питания пляжей, что является благоприятным фактором для устойчивости существования всей береговой морфосистемы. Наличие же орографических особенностей с кросс-склоновой ориентацией подавляет гидродинамическую неустойчивость и порождает устойчивое среднее течение с кросс-клоновой ориентацией и, автоматически, выносу взвешенного в воде материала из зоны ветро-волнового воздействия. Очевидно, что данный процесс будет приводить к дефициту материала для питания пляжей и, соответственно, оказывать негативное воздействие на устойчивость существования береговой морфосистемы.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате выполненного диссертационного исследования были получены следующие основные результаты:

1. Комплексный анализ изменчивости параметров береговой морфосистемы Калининградского полуострова подтвердил факт существования орографической опасности для устойчивости ее геоэкологического состояния. Эта опасность проявляется в более интенсивной абразии берега в штормовых условиях в следствии уноса песчаного материала в виде придонных взвесенесущих течений, сфокусированных орографическими особенностями подводного берегового склона, имеющих кросс-склоновую ориентацию.
2. Предложенный в работе подход классификации берега Калининградского полуострова по степени значимости фактора орографической опасности для геоэкологического состояния береговой морфосистемы, основанный на классических методах

геоморфологии, позволяет на основе набора данных о рельефе подводного берегового склона определить участки берега потенциально наиболее подверженные разрушению в штормовых условиях в результате уноса взвешенного вещества на большие глубины в виде придонных взвесенесущих течений, тем самым приводя к его недостатку для питания пляжей.

3. Анализ орографических особенностей подводного берегового склона Калининградского полуострова позволил выделить 3 типа участков по степени влияния орографической опасности на геоэкологическое состояние береговой морфосистемы. Первый тип (слабоопасные) соответствует участкам подводного берегового склона, для которых не обнаружено чередование положительных и отрицательных форм рельефа. Для данных районов характерен гладкий рельеф подводного берегового склона. Второй тип (умеренноопасные) характеризуется наличием морфологических неоднородностей на дне, однако в данном районе не наблюдаются явно выраженные морфологические особенности с поперечной к берегу ориентацией, но неоднородности на дне все же формируют несколько потенциальных траекторий для уноса взвешенных наносов. Для третьего типа (высокоопасные) отмечается хорошая корреляция между выделенными формами рельефа и рассчитанными траекториями.

4. Разработан подход к оценке повторяемости орографической опасности для геоэкологического состояния береговой морфосистемы, основанный на численном моделировании гидродинамического режима в исследуемом районе и статистическом анализе данных, описывающих ветровой режим. Данная вероятностная оценка повторяемости рассмотренной опасности позволяет планировать комплексное управление прибрежной зоной Калининградского полуострова и разрабатывать стратегии развития приморских территорий.

5. Выполнена вероятностная оценка повторяемости орографической опасности для геоэкологического состояния береговой морфосистемы Калининградского полуострова за десятилетний период. Для береговой морфосистемы западного побережья повторяемость составила для сильных (от 10 до 15 м/с) и штормовых ветров (более 15 м/с) 9.6% и 2.6% соответственно. Для береговой морфосистемы северного побережья Калининградского полуострова повторяемость составила 8.7% и 2.4% соответственно.

6. Оценка возможного влияния орографической опасности на потенциал развития приморских территорий показал, что практически все отрасли человеческой деятельности находятся в зонах, попадающие в районы, для которых характерна высокая степень влияния орографической опасности: рекреационные зоны, районы санитарно-курортного лечения, производственные районы и участки берега, на которых ведется интенсивная застройка. Имеется потенциальное влияние на запасы камбалы-тюрбо, через пагубное механическое влияние на икру и личинки в результате уноса взвешенного вещества на большие глубины в штормовых условиях в виде придонных взвесенесущих течений. Берегозащитные сооружения также находятся под негативным влиянием данной опасности, что приводит к более быстрой их деградации и разрушению. Данный факт приводит к загрязнению прибрежной зоны Калининградского полуострова остатками геосинтетических материалов и пластиком различной размерности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айбулатов Н.А. Концептуальные основы геоэкологии прибрежной зоны морей и океанов // Прибрежная зона моря: морфолитодинамика и геоэкология. Калининград: Изд. КГУ, 2004. С. 196-199.
2. Айбулатов Н.А. Береговая зона как верхняя часть шельфа // Морские берега. М.: Мысль, 1982 (Вопр. Географии; № 119)
3. Айбулатов Н.А. Динамика твердого вещества в шельфовой зоне. Л.: Гидрометеиздат. 1990. 271 с.
4. Альбом течений жидкости и газа. Составление и авторский текст М. Ван-Дайка. М.: МИР. 1986. 181 с.
5. Ананьев Г.С. Динамическая геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1976. 173 с.
6. Анцыферов С.М. О распространении концентраций и размеров твердых частиц в открытом потоке. Текст. / С.М. Анцыферов, В.К Дебольский // Динамика и термика рек. М.: Стройиздат. 1973.
7. Анцыферов С.М., Басиньски Т., Косьян Р.Д., Пыхов Н.В., Пустельников О.С. Распределение взвешенных наносов над профилем берегового склона в районе Любятово. Результаты международного эксперимента ЛЮБЯТОВО – 76. Труды Института водного строительства Польской Академии Наук. Гданьск, 1978. № 5. с. 211-227.

8. Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря / Гл. ред. О.В. Петров.- СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. 78 с.
9. Бабаков А.Н. Вдольбереговой транспорт наносов в пределах восточного побережья Гданьского залива и «абразионный» критерий оценки итогового переноса наносов: обзор // [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <http://atlantic.ocean.ru/images/publ/babakov.pdf>
10. Бабаков А.Н. Пространственно-временная структура течений и миграций наносов в береговой зоне юго-восточной Балтики (Самбийский п-ов и Куршская коса). Дисс. канд. геогр. наук. – Калининград: КГУ, 2003. – 273 с.
11. Бабаков А.Н., Чубаренко Б.В. Структура результирующего вдольберегового транспорта наносов в восточной части Гданьского залива // ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, 2019, том 46, N 4, с. 370–384
12. Бадюкова Е.Н., Соловьева Г.Д. Прибрежные эоловые формы и колебания уровня моря // Океанология. 2015. Т. 55. No. 1. С. 139–146.
13. Балаян Б.М., Бабаков А.Н. Вдольбереговые течения в прибрежной зоне Калининградского побережья Балтики // Изв. Всес. геогр. об-ва. 1989. Т. 121, вып. 4. С. 329-334.
14. Бандюкова А.П., Казаков М.Е., Булганина С.В., Лебедева Т.Е. Стратегии развития туризма в Калининградской области // Московский экономический журнал. №3. 2020. с. 384-390.
15. Баренблатт Г.И. О движении взвешенных частиц в турбулентном потоке // Прикладная математика и механика. 1953. Т.17. №3. С.261-274.
16. Баренблатт Г.И. О движении взвешенных частиц в турбулентном потоке, занимающем полупространство или плоский открытый канал конечной глубины // Прикладная математика и механика. 1955. Т.19. №1. С.61-88.
17. Баренблатт Г.И., Голицин Г.С. Локальная структура развитых пыльных бурь. Препринт. Ин-т механики МГУ. М.: МГУ. 1973. 44с.
18. Басинский Т., Онищенко Э., Пыхов Н., Октаба Л. Радиоизотопный прибор для измерений профиля концентрации взвешенных наносов на шельфе. Береговые процессы бесприливного моря. Любятово-76. Гданьск. 1978. С. 257-277.



19. Береговые процессы бесприливного моря. Результаты международного эксперимента ЛЮБЯТОВО – 76. Труды Института водного строительства Польской Академии Наук. Гданьск, 1978. № 5.
20. Блажчишин А.И., Бабаков А.Н., Чечко В.А. Концентрация и состав взвешенных наносов Калининградского взморья. Проблемы изучения и охраны Куршской косы. Калининград: АО ИО РАН, 1998. С. 31-58.
21. Бобыкина В.П., 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.
22. Бобыкина В.П., 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.
23. Бойнагрян В.Р. Морфометрический анализ кратковременных изменений рельефа береговой зоны // Океанология. 1966. Т. VI, вып. 4. С. 651-658.
24. Болдырев В.Л., Бобыкина В.П., Бурнашев Е.М. Состояние берегов Куршской косы после зимнего штормового периода // Проблемы изучения и охраны природного и культурного наследия национального парка «Куршская коса»: сб. научных статей. Вып. 6 / сост. И.П. Жуковская. Калининград, 2008. С. 105-114.
25. Болдырев В.Л., Рябкова О.И. Динамика береговых процессов на Калининградском побережье Балтийского моря // Изв. ВГО. Т.133, вып. 5. 2001. С. 41 - 49.
26. Бровка П.Ф. Развитие прибрежных лагун. Владивосток, 1990.
27. Бронгулеев В.Вад. Трехмерная кинематическая модель эволюции склонов // Геоморфология. 2011. №1. С. 3-12
28. Бурнашов Е.М. Современная динамика и геоэкологическое состояние морского берега Калининградской области // диссертация ... кандидата географических наук : 25.00.36 / Бурнашов Евгений Михайлович; Барнаул, 2011. - 205 с. : ил.
29. Владимиров В. С. Уравнения математической физики М., 1967 (4-е изд. 1981, 5-е изд. 1988, 6-е изд. 2000; переведена на 9 языков)
30. Войтов В.И., Соловьев А.В., Ястребов В.С. Гидрофизические исследования придонного слоя океана (обзор) // Океанология. 1989. Т. 29. №6. С. 885-898.

31. Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994, 280 с.
32. Гидрометеорология и гидрохимия морей (Проект «Моря СССР») Т. 3: Балтийское море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия / ГОИН и др. С-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. 451 с.
33. Гижеевски Е., Мельчарски А., Николов Х., Роневич П., Рудовски С., Семрау И. Строение и кратковременная изменчивость подводного берегового склона. Результаты международного эксперимента ЛЮБЯТОВО – 76. Труды Института водного строительства Польской Академии Наук. Гданьск, 1978. № 5. с. 337-349.
34. Гогоберидзе Г.Г. Понятие и сущность морехозяйственного потенциала прибрежных зон и приморских территорий // Проблемы современной экономики. 2008а. № 2. с. 266-270.
35. Гогоберидзе Г.Г. Структура и свойства морехозяйственного потенциала приморских территорий // Вестник Рос. гос. ун-та им. И. Канта. Сер. Эконом. и юридич. Науки. 2008б. № 3. с. 75-81.
36. Гогоберидзе Г.Г., Дикинис А.В., Шилов Д.В. Оценка морского потенциала Краснодарского края и влияние геоэкологических рисков на его экономическое развитие // Стратегия развития региона, 40 (175), 2010, с. 8-13.
37. Гонзалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера. 2005. 1072 С.
38. Гриценко В.А., Юрова А.А. О распространении придонного гравитационного течения по крутому склону дна // Океанология. 1997. Т. 37. № 1. С. 44–49.
39. Гриценко В.А., Юрова А.А. Об основных фазах отрыва придонного гравитационного течения от склона дна // Океанология. 1999 Т. 39. № 2. С. 187–191.
40. Гришанин К.В. Динамика русловых процессов. Л.: Гидрометеиздат. 1969. 428 с.
41. Дмитриев В.В. Эколого-географическая оценка состояния внутренних водоемов: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. СПб., 2000.
42. Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. СПб., 2004.
43. Долотов Ю.С. Проблемы рационального использования и охраны прибрежных областей океана. М., 1996
44. Домнин Д.А. Геоэкологическая оценка и районирование водосборных бассейнов Калининградской области // дис. ... канд. геогр. наук. 25.00.36. – Калининград, 2017, 142 с.

45. Дробница А. А., Семенова Л. В. АНАЛИЗ ТУРИСТСКОЙ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ // ТУРИСТСКО-РЕКРЕАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ И ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТУРИЗМА И СЕРВИСА. Материалы Международной научно-практической конференции студентов и аспирантов. Под редакцией В.С. Корнеевца, Л.В. Семеновой. 2019. с. 33-41.
46. Емельянов Е.М. Барьерные зоны в океане. Калининград: Изд-во «Янтарный сказ». 1998. 411 с.
47. Емельянов Е.М. Геохимические барьеры и барьерные зоны и их роль в седиментогенезе // Геохимия осадочного процесса в Балтийском море. М.: Наука. 1986. С. 5-24.
48. Емельянова Л.Л., Феоктистова К.С. Приморская ландшафтно-рекреационная зона Калининграда: современный потенциал и перспективы пространственного развития // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2019. № 4. С. 42—56.
49. Жаромский Р.Б. Движение наносов в прибрежной зоне юго-восточной Балтики // Водные ресурсы. 2000. Т.27, № 1. С. 53-62.
50. Жиндарев Л.А. Морфолитодинамика расчлененных отмелых побережий бесприливных морей. Автореф. дис. ... д-ра геог. наук: 11.00.04. М., 1997.
51. Жиндарев Л.А., Луговой Н.Н. Прогнозная оценка эволюции песчаных побережий внутренних морей в условиях повышения их уровня // Геоморфология, 2016, №4, с. 27-34.
52. Жиндарев Л.А., Хабидов А.Ш., Тризно А.К. Динамика песчаных берегов морей и внутренних водоемов / под ред. П.А.Каплина. Новосибирск: Наука, 1998.
53. Жмур В.В., Назаренко Д.В. Динамика тонкого слоя жидкости повышенной плотности у наклонного дна // Океанология. 1994. Т. 34. №2. С. 193-200.
54. Жмур В.В., Сапов Д.А., Нечаев И.Д., Рыжаков М.В., Григорьева Ю.В. Интенсивные гравитационные течения в придонном слое океана // Известия академии наук. Серия физическая. 2002. Т. 66. № 12. С. 1721-1726.
55. Журбас В.М., Пака В.Т. Инрузионное расслоение халоклина в Готландском бассейне, обусловленное большим затоком североморских вод в Балтику в январе 1993 года // Океанология. 1997. Т.33. №4. С. 549-557.
56. Завьялов И.Н., Жмур В.В. Интенсивные взвесенесущие потоки в придонном слое океана на наклонном дне // ТРУДЫ МФТИ. — 2010. — Том 2, № 3, 158-167

57. Зенкович В.П. Некоторые черты динамики польского берега Балтийского моря // Изв. Всес. геогр. об-ва, Т.90, Вып.3. М. 1958. С. 23-31.
58. Зуев О. А., Килесо А. В., Голенко М. Н., Демидов А. Н. Режим течений в прибрежной зоне Балтийского моря в районе Самбийского полуострова // Морские исследования и образование (MARESEDU-2017) : Труды VI Международной научно-практической конференции, Москва, 30 октября – 02 2017 года. – Москва: ООО "ПолиПРЕСС", 2017. – С. 135-137.
59. Игнатов Е. И. Береговые морфосистемы. Смоленск: Маджента, 2004
60. Игнатов Е.И. Береговая морфосистема как объект геоморфологических исследований // Геоморфология. 2005;(2) с. 3-11.
61. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. — 2-е издание. — М.: Гидрометеиздат, 1984. — С. 560.
62. Израэль Ю.А., Цыбань А.В. Антропогенная экология океана. Л.: Гидрометеиздат. 1988. 528 с
63. Информационный бюллетень о состоянии геологической среды прибрежно-шельфовых зон Баренцева, Белого и Балтийского морей в 2013 г. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. – 136 с
64. Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. Высшая Школа, Москва, 1991 г., 366 стр.
65. Исаченко А.Г., Книзе А.А., Романюк Б.Д. Ландшафтоведение и актуальные проблемы лесопользования // ИЗВЕСТИЯ РУССКОГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА. 1999;131(5): с. 17-23.
66. Карлин Л.Н., Абрамов В.М. Управление энвиронментальными и экологическими рисками. - СПб.: РГГМУ, 2006 - 332 с.
67. Килесо А.В., Гриценко В.А. Геоэкологическая опасность прибрежной зоны Юго-Восточной Балтики // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития : труды III Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 16–17 декабря 2019 года. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2019. – С. 440-442.
68. Килесо А.В., Гриценко В.А. Особенности структуры и динамики прибрежных вдольсклоновых взвесенесущих потоков штормовой природы // Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере МСП-2018: Сборник трудов Международного симпозиума, Москва, 30 октября – 02 2018 года / Институт океанологии

- им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Московский университет им. С.Ю. Витте. – Москва: Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, 2018. – С. 180-182.
69. Килесо А.В., Демидов А.Н., 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.
70. Кнапс Р.Д. О расчете мощности вдольбереговых потоков наносов в море // Океанология. 1968. Т. VIII, вып. Б. С. 848-857.
71. Корзинин Д.В. Динамика рельефа береговой зоны северного побережья Самбийского полуострова (юго-восточная Балтика) // Дисс. канд. геогр. наук. – Москва: МГУ, 2012. – 140 с.
72. Лащенко В.М., Кожухметов А.Б., Рябкова О.И. Деформация подводного берегового склона одной из бухт юго-восточного побережья Балтийского моря // Вопросы динамики берегов и палеогеографии Балтийского моря. 1990. Т.1, ч.1. Вильнюс. С. 52-66.
73. Леонтьев И. О. О расчете вдольберегового транспорта наносов // Океанология. – 2014. – Т. 54. – № 2. – С. 226.
74. Леонтьев И.О. Бюджет наносов и прогноз развития берега // Океанология. 2008. Т.48. № 3. С.467– 476
75. Леонтьев И.О. Оценка поперечного потока наносов на границе прибрежной зоны // Океанология, 2008. Т. 48., № 1. С. 132-138.
76. Леонтьев И.О. Прогнозирование развития берега в масштабе столетия (на примере Вислинской (Балтийской) косы) // Океанология. 2012. Т. 52. № 5. С. 757-767
77. Леонтьев И.О., Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю., Сухачева Л.Л. О генезисе некоторых форм рельефа дна и берегов восточной части Финского залива // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 688-698
78. Лонгинов В.В. Динамика береговой зоны бесприливных морей. М.:Изд-во АН СССР, 1963.
79. Лонгинов В.В. Очерки литодинамики океана. М.: Наука. 1973. 244 с.
80. Лымарев В.И. О развитии экологической географии прибрежной зоны океана // Прибрежная зона моря: морфолитодинамика и геоэкология. Калининград: Изд. КГУ, 2004. С.194-196.

81. МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПРИКАЗ от 6 ноября 2014 года N 427 Об утверждении правил рыболовства для Западного рыбохозяйственного Бассейна (с изменениями на 3 апреля 2019 года)
82. Михайлова Н.А. Перенос твердых частиц турбулентными потоками воды. Л.: гидрометеоиздат. 1971. 259 с.
83. Морские гидрометеорологические явления. Электронный ресурс: URL:<http://meteo39.ru/kriterii-oya.html>. Дата обращения 03 марта 2021.
84. Музалевский, А. А. Индикаторы и индексы устойчивого развития береговой зоны [Текст] / А. А. Музалевский // Современные концепции берегопользования. Том 1. – СПб.: Изд. РГГМУ. – 2009. – С. 170–213
85. Муселяк С.С. Морфолитодинамика береговой зоны бесприливного моря (на примере берегов ПНР): Автореф. д-ра геогр наук. М.: Геогр. факт МГУ. 1988. 38 с
86. О Государственной программе Калининградской области "Туризм" (с изменениями на 17 марта 2020 года) ПРАВИТЕЛЬСТВО КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ ПОСТАНОВЛЕНИЕ от 24 декабря 2013 года N 993 О Государственной программе Калининградской области "Туризм" (<http://docs.cntd.ru/document/460291636>)
87. О некоторых вопросах деятельности Министерства регионального развития Российской Федерации: постановление Правительства Российской Федерации от 29.05.2008 № 405.
88. Об утверждении Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 17.11.2008 № 1662-р.
89. 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.
90. Патин С.А. Влияние загрязнения на биологические ресурсы и продуктивность Мирового океана. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 304 с
91. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: 1999.
92. Поздняков А.В., Ройхваргер З.Б. Математическая модель развития склона при вязко-пластическом смещении обломочного материала // Геоморфология. 1980. №4. С. 54-60
93. Польшов Б.Б. Кора выветривания. М., 1944. 243 с.

94. Прибрежная зона моря: морфолитодинамика и геоэкология : XXI Междунар. береговая конф., Калининград / Светлогорск, Россия, 7-10 сент. 2004 г. : материалы конф. / отв. ред. В. В. Орленок. – Калининград : Изд-во Калинингр. гос. ун-та, 2004. – ISBN 5888745154.
95. Проблемы экономической безопасности регионов Западного побережья России: монография / под ред. проф. Г.М. Федорова. — Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2019. — 267 с. ISBN 978-5-9971-0532-7
96. Пустельников О.С. Литологическая характеристика взвешенных наносов при различных гидродинамических условиях. Результаты международного эксперимента ЛЮБЯТОВО – 76. Труды Института водного строительства Польской Академии Наук. Гданьск, 1978. № 5. с. 229-241.
97. Пыркин Ю.Г. Природные плотностные течения // Сб. Взаимодействие в системе литосфера-гидросфера-атмосфера. М.: Недра. 1996. С. 145-150.
98. 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.
99. 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 // Камчия 77. София.: БАН. 1980. С. 238-251.
100. Реймерс Н, Ф. Природопользование. М., 1990.
101. Реймерс Н.Ф., Яблоков А.В. Словарь терминов и понятий, связанных с охраной живой природы. — М.: «Наука», 1982. — 145 с.
102. Рекомендации заседания «круглого стола» по теме: «О состоянии морского побережья Калининградской области и мерах по обеспечению берегозащиты», г. Калининград, 14 марта 2012 г. / Калининградская областная Дума. – Калининград, 2012. - 7 с.
103. Рябчук Д.В., Колесов М.В., Сергеев А.Ю., Спиридонов М.А., Жамойда В.А., Чубаренко Б.В. Абразионные процессы в береговой зоне восточной части Финского залива и их связь с многолетними трендами режимобразующих факторов // Геоморфология. 2012;(4):99-105
104. Самолюбов Б.И., Слуев М.В. О структуре придонного стратифицированного течения // Метеорология и гидрология. 1996. №1. С. 91-100.
105. Сафьянов Г. А. Береговая зона океана в XX веке. М.: Мысль, 1978

106. Сафьянов Г.А. Геоэкология береговой зоны океана. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2002.
107. Сафьянов Г.А. Подводные каньоны и мутьевые потоки // Сб. Комплексные иссл. Природы океана. М.: МГУ. 1970. Вып. 1. С. 107-133
108. 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.
109. Симонов Ю.Г. Региональный геоморфологический анализ. Издательство Московского университета, Москва, 1972 г., 255 стр.
110. Синецкий В.П. Поиск закономерностей // Теория и практика морской деятельности. Вып. 12. М.: СОПС, 2007. 304 с.
111. Соколов А. Н., Чубаренко Б. В., Карманов К. В. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ БАЛТИЙСКОЙ/ВИСЛИНСКОЙ КОСЫ И САМБИЙСКОГО ПОЛУОСТРОВА: ШТОРМ ЯНВАРЯ 2012 ГОДА // Научный журнал «Известия КГТУ», №43, 2016 г. 67-77
112. Сочава В.Б. Определение некоторых понятий и терминов физической географии // Докл. Ин-та географии Сибири и Дальнего Востока. 1963. Вып. 3. С. 50–59.
113. Стонт Ж.И., Ульянова М.О., Крек Е.В., Чуринов Д.А., Губарева Д.Е. Штормовая активность в осенне-зимний период 2018-2019 гг. в юго-восточной части Балтийского моря // Известия КГТУ. 2019. № 53. С. 61–72.
114. 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.
115. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкостях. М.: МИР. 1977. 431 с.
116. Трофимов А.М. Основы аналитической теории развития склонов. Казань: Изд-во КазГУ, 1974. 212 с.
117. Ульянов А. Г., Хайновский К.Б. 2012. Восстановление запаса камбалы-тюрьба на Балтике с помощью технологий марикультуры // Рыба и морепродукты. № 2 (58). С. 60–63.
118. Хабидов А.Ш., Кусковский В.С., Жиндарев Л.А. [и др.] Берега морей и внутренних водоемов. Актуальные проблемы геологии, геоморфологии и динамики; Ответственный редактор О.В. Кашменская. – Новосибирск : Издательство Сибирского отделения РАН, 1999. – 272 с. – ISBN 5769202416.



119. Хайновский К.Б., Ульянов А.Г. Искусственное воспроизводство водных биологических ресурсов в Калининградской области: опыт, проблемы, перспективы // Труды ВНИРО. Аквакультура. Т. 153. 2015. с. 57-73.
120. Шадрин И. Ф. Течения береговой зоны бесприливного моря / И. Ф. Шадрин. – Москва: Наука, 1972 – 125 с.
121. Шадрин И.Ф. Некоторые вопросы динамики вод в области шельфа // Сб. Литодинамика, литология и геоморфология шельфа. М.: Наука. 1976. С. 52-74.
122. Шепард Ф.П. Морская геология. Л.: Недра. 1976. 488 с.
123. Шуйский Ю.Д. Абразия подводного склона в восточной части Балтийского моря // Baltica. 1982. Вып. 7. Vilnius. С. 223-234.
124. Bagnold R.A. Auto-suspension of transported sediments // Proc Royal Soc series A, 1962. 265, p. 315-319
125. Baltic Sea Bathymetry Database [Электронный ресурс] // Baltic Sea Hydrographic Commission [Официальный сайт]. URL: <http://data.bshc.pro>
126. Barrie J.V., Conway K.W. Coastal to offshore submarine channel sediment transport system: Savary Island, British Columbia, Canada // *Geo-Mar Lett* **39**, 435–446 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00367-019-00602-1>
127. Benjamin T.B. Gravity currents and related phenomena // *J. Fluid Mech.*, Vol. 31, 1968. pp. 209-248.
128. Boyd R., Ruming K., Goodwin I., Sandstrom M., Schroder-Adams C. Highstand transport of coastal sand to the deep ocean: a case study from Fraser Island, southeast Australia // *Geol Soc Am.*, 2008, 36, 15– 18
129. Burrough P. A., McDonnell R. A. Principles of Geographical Information Systems (Oxford University Press, New York). 1998. 190 P.
130. Carter L., Burnett D., Drew S., Hagadorn L., Marle G., Bartlett-Mcneil D., and Irvine N., Submarine Cables and the Oceans: connecting the world: United Nations Environment Programme, World Conservation Monitoring Centre, Biodiversity Series 2009, 31, 64 p
131. Dorokhov D., Dudkov I., Sivkov V. Single beam echo-sounding dataset and digital elevation model of the southeastern part of the Baltic Sea (Russian sector) // *Data in Brief*, Volume 25, 2019, 104123
132. EMODnet Bathymetry Consortium (2020): EMODnet Digital Bathymetry (DTM). <https://doi.org/10.12770/bb6a87dd-e579-4036-abe1-e649cea9881a>

133. FOREL F-A. Les ravins sous-lacustres des fleuves glaciaires // Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris: 1885. 1-3
134. Gamberi F. Systems supplying sediment to canyon heads (SSSCHs) in the Tyrrhenian Sea: The past and the present as a key to understanding deep-sea stratigraphy // Marine and Petroleum Geology, Volume 119, 2020, 104470
135. Garfield N., Rago T. A., Schnebele K. J. and Collins C. A. Evidence of a turbidity current in Monterey submarine canyon associated with the 1989 Loma Prieta earthquake // Cont. Shelf Res., 1994, 14, 673–686.
136. Georg Umgiesser, Donata Melaku Canu, Andrea Cucco, Cosimo Solidoro. A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation // Journal of Marine Systems, Volume 51, Issues 1–4, 2004, Pages 123-145, ISSN 0924-7963, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2004.05.009>.
137. Greene H.G., Maher N.M., Paull C.K. Physiography of the Monterey Bay National Marine Sanctuary and implications about continental margin development // Mar Geol., 2002, 181, 55–82
138. Gritsenko V., Sviridov N. Role of Storms in Formation of Turbulent Sea Currents in the Near-Shore Zone // J. Baltica Special Publication. Vilnius. 1999. Vol. 12. P. 28-31.
139. Heezen Bruce C., Hollister Charles. Deep-sea current evidence from abyssal sediments // Marine Geology, Volume 1, Issue 2, 1964, Pages 141-174.
140. Héquetto A, Ruz M.-N., Zemmour A., Marin D., Cartier A., Sipka V. Alongshore variability in coastal dune erosion and post-storm recovery, Northern Coast of France // Journal of Coastal Research. 2019. 88(Si). Pp. 25-45.
141. Howard A.D. Badland morphology and evolution: interpretation using a simulation model // Earth surface processes and landforms. 1997. V.22. p. 211-227
142. Hsu K.J. Physics of Sedimentology. Springer. 2004. 240 p.
143. Hutchinson M.F., Xu T. and Stein J.A. Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure. In: Geomorphometry 2011, edited by T. Hengl, I.S. Evans, J.P. Wilson and M. Gould, 2011, pp. 19–22. Redlands, California, USA. Веб-сайт: <http://geomorphometry.org/HutchinsonXu2011>
144. Inman D. L., Nordstrom C. E. and Flick R. E. Currents in sub-marine canyons: An air-sea-land interaction // Annu. Rev. Fluid Mech., 1976, 8, 275–310.

145. Jenson S. K., Domingue J. O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54 (11). 1988. P. 1593–1600.
146. Kileso A., Gritsenko V., Chernyshkov P., Isachenko I., Burnashov E. Orographic risks of bottom topography and sustainability of the sea coasts of the Kaliningrad region, Russia // *Journal of Environmental Hydrology*. – 2017. – Vol. 25. – P. 2.
147. 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.
148. Kuenen Ph, Migliorini CI. Turbidity currents as a cause of graded bedding // *J Geol*. 1950. 58. P. 91-127.
149. Łabuz A. Erosion and its rate on an accumulative Polish dunecoast: the effects of the January 2012 storm surge // *OCEANOLOGIA*, 56 (2), 2014, pp. 307–326.
150. Massel S.R. *Hydrodynamics of Coastal Zones*. – Elsevier Science & Technology, Oceanography Series, 1989, vol. 48, 336 p.
151. Moore I. D., Grayson R. B. and Landson A. R. *Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications* // *Hydrological Processes*. 1991. 5. P. 3 – 30.
152. Mulder T. and Syvitski J. P. M. Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharge to the world oceans // *J. Geol.*, 1995, 103, 285–299.
153. Mulder T., Savoye B., Syvitski J. P. M. and Parize O. Des courants de turbidite hypercyaux dans la tete du canyon du Var? Donne'es hydrologiques et observations de terrain // *Oceanol. Acta*, 1997, 20, 607–626.
154. Mulder T., Weber O., Anschutz P., Jorissen F. J. and Jouanneau J.-M. A few months-old storm-generated turbidite deposited in the Capbreton Canyon (Bay of Biscay, SW France) // *Geo-Mar. Lett.*, 2001, 21, 149–156.
155. Neumeier, U., C. Ferrarin, C. L. Amos, G. Umgiesser and M. Z. Li. Sedtrans05: An improved sediment-transport model for continental shelves and coastal waters with a new algorithm for cohesive sediments // *Computers & Geosciences*, 2008. Vol. 34, 1223-1242, doi:10.1016/j.cageo.2008.02.007.
156. Normandeau A., Bourgault D., Neumeier U., Lajeunesse P., St-Onge G., Gostiaux L. and Chavanne C. Storm-induced turbidity currents on a sediment-starved shelf: Insight from direct

- monitoring and repeat seabed mapping of upslope migrating bedforms // *Sedimentology*, 2020, 67, 1045-1068.
157. Ogston A.S., Cacchione D.A., Sternberg R.W. and Kineke G.C. Storm and river flood-driven sediment transport on the northern California continental shelf // *Cont. Shelf Res.*, 2000, 20, 2141–2162
158. Ostrowski R., Pruszek Z., Babakov A. Condition of South-Eastern Baltic Sea Shores and Methods of Protecting Them // *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics* Vol. 61 (2014), No. 1–2, pp. 17–37
159. Özgökmen, T. M., Chassignet, E. P. Dynamics of Two-Dimensional Turbulent Bottom Gravity Currents // *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32(5), 1460-1478.
160. Paull C.K., Ussler W III, Greene H.G., Keaton R., Mitts P., Barry J. Caught in the act: the 20 December 2001 gravity flow event in Monterey Canyon // *Geo-Mar Lett.*, 2003, 22, 227–232
161. Piper D.J.W., Cochonat P. and Morrison M. The sequence of events around the epicentre of the 1929 Grand Banks earthquake: initiation of debris flows and turbidity currents inferred from sidescan sonar // *Sedimentology*, 1999, v. 46, p. 79–97
162. Piper David J.W., Normark William R. Processes That Initiate Turbidity Currents and Their Influence on Turbidites: A Marine Geology Perspective // *Journal of Sedimentary Research* 2009; 79 (6): 347–362. doi: <https://doi.org/10.2110/jsr.2009.046>
163. Planchon O. and Darboux F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. // *Catena*, 2002, 46(2): 159–176
164. Properties and Transformation of Hydrodynamical Processes in the Coastal Zone of Nontidal Sea. Results of the international project LUBIATOWO 1974 in the coastal zone of the Baltic Sea. Raporty Mor.Inst,Ryb. Seria R, Nr 2 a, Gdynia, 1976.
165. 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, 193, 129–149.
166. Puig P., Ogston A.S., Mullenbach B.L., Nittrouer C.A., Parsons J.D. and Sternberg R.W. Storm-induced sediment gravity flows at the head of the Eel submarine canyon, northern California margin // *J. Geophys. Res.*, 2004, 109, C03019. doi:10.1029/2003JC001918.
167. Ryabchuk D., Sergeev A., Burnashev E., Khorikov V., Neevin I., Kovaleva O., Budanov L., Zhamoida V., Danchenkov A. Coastal processes of the Russian Baltic (eastern Gulf of

- Finland and Kaliningrad area) // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. 2020. 54 (1): qjgeh2020-036.
168. Schwing F. B., Norton J. G. and Pilsklan C. H. Response of Monterey Bay to the Loma Prieta earthquake // Eos Trans. AGU, 1990, 71(6), 250–251
169. Seifert T., Kayser B. A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea. // Meereswiss. Ber, 1995, № 9, pp 72-88.
170. Seifert, T., Tauber, F., Kayser, B. A high-resolution spherical grid topography of the Baltic Sea - 2nd edition. Baltic Sea Science Congress, Stockholm, 2529 November 2001, Poster# 147 (In: [www.io-warnemuende.de/iowtopo](http://www.io-warnemuende.de/iowtopo)).
171. Shepard F. P., McLoughlin P. A., Marshall N. F. and Sullivan G. G. Current-meter recordings of low-speed turbidity currents // Geology, 1977, 5, 297–301.
172. Simpson J.E. Gravity currents in the environment and the laboratory. England. ELLIS HORWOOD LTD. 1987. 244 p
173. 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. and Xu J. Key future directions for research on turbidity currents and their deposits // Journal of Sedimentary Research, 2015, vol 85, no. 2, pp. 153-169. DOI: 10.2110/jsr.2015.03
174. Tansley A.G. The use and abuse of vegetational terms and concepts // Ecology. 1935, 16 (3): 284–307
175. Tarboton D. G., Bras R. L. and Rodriguez–Iturbe I. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data // Гидрологические процессы. 1991. 5. P. 81–100
176. Taylor G.I. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. I // Proc.R. Soc. Lond. A. 1950. V. 201. P. 192–196
177. The Interaction of the Sea and the Atmosphere in the Nearshore Zone. Proceedings of the EKAM 73 international field study in the Baltic Sea nearshore zone. Raporty Mor.Inst.Ryb. Seria R, Nr 2 a, Gdynia, 1975.
178. 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.

179. Xu J., Noble M., Eittreim S., Rosenfeld L., Schwing F. and Pilskaln C. Distribution and transport of suspended particulate matter in Monterey Canyon, California // *Marine Geology*, 2002, 181, 215-234.
180. Xu J.P., Noble M.A. and Rosenfeld L.K., , In-situ measurements of velocity structure within turbidity currents // *Geophysical Research Letters*, 2004. v. 31, no. L09311.
181. Yoshikawa S., Nemoto K. Seasonal variations of sediment transport to a canyon and coastal erosion along the Shimizu coast, Suruga Bay, Japan // *Mar Geol.*, 2010, 271, 165–176
- 182.** Zhamoida, Vladimir A.; Ryabchuk, Darya V.; Kropatchev, Yury P.; Kurennoy, Dmitry; Boldyrev, Vadim L.; Sivkov, Vadim V. Recent sedimentation processes in the coastal zone of the Curonian Spit (Kaliningrad region, Baltic Sea) // *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften Band 160 Heft 2 (2009)*, p. 143 – 157