

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

*На правах рукописи*

Закиров Руслан Баядитович

**ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ВХОДНОГО УЧАСТКА  
КАЛИНИНГРАДСКОГО МОРСКОГО КАНАЛА: СТАНОВЛЕНИЕ И  
СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ**

Специальность 1.6.21. Геоэкология (географические науки)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук

Научный руководитель:  
кандидат физико-математических наук,  
Б. В. Чубаренко

Научный консультант:  
кандидат геолого-минералогических наук,  
В. А. Чечко

Калининград - 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
Глава 1. Характеристика природно-технической системы входного участка Калининградского морского канала.....	13
1.1. Понятийная база и сокращения .....	13
1.2. Развитие концепции ПТС .....	16
1.2.1. Концепция прибрежных ПТС .....	19
1.2.2. Исторические сложившиеся ПТС .....	20
1.3. Характеристика района исследования.....	23
1.4. Исходные данные и методы.....	29
1.5. Этапы коэволюции природной и техногенной подсистем .....	30
1.5.1. Первый этап (1510-1767 гг.) – закрепление пролива .....	31
1.5.2. Второй этап (1768-1887 гг.) – строительство входных молов .....	32
1.5.3. Третий этап (1768-1887 гг.) – введение Морского канала.....	32
1.5.4. Четвертый (с 1938 г – наши дни) – современный этап развития.....	33
1.6. Современное состояние ПТС входного участка КМК.....	34
1.6.1. Состав ПТС.....	34
1.6.2. Границы ПТС в пространстве.....	37
1.7. Выводы.....	38
Глава 2. Геоморфологический анализ донного рельефа акватории ПТС .....	40
2.1. Исходные данные и методы.....	40
2.2. Геоморфологическая модель седиментационной обстановки .....	44
2.3. Эрозионная депрессия .....	46
2.4. Пролив.....	50
2.5. Затопленная нагонная дельта.....	51
2.6. Гранулометрический состав донных осадков.....	54
2.7. Выводы.....	55
Глава 3. Изучение гидро-литодинамических условий движения взвешенных наносов через входной участок КМК.....	57
3.1. Исходные данные и методы.....	57
3.1.1. Схема точек измерений .....	57
3.1.2. Оборудование и объем измерений.....	58
3.1.3. Обработка данных измерений течений .....	61
3.1.4. Методы лабораторного анализа .....	65
3.1.5. Изучение условий взвесепереноса .....	65

3.2. Скорость и ориентация течений .....	67
3.3. Водообмен через акваторию ПТС .....	69
3.3.1. Повторяемость актов затока и оттока .....	69
3.3.2. Объем водообмена .....	69
3.3.3. Интенсивность водообмена .....	70
3.3.4 Кумулятивный водообмен .....	70
3.4. Влияние уровня моря на режим водообмена .....	71
3.5. Влияние уровня моря на кумулятивный объем водообмена .....	74
3.6. Поток взвешенных наносов .....	76
3.6.1. Вертикальное распределение взвешенного материала .....	76
3.6.2. Гранулометрический состав взвешенных наносов .....	78
3.7. Оценки времен переноса взвеси различных фракций .....	79
3.8. Характеристика литодинамических процессов акватории ПТС .....	81
3.9. Выводы .....	83
Глава 4. Разработка рекомендаций по хозяйственному освоению песчаных запасов .....	84
4.1. Исходные данные и методы .....	84
4.1.1. Методы лабораторного анализа .....	84
4.1.2. Оценка загрязненности .....	85
4.2. Загрязненность осадков .....	87
4.3. Схема хозяйственного освоения песчаных запасов .....	89
4.4. Выводы .....	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	92
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	95

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность исследования.** Проблема регулирования хозяйственной деятельности в прибрежно-морской зоне в целях устойчивого развития территорий - ключевая для многих разделов геоэкологии [Айбулатов, 2004, 2005; Денисов, 2002]. Для Калининградской области в условиях эксклавности региона эта проблема приобретает еще и социальный аспект [Болдырев, 1981; Куликов и др., 2012; Гуменюк и др., 2015; Федоров, 2016]. Внедрение и развитие подхода природно-технических систем (далее ПТС) применительно к входному участку Калининградского морского канала (далее *входной участок КМК*) актуально в связи с неминуемым его преобразованием в целях развития транспортной инфраструктуры и оптимизации использования собственных ресурсов Калининградской области в будущем (в условиях возможных ограничений).

**Степень разработанности проблемы.** Системный подход применительно к прибрежным территориям и объектам служит целям их более устойчивого развития. В исследовании любого сложного объекта, явления или процесса следует опираться на их целостное видение. Система должна восприниматься как совокупность взаимодействующих друг с другом элементов, образующих определенную целостность, и обладающая интегративными свойствами, при этом элемент системы – это предел ее членения с точки зрения анализируемого аспекта, решения конкретной задачи, достижения поставленной цели [Огнев, 2006, 2008].

Развиваемая в исследовании концепция ПТС применительно к исторически сложившимся системам предполагает учет достигнутого в процессе коэволюции баланса природной и техногенной подсистем как основу для планирования будущих модернизаций системы [Шилин, 2006; Погребов, 2011; Бондаренко и др, 2013; Федоров, Суздалева, 2014; Суздалева, 2015; Бондаренко и др, 2015].

История хозяйственного освоения входного участка КМК начинается с XIV в. [Басс, 2007; Довыденко, 2011] и продолжается до настоящих дней с попеременным доминированием антропогенного, техногенного и природного

влияний, в ходе которых исторически сложилась природно-техническая система [Закиров, Чубаренко, 2022]. В условиях эксклавности Калининградской области оптимизация хозяйственной деятельности в прибрежно-морской зоне приобретает особенно большое значение, в частности это относится к транспортно-логистической отрасли [Федоров и др., 2017; Гуменюк и др., 2015]. В существующем виде габариты Калининградского морского канала, связывающего порт Калининград с открытым морем, сдерживают развитие грузооборота всего портового комплекса. В связи с этим канал необходимо расширять и углублять. Но в таком случае изменения затронут единственную протоку между Калининградским/Вислинским заливом и Балтийским морем.

Ранее в научной литературе входной участок КМК обсуждался в связи с водообменом [Лазаренко, Маевский, 1971], влиянием гидротехнических объектов на вдольбереговые течения в прибрежной морской зоне [Бабаков, 2003; Чечко и др., 2008; Болдырев и др., 2010; Леонтьев, 2012; Бабаков, Чубаренко, 2019], оценками водного [Cieśliński, Chlost, 2017], седиментационного [Chechko, Blazhchishin, 2002] и геохимического [Богданов и др., 2021] балансов, но, будучи местом сосредоточения хозяйственной деятельности, он никогда не рассматривался в качестве природно-технической системы, хотя подвергается постоянным техногенным преобразованиям с XVII века [Басс, Жиндарев, 2011; Довыденко, 2011]. КМК сегодня - единственный транспортный водный путь, связывающий порт Калининград с открытым морем. Современные габариты канала не позволяют заводить суда с осадкой более 12 м и длиной более 230 м [Приказ Минтранса..., 2013], поэтому расширение и углубление фарватера остается вопросом времени.

**Объект исследования** – входной участок Калининградского морского канала как природно-техническая система.

**Предмет** – закономерности формирования системы взаимодействия гидро- и литодинамических факторов, структуры современного рельефа дна, степень антропогенных изменений донных отложений.

**Цель работы.** Определить системообразующие компоненты природно-технической системы входного участка КМК, факторы развития, связи с гидроритодинамической обстановкой, оценить ее состояние и предложить варианты оптимизации деятельности.

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

1. Охарактеризовать этапы развития природно-технической системы входного участка КМК, выделить пространственные границы.
2. Определить морфологические, гидродинамические и литодинамические особенности.
3. Оценить состояние и объем доступных песчаных отложений.
4. Разработать рекомендации по оптимизации деятельности ПТС.

**Методология, материалы и методы.** В теоретико-методологическом плане в основу настоящей работы положен системный подход (В. Б. Сочава, Е. Odum, Н. А. Айбулатов, и др.). Для определения связи и отношений между техническими, и природными компонентами ПТС применялись картографические методы, методы гидрографических измерений, геоморфологического анализа, гидрологических измерений, литодинамических измерений, гранулометрического анализа, геохимического анализа, геоэкологического анализа. Использовались специализированные программные средства ESRI ArcGIS 10, PDS Teledyne, Microsoft Excel, Grapher 8.

Автором были систематизированы и обобщены опубликованные и фондовые картографические материалы за 1924-2021 гг.; батиметрические данные лаборатории прибрежных систем Атлантического отделения Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН за 2012 и 2021 гг. (АО ИОРАН), ФГУП «Росморпорт» и Navionics Sonar Chart за 2008 – 2019 гг.; материалы натурных измерений течений, эхолотных промеров глубин, материалы пробоотбора, сопутствующие данные об уровне моря ФГУП «Росморпорт» во время ситуационных экспедиций 2019-2020 гг.; результаты гранулометрического и

геохимического обследований выполненных Центром лабораторного анализа в г. Калининград (ЦЛАТИ) и в лаборатории прибрежных систем Атлантического отделения Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН.

### **Научная новизна**

Выделены этапы развития ПТС: *укрепление берегов пролива (1510-1767), строительство входных молов (1768-1887), строительство Морского канала и Гидрогавани (1889-1938), функционирование и модернизация ПТС (1938–наши дни)*; определены зоны взаимодействия компонентов техногенной и природной подсистем ПТС: площадь зоны влияния в море – 16 км<sup>2</sup>, в Калининградском заливе, включая акваторию пролива и КМК – 14 км<sup>2</sup>.

Впервые создана цифровая модель донного рельефа акватории ПТС, выявлено неравновесное состояние элементов донного рельефа: рост эрозионной депрессии скоростью 2500 м<sup>3</sup>/год, рост затопленной нагонной дельты со скоростью 50000 м<sup>3</sup>/год.

Величина водообмена через пролив установлена с учетом колебаний уровня моря в районе ПТС, коэффициент корреляции между интегральным водообменом и уровнем моря 0.84–0.98.

Движение взвешенных наносов через входной участок КМК осуществляется как при затоках, так и при оттоках, поэтому разница между условиями оттоков и затоков позволяет выразить общий характер седиментообмена: *илистая и очень мелкая песчаная* взвесь преимущественно выносятся из залива в море, а для *мелкого, среднего и крупного* песков взвесеперенос при затоках сохраняется дольше на 2.3%, 0.5% и 0.4% соответственно.

Определены объемы песчаного материала (6 500 000 м<sup>3</sup>) и качество отложений в затопленной нагонной дельты (чистые), предложены варианты их использования в хозяйственных целях. На основании ранее обсуждаемого варианта оптимизации деятельности ПТС [Чечко и др., 2008], автором предложена и количественно описана схема по использованию изъятого в ходе

дноуглубительных работ песчаного материала на нужды берегозащиты (около 30 тыс. м<sup>3</sup>/год).

### **Основные защищаемые положения**

1. Входной участок Калининградского морского канала с прилегающими акваториями – это исторически-сложившаяся ПТС, в которой с начала XVI в. происходило попеременное изменения соотношения техногенного и природного влияния; выделено 4 этапа развития ПТС: укрепление берегов пролива (1510–1767), строительство входных молов (1768–1887), строительство Морского канала и Гидрогавани (1889–1938), функционирование и модернизация ПТС (1938–н.в.).

2. Водообмен через ПТС может быть достаточно достоверно оценен по локальным колебаниям уровня моря (по принципу близкодействия), для практического использования предложена линейная связь между кумулятивным водообменом и динамикой уровня (коэффициент корреляции - от 0.84 до 0.98).

3. Качественный песчаный материал в затопленной нагонной дельте может быть использован для развития ПТС, его возобновляемость обеспечивается естественной заносимостью (в большей степени - мелким, в меньшей - средним и крупным материалом).

**Практическое значение.** В условиях дефицита песчаного материала для гидротехнических работ восполняемый материал затопленной нагонной дельты может представлять интерес для целей берегоукрепления или восстановления пляжей. На основе количественной и качественной оценки объемов песчаного материала предложены рекомендация для пополнения минерально-сырьевой базы региона путем разработки отложений затопленной нагонной дельты (оцениваемый объем 6 500 000 м<sup>3</sup>, за исследуемый семилетний период он увеличился на 400 000 м<sup>3</sup>) и рекомендация по использованию объемов дноуглубления в акватории ПТС (объем которого неминуемо возрастет при дальнейшем развитии природно-технической системы) для компенсации (в



соответствии с [Чечко и др., 2008]) абразионных процессов на морском побережье Балтийской косы.

**Апробация результатов.** Основные результаты исследования апробированы на рабочих семинарах лаборатории прибрежных систем АОИОРАН, на конкурсах стендовых докладов молодых ученых в Музее Мирового Океана (г. Калининград) в рамках «Фестиваля науки – 2018» и «Фестиваля науки – 2019», а так же были представлены на конференциях: «8th EUROLAG Symposium», Greece, Athens, 19-23.03.2018; IV Всероссийская научная конференция молодых ученых, г. Севастополь, 22- 26 апреля 2019 г.; IV Международная научно - практическая конференция, приуроченная к 1000-летию г. Бреста, Брест, 12–14 сент. 2019 г.; VIII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2019)»; «9 th EUROLAG conference on coastal lagoons and transitional environments», Italy, Venezia, 20-24.01. 2020; «XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования - в практику берегопользования», Калининград, 18-24 апреля 2022 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 4 работы, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК по данной специальности, 1 работа подготовлена на английском языке и доступна зарубежному читателю.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников, который включает 135 наименований. Полный объем работы составляет 111 страниц, содержит 18 таблиц, 35 рисунков.

**Личный вклад автора.** Соискателем совместно с научным руководителем определена актуальность исследования, сформулирована цель и обозначены основные задачи. Все основные результаты и выводы, изложенные в работе, диссертантом получены самостоятельно. Планирование и проведение экспедиционных работ, а также все виды анализа (за исключением химического и гранулометрического анализов) и камеральной обработки (за исключением

камеральной обработки взвеси) выполнены автором самостоятельно. Анализ данных и формулировка выводов выполнены самостоятельно в тесном взаимодействии с научным руководителем. Вопросы седиментационного направления решались в контакте с научным консультантом.

**Соответствие диссертации паспорту специальности.** Работа соответствует паспорту специальности 1.6.21 Геоэкология по пункту 1.11. Геоэкологические аспекты функционирования природно-технических систем. Оптимизация взаимодействия (коэволюция) природной и техногенной подсистем).

**Благодарности.** Автор выражает благодарность научному руководителю к.ф.-м.н. Чубаренко Б.В. за формирование научных взглядов, ценные советы, конструктивную критику, помощь на всех этапах исследования, научному консультанту к.г.-м.н. Чечко В.А. за курирование седиментационного направления и консультации, коллегам из лаборатории прибрежных систем и лаборатории геоэкологии АОИОРАН за предоставленные данные, научное оборудование и консультации. Отдельная благодарность коллегам из ФГУП «Росморпорт» за предоставленные данные, коллегам из ООО «Гидрострой» за вдохновение, практические советы и предоставленные возможности для написания работы, волонтерам прибрежных экспедиций за их незаменимую помощь, родным и близким за всеобщую поддержку. Работа частично поддерживалась грантом РФФИ № 19-35-90069\19.

**Публикации по теме исследования в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В., Сологуб С. П., Шушарин А. В. Динамика эрозионной депрессии на входе в Калининградский залив // Известия Иркутского государственного университета. Серия: науки о Земле. – №26.– 2018.– С. 46-59
2. Chubarenko B., Zakirov R. Water exchange of nontidal estuarine coastal lagoon with the sea – example of the Vistula Lagoon (Baltic Sea) // J. Waterway, Port,

Coastal, Ocean Eng.– 2021, 147(4).– 05021005. DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000633.

3. Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В. Входной участок Калининградского залива как природно-техническая система // Российский журнал прикладной экологии. – 2022. – № 1. – С. 48-59. – DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.1.48.59>

### **Публикации в прочих изданиях**

1. Chubarenko B., Zhelezova E., Zakirov R, Dvoeglazova N. Fingerprints of water exchange between the non-tidal lagoon and the sea in the ice coverage and inlet morphology. // Book of Abstracts of «8th EUROLAG Symposium», Greece, Athens, 19-23.03.2018. – Athens: Hellenic Centre for Marine Research, 2018. – P.24.

2. Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В. Морфометрические характеристики подводного песчаного бара на входе в Калининградский залив как индикаторы гидродинамической структуры водообмена залива с морем. // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Севастополь, 22- 26 апреля 2019 г. [Электронный ресурс]. – Севастополь: ФГБУН МГИ, 2019. – Режим доступа: [http://mhi-ras.ru/news/news\\_201904151055.html](http://mhi-ras.ru/news/news_201904151055.html), свободный. – С. 276-278.

3. Закиров Р.Б., Салаватова Л. И., Чубаренко Б.В. Поступление осадочного материала в Калининградский/Вислинский залив Балтийского моря за счет водообмена. // Актуальные проблемы наук о Земле: исследования трансграничных регионов: сб. материалов IV Междунар. науч.- практ. конф., приуроч. к 1000-летию г. Бреста, Брест, 12–14 сент. 2019 г.: в 2 ч. / Ин-т природопользования НАН Беларуси, Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина, Брест. гос. Техн ун-т ; редкол.: А. К. Карабанов, М. А. Богдасаров, А. А. Волчек. – Брест: БрГУ, 2019. – Ч. 1. (299 с.) – С. 153-156.

4. Чечко В.А., Закиров Р.Б., Топчая В.Ю. Влияние антропогенного фактора на динамику донных осадков Калининградского залива // Актуальные проблемы наук о Земле: исследования трансграничных регионов: сб. материалов IV

Международ. науч.-практ. конф., приуроч. к 1000-летию г. Бреста, Брест, 12–14 сент. 2019 г.: в 2 ч. / Ин-т природопользования НАН Беларуси, Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина, Брест. гос. техн. ун-т; редкол.: А.К. Карабанов, М.А. Богдасаров, А.А. Волчек. – Брест: БрГУ, 2019. – Ч.1. (299 с.).– С. 185-189.

5. Салаватова Л.И., Закиров Р.Б., Чубаренко Б.В., Степанова Н.Б. Деформация дна на входном участке Вислинского залива за 2012-2019 гг. // Труды VIII Международ. научно-практ. конф. «Морские исследования и образование (MARESEDU-2019)». Том I(III): [сборник]. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2020 (296 с.). – С. 195-199. ISBN 978-5-6042986-0-2.

6. Zakirov R., Chubarenko B., Domnin D., Salavatova L., Mazur A., Borisov M., Stepanova N. Inflow and outflow currents and related sediment transport in the inlet of the Vistula lagoon by results of in situ measurements // Book of Abstracts of «9<sup>th</sup> EUROLAG conference on coastal lagoons and transitional environments», Italy, Venice, 20-24.01.2020.– Venice, 2020.– P. 119.– ISBN 9788889405338

7. Закиров Р.Б., Чубаренко Б.В., Чечко В.А. Геоэкологическая оценка песчаных отложений бара на входе в Калининградский-Вислинский залив / Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 8(110). Ч1. – С. 192-198. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.110.8.032>

8. Закиров Р. Б., Краснов Е. В., Чубаренко Б. В. Этапы формирования и развития природно-технической системы Балтийского пролива // Российский журнал прикладной экологии. – 2022. – № \_\_. – С. \_\_\_\_ (отправлена в редакцию)

9. Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В., Чечко В. А. Гидро-литодинамические условия движения взвешенных наносов через Балтийский пролив (Калининградский залив, Балтийское море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2022. – № \_\_. – С. \_\_\_\_ (отправлена в редакцию)

## **Глава 1. Характеристика природно-технической системы входного участка Калининградского морского канала**

В данном разделе поясняются основные понятия и термины, используемые в исследовании, обсуждается опыт применения концепции ПТС к прибрежным и исторически сложившимся ПТС, обосновано применение концепции ПТС к входному участку Калининградского морского канала, охарактеризованы этапы его хозяйственного освоения, пространственные зоны взаимовлияния природной и техногенной подсистем, прямые и обратные связи в составе системы.

### **1.1. Понятийная база и сокращения**

Согласно [Рожков-Юрьевский, 2009] во многих российских популярных и даже научных изданиях, посвященных географии Калининградской области, единственная протока, связывающая Калининградский/Вислинский залив с Балтийским морем, называется Балтийским проливом [Гидрометеорологический режим ..., 1971; Носкова, 1978; Гидрометеорологические условия ..., 1985; Географический атлас Калининградской области, 2002; География Янтарного края России, 2004; Балтийская коса..., 2009; Большой энциклопедический словарь Калининградской области, 2011]. При этом в ряде изданий этот объект именуется Морским каналом [Балтийская коса ... , 2009; Балтийск ..., 2000], что приводит к смешению понятий: географического объекта, каким является пролив, и гидротехнического сооружения (в данном случае судоходного канала) [Рожков-Юрьевский, 2009].

На современных российских картах протока между заливом и морем указывается без названия [Чубаренко, Шванковска, 2009], а в реестре зарегистрированных географических названий [Реестр зарегистрированных..., 2022] она не значится. Судя по картам, эта протока является продолжением Калининградского морского канала (он зафиксирован в [Реестр зарегистрированных..., 2022]), хотя по сути это самостоятельный исторически возникший пролив, удовлетворяющий определению [Пролив, 2016] - относительно узкое водное пространство, разделяющее какие-либо участки суши

и соединяющее смежные водные бассейны или их части. Иногда для краткости в литературе используется название «Морской канал», что почти в дословном переводе с немецкого языка означает Зее-Тиф или "Морской пролив" [Балтийская коса..., 2009], а в научной литературе, как это и было введено в [Гидрометеорологический режим ..., 1971, продолжает использоваться название «Балтийский пролив» [Чубаренко, Шванковска, 2009].

Калининградский морской канал (КМК) – открытый судоходный морской канал, связывающий порт Калининград с Балтийским морем. Положительная нумерация пикетов (далее – ПК), т.е. береговых марок, расположенных по берегам канала через каждые 100 м, начинается от сигнального огня западного шпиля дамбы №1 (нулевой пикет) и заканчивается в порту Калининград. Отрицательная нумерация пикетов (или с литером «а») начинается там же, идет в сторону моря и заканчивается сигнальными огнями входных молов (ПК 27а) (рисунок 1.1) [Заключение № 188, 2015]. В мореплавании для обозначения прохода между молами используется термин «входные ворота Калининградского морского канала» [Заключение № 188, 2015].

Отсутствие официально зарегистрированного географического названия единственной протоки между Калининградским заливом и Балтийским морем создает значительные неудобства в описании результатов исследований в этом районе, поэтому часть входного участка КМК от створа «входных ворот» (ПК 27а) до пикета 7а в диссертации будет называться проливом, исходя из определения этого термина [Пролив, 2016].

Северный берег выделенного пролива складывается из северного мола (ПК 27а–24а), набережной г. Балтийска (ПК 24а–12а) и северо-западной дамбы (ПК12а–10а). На ПК10а северный берег прерывается проходом во внутренние гавани. За проходом, между ПК 8а–1а, с северной стороны канала расположены дуговые оградительные молы. Южный берег пролива складывается из южного мола (ПК 27а–17а) и набережной Балтийской косы (ПК 17а–7а). Между южным и северным берегами пролива действует паромная переправа «Балтийск-Балтийская

коса» (ПК7а), а от ПК 7а до края шпоры дамбы №1 (нулевой пикет) расположен проход из пролива в Калининградский залив.

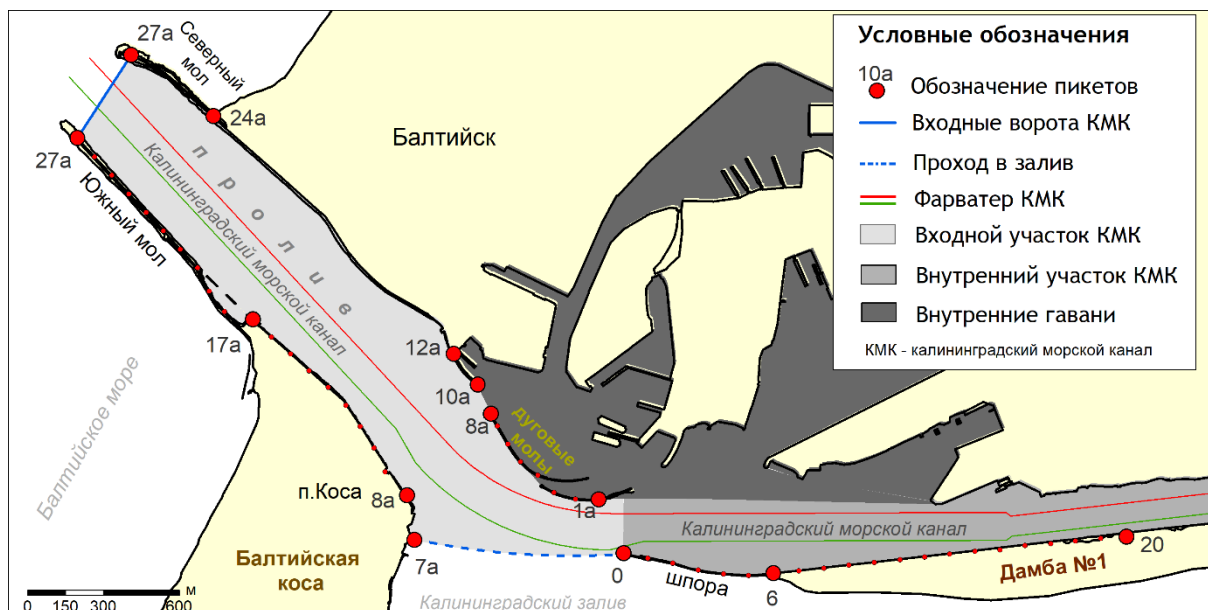


Рисунок 1.1 – Схема входного участка Калининградского морского канала

Для краткости обозначения географических названий в работе использованы следующие сокращения:

**КМК** – Калининградский морской канал

**Входные ворота КМК** – створ между сигнальными молами входных молов

**Входной участок КМК** – участок Калининградского морского канала, где имеется морское влияние (будет определено позже главе 1), т.е. от входных ворот КМК до нулевого пикета.

**Внутренний участок КМК** – весь остальной участок Калининградского морского канала вплоть до устья р. Преголи

**Пролив** – часть входного участка Калининградского морского канала между пикетами 8а–29а

**ПТС** – природно-техническая система

**ПТС входного участка КМК** – природно-техническая система входного участка Калининградского морского канала (см. далее главу 1)

**Проход в залив** – створ между причалом паромной переправы на южном берегу пролива (ПК 7а) и сигнальным огнем шпоры дамбы №1 (ПК 0)

## **1.2. Развитие концепции ПТС**

Внедрение и развитие системного подхода применительно к развивающимся прибрежным объектам служит гарантом устойчивого развития прибрежных территорий [Сочава, 1978; Бровко, Лымарев, 1997]. В отличие от традиционного подхода, когда синтез идет от простого к сложному, от части к целому, от элемента к системе, в системном подходе анализ делается от целого к составным частям, от системы к элементам, от сложного к простому, поэтому при исследовании любого сложного объекта, явления или процесса системный подход базируется на их целостном видении - система воспринимается как совокупность взаимодействующих друг с другом элементов, образующих определенную целостность, и обладающих интегративными свойствами [Огнев, 2006; Огнев, 2008]. Элемент системы – это предел ее членения с точки зрения анализируемого аспекта, решения конкретной задачи, достижения поставленной цели.

Концепция природно-технических систем происходит из системного подхода при изучении сложноорганизованных природных систем и представляет собой концептуальную модель для изучения взаимодействия между природной и технической системами, она объединяет в себе набор общих признаков, необходимых для выделения природно-технической системы: целостность, иерархичность, организованность, управляемость, открытость и замкнутость [Сочава, 1978; Бровко, Лымарев, 1997]. Концепция рассматривает хозяйственную деятельность человека как взаимодействующие между собой природные и технические системы, рассмотрение связей и структуры этого взаимодействия дает возможность прогнозировать антропогенную трансформацию природных компонентов, находить оптимальные решения по оптимальной эксплуатации технологического оборудования и сооружений, а также предусмотреть



адекватные природоохранные технологии, которые минимизируют воздействие на природную среду [Исаев, 2016].

В отечественной научной практике общая концепция ПТС зародилась в 60-х годах XX века благодаря работам ученых Института географии АН СССР, дальнейшее развитие получила в работах географов других академических институтов и университетов [Исаев, 2016].

На сегодняшний день, несмотря на широкое применение концепции, в научной и технической литературе не существует нормативно закреплённого определения ПТС. Например, в работах геологических институтов активно развивается направление концепции горнопромышленных ПТС [Бондарик, Ярг, 2011], по отношению к водным объектам в урбанизированной среде – концепция техногенеза водных объектов [Суздалева, 2015], а по отношению к техногенным объектам в прибрежной зоне – концепция прибрежных ПТС [Лымарев, 2000; Шилин, 2006]. Но необходимо отметить, что при всем своем многообразии подходов, все определения ПТС схожи в своих трактовках [Исаев, 2016], т.к. опираются на единый системный подход.

**Система** – это совокупность элементов, связанных и взаимодействующих друг с другом, образующих определенную целостность, единство и обладающих интегративным свойством [Огнев, 2006]. По А.Л. Ревзону, **природно-техническая система** – совокупность форм и состояний взаимодействия компонентов природной среды с инженерными сооружениями на всех стадиях функционирования (от проектирования до реконструкции) [Ревзон, 1992]. По Г.К. Бондарик, природно-техническая система – целостная, упорядоченная в пространственно-временном отношении совокупность взаимодействующих компонентов, включающая орудия, продукты и средства труда, естественные и искусственно измененные природные тела, а также естественные и искусственные поля [Бондарик, 2004]. По определению А. Л. Суздалевой ПТС – это совокупность взаимообусловленных природных, природно-техногенных и антропогенных объектов и условий [Суздалева, 2015]. В работе [Мазур,

Молдованов, 2021] авторы оперируют понятием природно-технических геосистем (ПТГ), под которым понимает совокупность природных и искусственных объектов, формирующихся в результате строительства и эксплуатации инженерных и иных сооружений, комплексов и технических средств, взаимодействующих с природными объектами (геологические тела, почва, растительный покров, рельеф, водные источники и атмосфера, фауна и социумы).

Таким образом, все авторы относят к ПТС любые формы взаимосвязанного сосуществования природных и технических объектов, а также природно-технических систем в процессе их формирования и развития. Развиваемые геоэкологическими школами концептуальные модели ПТС широко применяются на практике в самых различных сферах хозяйственной деятельности, создаваемые на их основе ПТС окружают нас повсюду, будь то пруд в парке или парк в урбанизированной среде [Суздалева, 2015].

Каждая ПТС (ПТГ) создается человеком для удовлетворения определенных потребностей современного общества: место проживания людей, орошение полей, транспортировка топливно-энергетических ресурсов, переработка сырья, производство промышленной или продовольственной продукции и т.д. Следовательно, ПТС (ПТГ) – это образование, которое непременно возникает в любом регионе в связи с происходящей в нем хозяйственной деятельностью и приходит на смену природным геосистемам, существовавшим там до внедрения людей и техники в природную среду [Мазур, Молдованов, 2001; Исаев, 2016]. Природно-техническая система принципиально отличается от природной. Главнейшее ее отличие состоит в том, что она является управляемой (кибернетической). Взаимодействие между технической системой (сооружением) и природной средой требует подхода с кибернетических позиций: управление ими путем регулирования потоков вещества и энергии, поддержания сбалансированности прямых и обратных связей между составляющими компонентами [Бондарик, Ярг, 2011; Исаев, 2016].

### *1.2.1. Концепция прибрежных ПТС*

Теория развития ПТС в прибрежной морской зоне широко освещается в докторской диссертации М. Б. Шилина [Шилин, 2006]. Среди прибрежных ПТС он выделяет 11 типов, из наиболее распространенных стоит отметить: сооружения для обеспечения морских транспортных перевозок (морские портовые комплексы МПК, морские каналы, причалы, обновляемые фарватеры и др.), дамбовые комплексы защитных сооружений (КЗС) от наводнений, берегозащитные и берегоукрепляющие сооружения. Прибрежные ПТС обладают всеми системными признаками как таковыми (структурность, целостность, целенаправленность), их разномасштабность обусловлена иерархичностью организации прибрежных геосистем (экозона, экорегион, экосекция, экотоп и др.), открытость подразумевает энерго- массообмен с сопряженными экосистемами, динамичность – в непостоянстве форм взаимодействия между компонентами, устойчивость – свойство сохранять структуру, заданную функцию. Разработки М. Б. Шилина применялись при организации мониторинга, строительства и эксплуатации портовых комплексов в Финском заливе Балтийского моря и Кандалакшском заливе Белого моря, а его методологические разработки используются в учебных процессах государственных вузов [Федоров, Шилин, 2003; Кононенко, Шилин, 2003].

Строительство защитных сооружений г. Санкт-Петербурга от наводнений началось в 1979 г и завершилось в 2011 г, но, тем не менее, геоэкологический мониторинг этой ПТС выполняется до сих пор. С использованием концептуальной модели прибрежной ПТС исследователями успешно отслеживаются экологические последствия от ввода в эксплуатацию техногенных объектов, особое внимание уделяется их социально-экономической значимости [Михайленко, 2015; Полищук, Другачук, 2021]. Строительство Усть-Лужского портового комплекса осуществлялось в период 2000-2015 гг., на сегодняшний день он выполняет функцию крупного транспортного узла для обеспечения российского грузопотока в Балтийском регионе, на всех этапах его развития

исследователями уделялось особое внимание уязвимости геосистемы к воздействию гидротехнических портостроительных работ и дноуглублению [Мамаева и др., 2016; Царькова, 2016]. При проектировании и строительстве портового комплекса Сабетта широко применялись «экологически дружелюбные» технологии [Шилин и др., 2010; Веденский, 2017; Хренов, 2018] позволяющие минимизировать негативные экологические последствия строительства и дноуглубления для прибрежно-морских экосистем. Еще на этапе проектирования ПТС исследователи сталкиваются со сложной сетью налаженного взаимодействия между компонентами геосистемы, их главная задача – минимизировать нарушение существующего равновесия после ввода в эксплуатацию технических объектов, поэтому каждый этап развития ПТС должен сопровождаться геоэкологическим мониторингом. Примечательно, что концепция прибрежных ПТС широко применяется к создаваемым с нуля ПТС, но в научной литературе не встречаются примеров ее использования при изучении исторически сложившихся ПТС в прибрежной зоне.

### *1.2.2. Исторические сложившиеся ПТС*

Любая ПТС начинает свою жизнь с момента подготовительных работ на месте строительства. После ввода в эксплуатацию к воздействию на окружающую среду кроме самой технической системы как таковой (давление строения на грунт, преобразование ландшафта и т.д.) добавляются продукты ее функционирования (выбросы в атмосферу, гидросферу, загрязнение литосферы отходами производства). После остановки эксплуатации технической системы ее влияние на окружающую природную среду ослабевает, но не прекращается. Влияние заканчивается после ликвидации технической системы и прекращения действия последствий ее функционирования [Шарапов, 2012; Исаев 2016].

Современное понимание термина «техносфера» предполагает, что эта часть биосферы начала формироваться в период промышленной революции XVIII–XIX вв. Но при этом принято считать, что первые ПТС возникли с началом систематического использования человеком самых простых орудий труда и с

этого момента естественные экосистемы начали постепенно замещаться целенаправленно созданными системами, включающими техногенные объекты – жилища, плотины, примитивные производственные объекты. Поэтому для совокупного обозначения техногенно трансформированных участков, существовавших в предшествующие исторические эпохи, существует термин «прототехносфера» [Суздалева, 2016].

Таким образом, если формирование ПТС началось до периода промышленной революции XVIII–XIX, то ее можно характеризовать как исторически сложившуюся. У такой ПТС компоненты техногенной подсистемы представлены историческими сооружениями (отдельные сооружения, памятники архитектуры, города, порты и т.д.) [Бондарик, Ярг, 2015; Пендин, Невеча, 2016]. Применительно к прибрежным ПТС понятие исторически-сложившейся системы подходит для характеристики портовых комплексов и гидротехнических объектов, введенных в эксплуатацию до XVIII века и функционирующих в настоящие дни. В качестве примера таких ПТС можно выделить портовые комплексы на Балтийском побережье, их строительство началось задолго до развития теории систем: порт Балтийск (Россия, ранее – Пилау, которому и посвящена настоящая диссертационная работа), Клайпедский порт (Литва), порт Свиноустье (Польша), порты Травемюнде и Ванемюнде (Германия) [Kondrat et al., 2021; Musielak et al., 1995].

Учитывая отсутствие специальной строительной техники в прошлом, при развитии и поддержании стабильности портовых ПТС гидротехникам приходилось поэтапно усовершенствовать старые и вводить новые компоненты техногенной подсистемы, модернизация или строительство могли затянуться на десятилетия и компоненты природной подсистемы успевали подстроиться под растущее антропогенное воздействие - ПТС коэволюционировала [Бондарик, 2004]. На современном этапе развития прибрежной техносферы при постоянно растущими потребностями общества, исторически-сложившиеся ПТС могут не справляться со своими основными функциями. Например, с появлением

крупнотоннажного флота и ростом грузооборота акватории исторических портов и подходные каналы к ним необходимо углублять, причальные сооружения модернизировать.

На практике существует ряд примеров неожиданных последствий по модернизации исторических ПТС в прибрежной зоне. Углубление фарватера морского канала Клайпедского порта и модификация его северного и южного молов в 2002 г изменили лито-динамическое равновесие в районе прохода в канал, в результате чего усилилась абразия морского берега [Žilinskas et al., 2020; Grinfeldt, 2021]. Модификация оградительных молов в г. Пионерский спровоцировало нарушение вдольберегового равновесия - активизировалась абразия берега, для компенсации которой гидротехникам пришлось возвести гряду бун [Михневич, Лосева, 2019; Зеняускайте, 2020].

Для применения концептуальной модели М.Б. Шилина к исторически сложившимся прибрежным ПТС не обойтись без учета этапности их коэволюции. Не соблюдая это требование, исследователь рискует допустить ошибку еще на этапах проектирования модификаций, в худшем случае система будет дестабилизирована и не сможет выполнять свою основную функцию. Развиваемая в диссертации концепция объединяет основные положения теории прибрежных ПТС [Шилин, 2006] с понятием исторически-сформированной ПТС [Бондарик, 2004; Пендин, Невеча, 2016]. С помощью этой комбинации возможно охарактеризовать этапность коэволюции исторически сложившейся прибрежной ПТС для более точного прогнозирования ее дальнейшего развития. Данный подход позволяет учесть исторически-сформировавшиеся в период развития ПТС системные связи.

Учитывая необходимость модернизации КМК, данная диссертационная работа ставит целью определить системообразующие компоненты природно-технической системы входного участка КМК, факторы развития, связи с гидро-лито-динамической обстановкой, оценить ее состояние и предложить варианты оптимизации деятельности по ее преобразованию.

### 1.3. Характеристика района исследования

*Физико-географическая характеристика.* Калининградский морской канал прорыт от устья р. Преголя до Балтийского моря вдоль северного побережья Калининградского залива, акватория канала отделена от основной акватории залива цепью искусственных островов-дамб. В состав входного участка КМК входят: пролив, проход из канала в акваторию Калининградского залива и та часть КМК, которая подвержена морскому влиянию (см. раздел 1.1).

Пролив - это единственная протока, соединяющая Калининградский/Вислинский залив<sup>1</sup> с Гданьским заливом Балтийского моря, его длина около 2 км, ширина 400 м, глубина 11 м (рисунок 1.2) [Лазаренко, Маевский, 1971].

Калининградский/Вислинский залив отделен от моря Балтийской/Вислинской косой, длина косы 55 км. Максимальная глубина залива 5.2 м, средняя 2.6 м, объем котловины 2.3 км<sup>3</sup> [Chubarenko et al., 2012]. Залив имеет вытянутую с юго-запада на северо-восток форму (87 км), площадь водного зеркала 838 км<sup>2</sup> (510 км<sup>2</sup> относятся к Российской части акватории) [Болдырев и др, 2010]

Пролив – это неотъемлемый элемент лагунной экосистемы Калининградского залива, он выполняет ключевую роль в формировании водного, седиментационного, гидрохимического балансов акватории залива, а также важную роль транспортно-логистического коридора для Калининградской области.

---

<sup>1</sup> Залив по гидро-морфологической типизации – это типичная эстуарная лагуна, одна из самых больших береговых лагун Европы [Chubarenko, Margonski, 2008]. На официальных картах северная часть залива, принадлежащая России (56,2 % площади акватории), называется Калининградским заливом, южная (польская) часть – Вислинским заливом. Названия «Калининградский залив» и «Вислинский залив» обычно используются в случаях, когда речь идет о российской или о польской национальных частях залива соответственно. В книге [Кушевски и др., 2014] вводится название «Калининградский/Вислинский залив», которое и будет использовано в работе.

*Метеорологический режим.* В юго-восточной Балтике преобладают ветра западных румбов, на протяжении года, в регионе отмечается преобладание западных и юго-западных ветров со средней скоростью 4.1 м/с (рисунок 1.3) [Бобыкина, Стонт, 2015]. Осенне-зимний период характеризуется преобладанием штормовых ветров со скоростью 10 м/с, средняя продолжительность такого шторма составляет около 3-х суток, но в некоторых случаях длительность сильного шторма достигает 10 дней. Еще реже бывают шторма со скоростью ветра 15-20 м/с и продолжительностью меньше суток. На протяжении любого шторма направление ветра может меняться резко и хаотично, с середины апреля до конца лета наступает так называемое «штормовое затишье», исключением являются теплые южные циклоны, врывающиеся в регион с юго-востока [Бобыкина, Стонт, 2015].

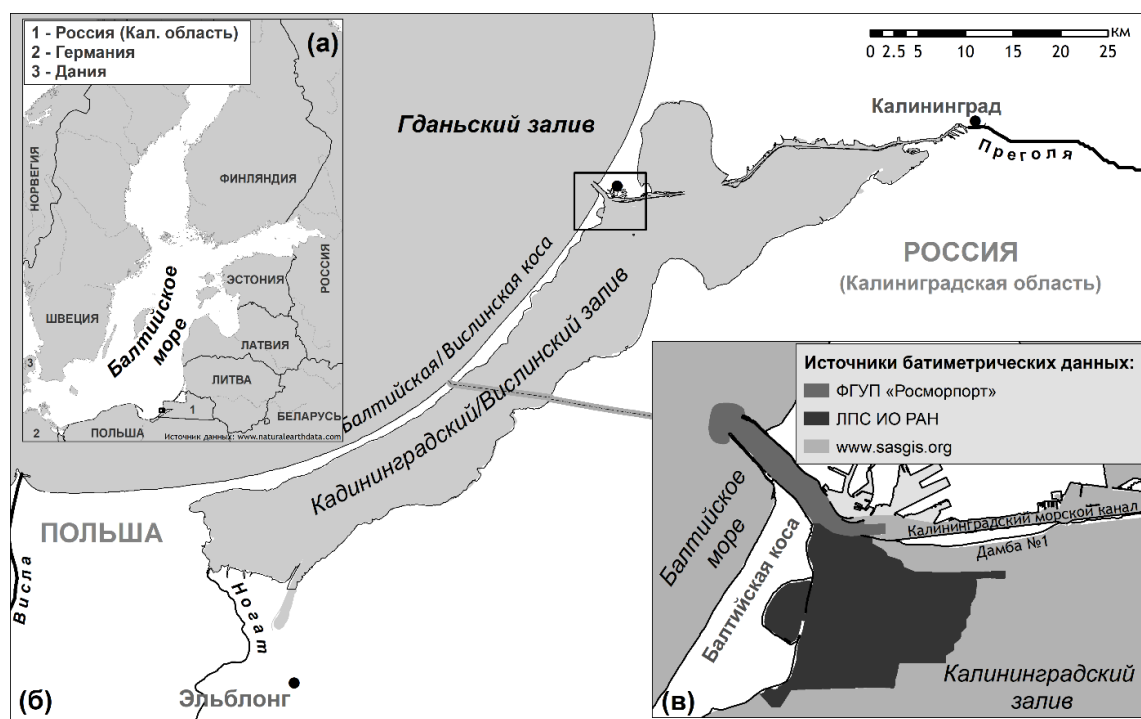


Рисунок 1.2 – Район исследования: (а) юго-восточная часть Балтийского моря; (б) Калининградский/Вислинский залив; (в) район входного участка Калининградского морского канала (схема покрытия батиметрическими данными)



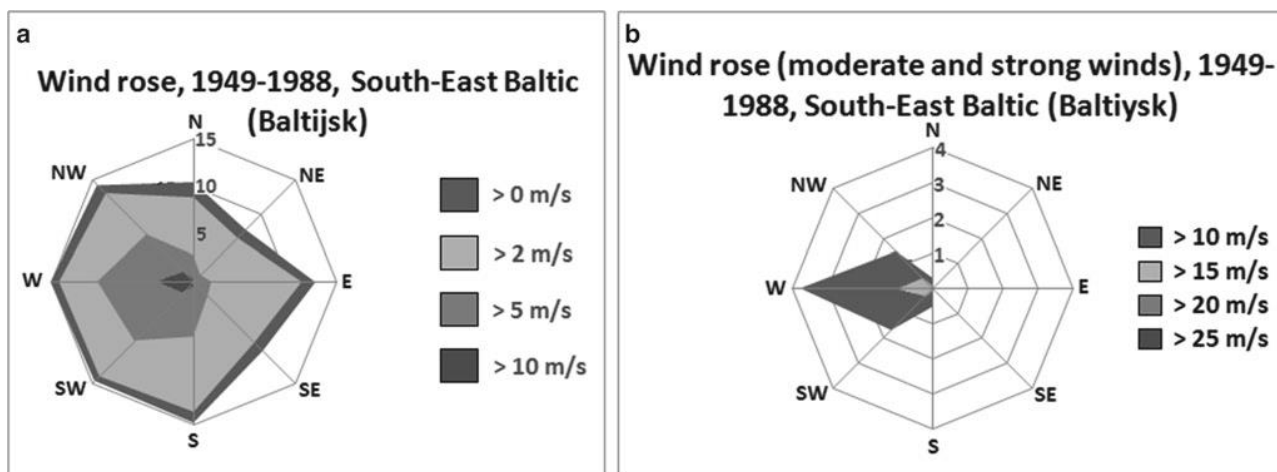


Рисунок 1.3 – Преобладающие направления ветра в юго-восточной части Балтийского моря за 1949-1988 гг. [Chubarenko et. al., 2017]

*Режим течений.* В районе входного участка КМК формируется несколько типов течений, присущих отдельным акваториям. Вдоль побережья прилегающей морской акватории господствуют вдольбереговые течения [Chubarenko, Babakov, 2016], в проливе чередуются входные и выходныe течения, а в заливе течения подчиняются внутренней циркуляции закрытой акватории [Лазаренко, Маевский, 1971; Chubarenko, Chubarenko, 2002].

Калининградский/Вислинский залив, как и любая другая эстуарная лагуна, принимающая речной сток, импульсивно переносит воду в море, события оттока чередуются с событиями затока, поэтому в проливе наблюдается сложная структура течений, характеризующаяся постоянной сменой направлений – на заток или отток и их комбинации [Соловьев, 1999; Chubarenko, Chubarenko, 2002]. По ориентации в разрезе пролива течения делятся на однослойные, двухслойные и двухструйные (рисунок 1.4). По повторяемости течения имеют преимущественно одностороннее направление по глубине и ширине, двухструйные и двухслойные течения формируются только во время перестройки режима течений, связанной с изменением ветрового воздействия или колебаниями уровня моря. Средняя скорость однослойного потока в проливе около 10-40 см/сек, при двухслойном или двухструйном режимах течений скорости небольшие, около 10 - 20 см/сек [Лазаренко, Маевский, 1971].

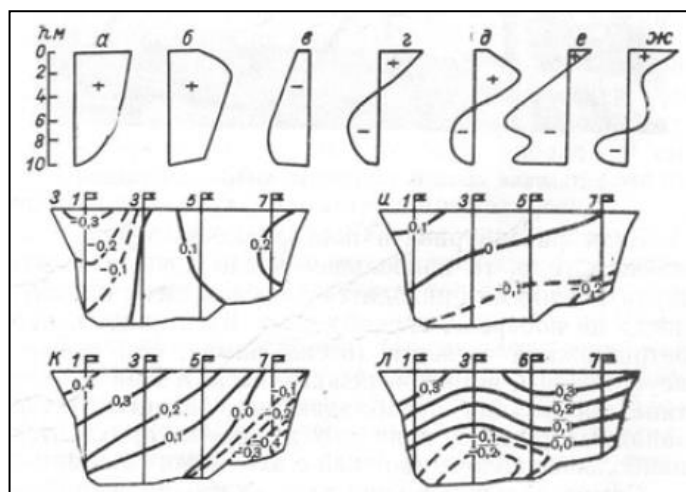


Рисунок 1.4 – Продольные и поперечные схемы течений в проливе входного участка КМК [Лазаренко, Маевский, 1971]

*Водный баланс.* Роль водообмена через пролив возросла после зарегулирования реки Нogat, рукава Вислы, в 1916 г, которое ослабило влияние речного стока на гидрологический режим Калининградского/Вислинского залива [Лазаренко, Маевский, 1971]. Современные оценки водного баланса залива основаны на исследованиях 1951-1965 гг. [Лазаренко, Маевский, 1971], обобщениях данных по речному стоку [Cieśliński, Chlost, 2017] и на результатах численного моделирования [Chubarenko, Chubarenko, 2002; Szydłowski et al., 2019]. С учетом погрешностей и то, что оценки делались в разное время, из моря в залив поступает  $18.1 \text{ км}^3/\text{год}$ , а уходит обратно  $23.7 \text{ км}^3/\text{год}$  (за счет добавления речного стока).

*Эффект аутвеллинга.* В Калининградском/Вислинском заливе функционирует множество антропогенных объектов - источников различных загрязняющих веществ: тяжёлых металлов, нефтепродуктов опасных химических соединений [Богданов и др., 2004; 2020; 2021]. Попадая в залив, они накапливаются в донных отложениях или выносятся в море. Интенсивный водообмен с морем способствует проявлению аутвеллинга (выноса) загрязняющих веществ, снижающего общую антропогенную нагрузку на всю акваторию залива [Chechko, 2002; Александров, Горбунова, 2012; Чечко и др., 2018].

*Транспорт донных наносов.* Морские донные осадки севернее молов в основном представлены хорошо сортированными мелкозернистыми песками, местами среднезернистыми, а южнее молов, напротив абразионного участка берега, от гравийно-галечных размерностей до мелкозернистых песков (рисунок 1.5) [Chechko, 2008]. Вдольбереговыми течениями в прибрежной зоне юго-восточной Балтики обеспечивается перенос песчаного материала (рисунок 1.6) [Белошапков и др, 1984], преимущественно с севера на юг [Бобыкина, Стонт, 2015; Бабаков, 2017]. Ширина вдольберегового потока ограничивается 10 м изобатой, фиксирующей глубину активного влияния волноприбойной зоны, в районе оградительных молов поток удаляется от берега, огибая выдвинутые в море парные молы [Бабаков, Чубаренко, 2019].

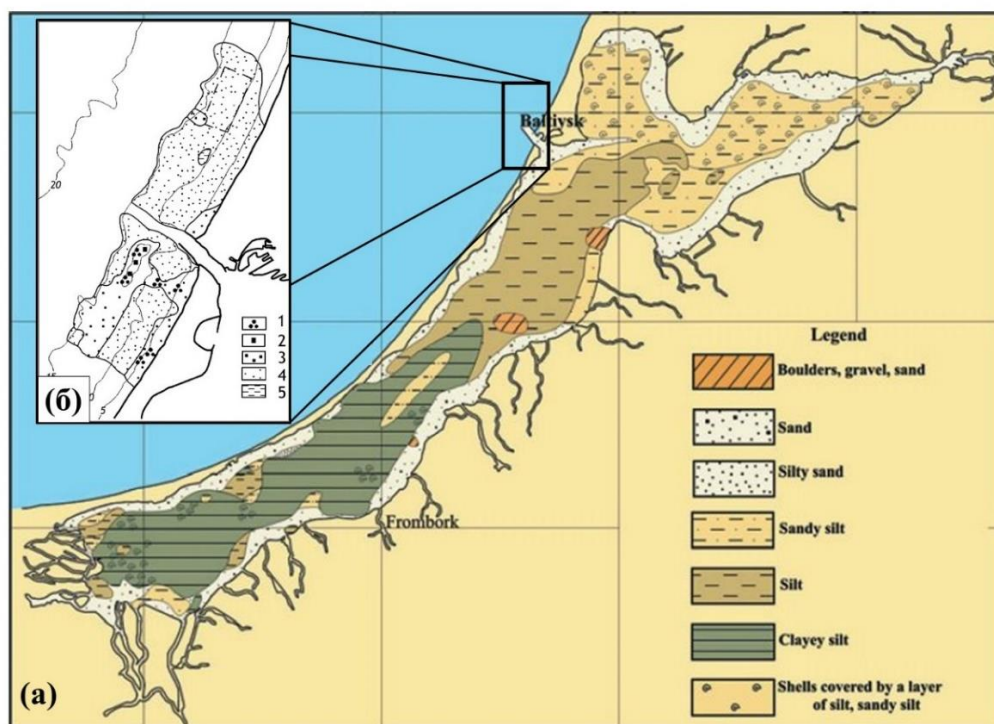


Рисунок 1.5 – Донные осадки в окрестностях входного участка КМК: (а) – распределение донных осадков в акватории Вислинского залива [Chechko, 2008]; (б) – распределение морских донных осадков вблизи входных молов [Чечко и др., 2008]: 1 – гравий, галька; 2 – крупнозернистый песок; 3 – среднезернистый песок; 4 – мелкозернистый песок; 5 - илы

По оценкам [Chechko, Blazhchishin, 2002; Ezhova, Chechko, 2007; Chechko, 2008; Chechko, Chubarenko, 2016] из моря в залив ежегодно заносится в 76.5 тыс. тонн, в их составе 60% биогенной взвеси, а из залива в море выносятся 348.4 тыс. тонн в год, из которых 70% образованы биогенной взвесью. В связи с заносимостью входного участка КМК песчаными наносами в канале регулярно проводится дноуглубление, материал дноуглубления (морской песок, заносимый в канал) вывозиться на морской отвал, расположенный в акватории Балтийского моря севернее молов. Поступление морского песка в залив подпитывает образовавшуюся на его входе (за пределами канала) песчаную отмель [Закиров и др., 2021], сложенную преимущественно материалом морского происхождения [Chechko, 2008].

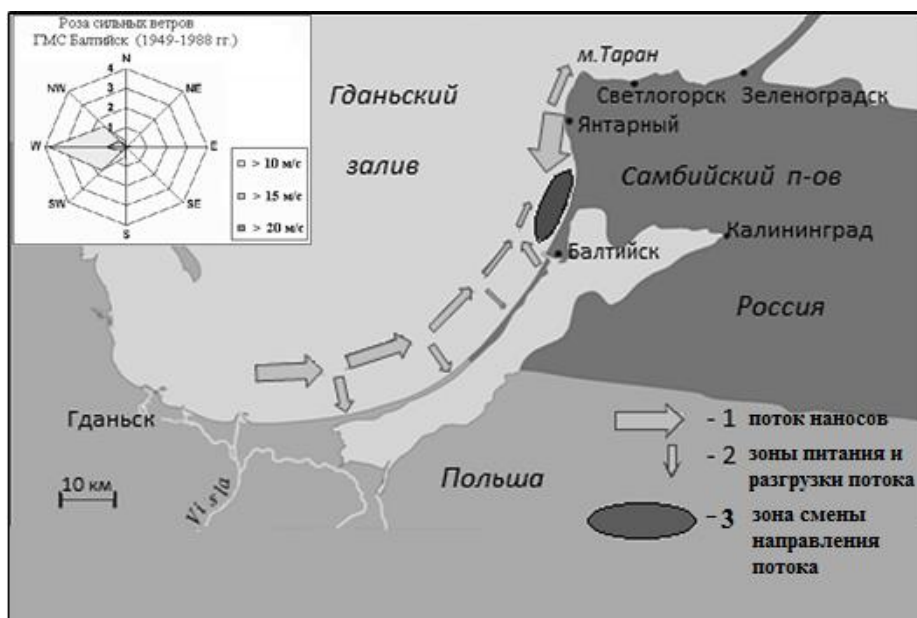


Рисунок 1.6 – Транспорт донных наносов вдоль восточного побережья Гданьского залива [Chubarenko, Babakov, 2016]

*Биологическая активность.* Через пролив происходит миграция представителей ихтиофауны, зоопланктона и зообентоса [Науменко, 2009]. В связи с важным промысловым значением Калининградского залива, здесь соблюдаются периодические нерестовые ограничения [Науменко и др, 2012]. Повышенная активность зообентоса в районе входного участка КМК определяется гидрогеохимическими показателями морских вод [Кочешкова,

2017]. Из-за активной седиментации и непостоянства гидрохимических характеристик донная растительность здесь развита слабо.

*Антропогенные факторы.* Калининградский морской канал выполняет важную социально-экономическую функцию – связывает порт Калининград с Балтийским морем, а также грузо–пассажирский портовый терминал «Балтийск – Усть-Луга», военные гавани и все причальные комплексы, расположенные в пределах КМК. Побережье входного участка КМК полностью обустроено берегоукрепительными сооружениями, с морской стороны до 10 м глубин выдвинуты два входных мола, со стороны акватории залива находятся причалы паромной переправы Балтийск – Коса. Территория суши, прилегающая к входному участку КМК, обладает значительным рекреационным потенциалом - вдоль побережья организована прогулочная пешеходная зона с широким обзором морских пейзажей, а на Балтийской косе планируется создание природного парка.

#### **1.4. Исходные данные и методы**

В работе отсутствует единая методическая глава, т.к. выполнение одной задачи сопровождалось широким набором методов, поэтому методическое описание было разбито по разделам. В данном разделе приводится описание литературных и картографических источников данных, методов обработки и анализа, обоснование применения концепции ПТС.

История хозяйственного освоения пролива изучалась по литературным данным [Басс, 2006, 2007; Балтийская коса..., 2009; Басс, Жиндарев, 2011; Довыденко, 2011, 2016]. Информация о динамике береговой линии за современный период времени (1924-2021 гг.) получена картографическими методами с использованием следующих материалов (рисунок 1.7):

- карта Пиллау 1924 г. масштаб 1:16 000 (Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft 7. Bd – 1924);
- ряд аэрофотоснимков в 1938 г. ([www.luftfoto.ru](http://www.luftfoto.ru));
- спутниковые снимки сервиса Яндекс за 2021 г.

Привязка, оцифровка и анализ выполнялись в программных пакетах ГИС Esri ArcGIS 10.0, карты 1924 г. и ряд аэрофотоснимков 1938 г. привязывались к спутниковой основе 2021 г., в качестве опорных точек выступали здания с гидросооружениями, метод привязки – полином 1-го порядка (аффинное преобразование) по 3-м опорным точкам, точность привязки  $\pm 10$  м.м

В основу изучения функциональных свойств ПТС легли монография [Лазаренко и Маевский, 1971] и цикл публикаций сотрудников лаборатории прибрежных систем АО ИОРАН им. П. П. Ширшова (Чубаренко Б.В., Болдырев В.Л., Бабаков А.Н., Чечко В.А., Бобыкина В. П., и др.) начиная с 1998 г.



Рисунок 1.7 – Схема привязанных картографических материалов: (а) – карта Пиллау 1924 г.; (б) – ряд аэрофотоснимков в 1938 г. ([www.luftfoto.ru](http://www.luftfoto.ru)); (в) – спутниковый снимок сервиса «Яндекс» за 2021 г

### 1.5. Этапы коэволюции природной и техногенной подсистем

Входной участок КМК можно отнести к ПТС т.к. он представляет собой совокупность природных и техногенных объектов, находящихся во взаимосвязи начиная с XVII века. В результате сложилась именно система, обладающая собственной (отличной от ее элементов) характеристикой – обеспечение транспортной доступности современной емкости. Её особенность заключается в регуляторной функции для экосистемы всего Калининградского залива – она регулирует энерго- и массообмен между заливом и морем.

ПТС входного участка КМК формировалась с 1510 г путем поэтапного введения в эксплуатацию техногенных объектов. Строительство одних только молов длилось больше 100 лет, поэтому между этапами хозяйственного освоения компоненты природной подсистемы успевали подстроиться под растущее антропогенное воздействие, таким образом, ПТС коэволюционировала.

#### *1.5.1. Первый этап (1510-1767 гг.) – закрепление пролива*

В 1510 г. после прорыва участка Балтийской косы сильным штормом в исследуемом районе образовался шестой по счету пролив (рисунок 1.8) [Басс, 2007]. Естественная протока изначально была достаточно широкой, но мелководной (глубиной около 3 м), со стороны моря здесь регулярно возникали песчаные банки, поэтому с первой половины XVI в. начались берегоукрепительные и дноуглубительные работы. В период между 1510-1767 гг. проводилось сужение пролива, с помощью этого приема гидротехникам удалось добиться стабилизации промывного режима течений в проливе, в результате его глубина естественным образом увеличилась с 3 до 7 м [Басс, 2007; Довыденко, 2011].

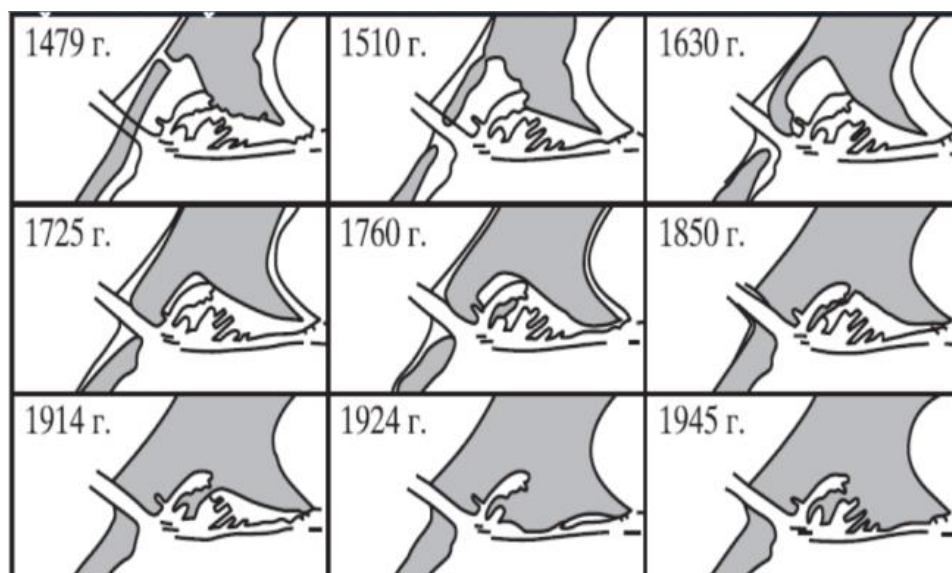


Рисунок 1.8 – Эволюция береговой линии Балтийской косы начиная с 1479 г [Басс, 2007]

### *1.5.2. Второй этап (1768-1887 гг.) – строительство входных молов*

С ростом глубины пролива, с его морской стороны стали образовываться песчаные банки, поэтому для защиты прохода от заносимости в 1768 г. началось строительство южного мола, а в 1840 г. – северного [Басс, 2007; Довыденко, 2016]. В XIX в. молы многократно реконструировались, и только в 1887 гг. реконструкция по удлинению молов завершилась, придав им современный вид.

Строительство молов привело к изменению вдольберегового поля течений и нарушению литодинамического равновесия морского берега. Между морскими оконечностями молов, после их строительства, образовалась эрозионная котловина, на навигационных картах она стала отмечаться сразу после строительства молов, с тех пор её глубина монотонно увеличивается [Закиров и др., 2018]. Севернее молов активизировалась аккумуляция песчаного материала, южнее, напротив, усилилась береговая абразия [Басс, 2006; Бурнашев, 2011]. Для замедления абразии гидротехники возвели гряду бун, а в корне южного мола берег дополнительно укрепили бетонной стенкой и каменной грядой [Басс, Жиндарев, 2011; Довыденко, 2011].

### *1.5.3. Третий этап (1768-1887 гг.) – введение Морского канала*

На следующем этапе развития ПТС в эксплуатацию были введены Морской канал и портовая инфраструктура. Строительство Кёнигсбергского морского канала велось с 1889 г по 1901 г. Его акватория была отделена от залива цепью искусственных островов-дамб, служивших местами складирования грунта извлеченного в процессе дноуглубления, между дамбами были оставлены проходы для прохода маломерных судов, глубина фарватера канала была увеличена до 9 м [Басс, 2007; Довыденко, 2011]. Затем, между 1924 и 1938 гг. велись масштабные работы по развитию внутренней портовой и военной инфраструктуры – намыта искусственная территория под строительство аэродрома и Гидрогавани, укреплены дополнительные участки берега, возведены новые причальные сооружения.



В период развития внутренней портовой инфраструктуры Морской канал был углублен до 9 м, что существенно повлияло на темпы заносимости, поэтому для поддержания работоспособности морского прохода в проливе стали регулярно проводиться дноуглубительные работы. Считается, что в этот же период на примыкающем участке акватории залива активизировался рост песчаной отмели [Чечко, 2008; Закиров, Чубаренко, 2019].

#### *1.5.4. Четвертый (с 1938 г – наши дни) – современный этап развития*

Четвертый этап формирования ПТС условно начинается с 1938 г. С этого времени развиваются КМК и его инфраструктура (реконструкция входных молов без изменения конфигурации, портовые терминалы и внутренние гавани, подходы к ним), остальные элементы техногенной подсистемы в этот период не использовались по назначению (судоходная зона в заливе, Гидрогавань). Входные молы Гидрогавани находятся в аварийном состоянии, буны на морском побережье косы (перед южным молотом) до 1970 г функционировали устойчиво и надежно [Басс, 2007], но к настоящему времени они полностью разрушены. После 1970 г входные молы неоднократно ремонтировались, их основание укреплялось тетраподными блоками, проезжая часть расширялась. Глубина Морского канала в 2005 г была доведена до отметки 10.5 м, гавани на северном побережье от г. Балтийска до Приморской бухты вновь реконструированы, в 2006 г фарватер канала на повороте был частично расширен за счет крутизны откоса [Басс, 2007].

По сопоставлению береговой линии с 1938 г по 2021 г, берег на абразионном участке (в корне южного мола) отступил примерно на 100 м, а площадь размытой суши составила 150 000 м<sup>2</sup> [Закиров, Чубаренко, 2022], однако на 5-ти километровом удалении от мола отступление уже фактически не проявляется [Бобыкина, Карманов, 2009]. Песчаная отмель с заливной стороны в настоящее время практически полностью преграждает проход из канала в акваторию залива. Проходные глубины составляют 1.5–2 м в зависимости от уровня воды в заливе. Эрозионная депрессия с морской стороны пролива

монотонно увеличивает свои размеры, растет ее глубина, достигая в настоящий момент 31 м [Закиров и др., 2018; Закиров, Чубаренко, 2019].

Таким образом, по совокупности природных и техногенных признаков в развитии ПТС выделено четыре этапа коэволюции природной и техногенной подсистем, в ходе которых вводимые техногенные преобразования вызывали отклик и подстройку природной подсистемы, которые, в свою очередь, создавали проблемные условия, частично вызывающие новые техногенные изменения на следующем этапе.

## **1.6. Современное состояние ПТС входного участка КМК**

Для оценки современного состояния ПТС в ее структуре выделены компоненты природной и техногенной подсистем, управляющая компонента, определены границы зон взаимного влияния природной и техногенной подсистем.

Для структуры ПТС характерна трехуровневая организация (рисунок 1.9). На первом уровне система включает природную и техногенную подсистемы, разделенные на компоненты, в их составе выделены элементарные единицы: природные и техногенные подсистемы и объекты, хозяйственная деятельность и др. (рисунок 1.9). Все элементы системы участвуют в гидро- и литодинамических процессах, активность которых в свою очередь лимитирована техногенными объектами и производственной деятельностью.

### *1.6.1. Состав ПТС*

**Природная подсистема** включает абиотические и биотические компоненты (рисунок 1.9). В группу **абиотических компонентов** входят водные массы, подводный рельеф, морской и заливный берег: акватория пролива, Калининградского залива, Балтийского моря и внутреннего участка КМК. Берег подразделен на морской и заливный. Донный рельеф представлен морским подводным склоном, включая морской отвал и эрозионную депрессию между морскими молами, песчаной отмелью в заливе и зонами дноуглубления в акватории КМК.

**Биотические компоненты** (рисунок 1.9): микроорганизмы, зообентос, фитобентос, ихтиофауна (гидробионты) по отношению к гидро- и литодинамическим процессам существенно менее значимы для ПТС (активность зообентоса, передвижение ихтиофауны) – они подстраиваются под изменения в системе [Новиков, 1979; Александров и др., 2009]. Вблизи пролива концентрации биогенов минимальны из-за разбавляющего влияния морских вод [Александров, Горбунова, 2012], а численность полихет не зависит от свойств донных осадков [Кочешкова, 2017].

**Совокупность производственных объектов** (рисунок 1.9) обеспечивает берегозащитные функции: морские молы, гидросооружения входного участка КМК и Гидрогавани. Подводный морской отвал для дампинга материала дноуглубления тоже отнесен к производственным объектам.

По характеру взаимодействия с водным потоком в составе берегозащитных сооружений различают сооружения активного и пассивного типа [Кнапс, 1952, 1965, 1979, 1982; Левкевич, 2019]: первые напрямую взаимодействуют с водным потоком, направляют его, а сооружения пассивного типа противостоят водному потоку, снижая его энергию. К берегозащитным объектам ПТС, функциональное назначение которых – защита фарватера КМК и внутренних гаваней от воздействия стороны Балтийского моря и акватории Калининградского залива, отнесены сооружения активного и пассивного типов: выдвинутые в море парные входные молы, ограждающие внутренние гавани молы, шпоры и дамбы, укрепленные участки берега. Наиболее существенное влияние на гидро-литодинамические процессы оказывают выдвинутые в море парные молы (активные гидросооружения), они прикрывают вход в пролив от вдольберегового потока наносов и обеспечивают стабильность прохода судов через пролив.

В группе **производственных процессов** выделены: дноуглубление, дампинг, торгово-рыболовное судоходство, военно-морская деятельность (рисунок 1.9). Самое существенное воздействие на гидро-литодинамические процессы оказывает: дноуглубление, в меньшей степени дампинг, тогда как

судоходство существенного влияния на баланс массо- и энергообмена в проливе не оказывают.

Дноуглубление выполняет функцию управления системными процессами и выступает фактором обратной связи, без которой были бы невозможны процессы саморегулирования, самоорганизации, адаптации и общего развития ПТС входного участка КМК. В случае его прекращения заносимость усилится, возникнет риск обмеления фарватера канала и, следовательно, ограничение судоходства. Для природной подсистемы обмеление пролива отразится на энерго- и массообмене между заливом и морем, что, в свою очередь, повлияет на экосистемные характеристики акватории Калининградского залива.

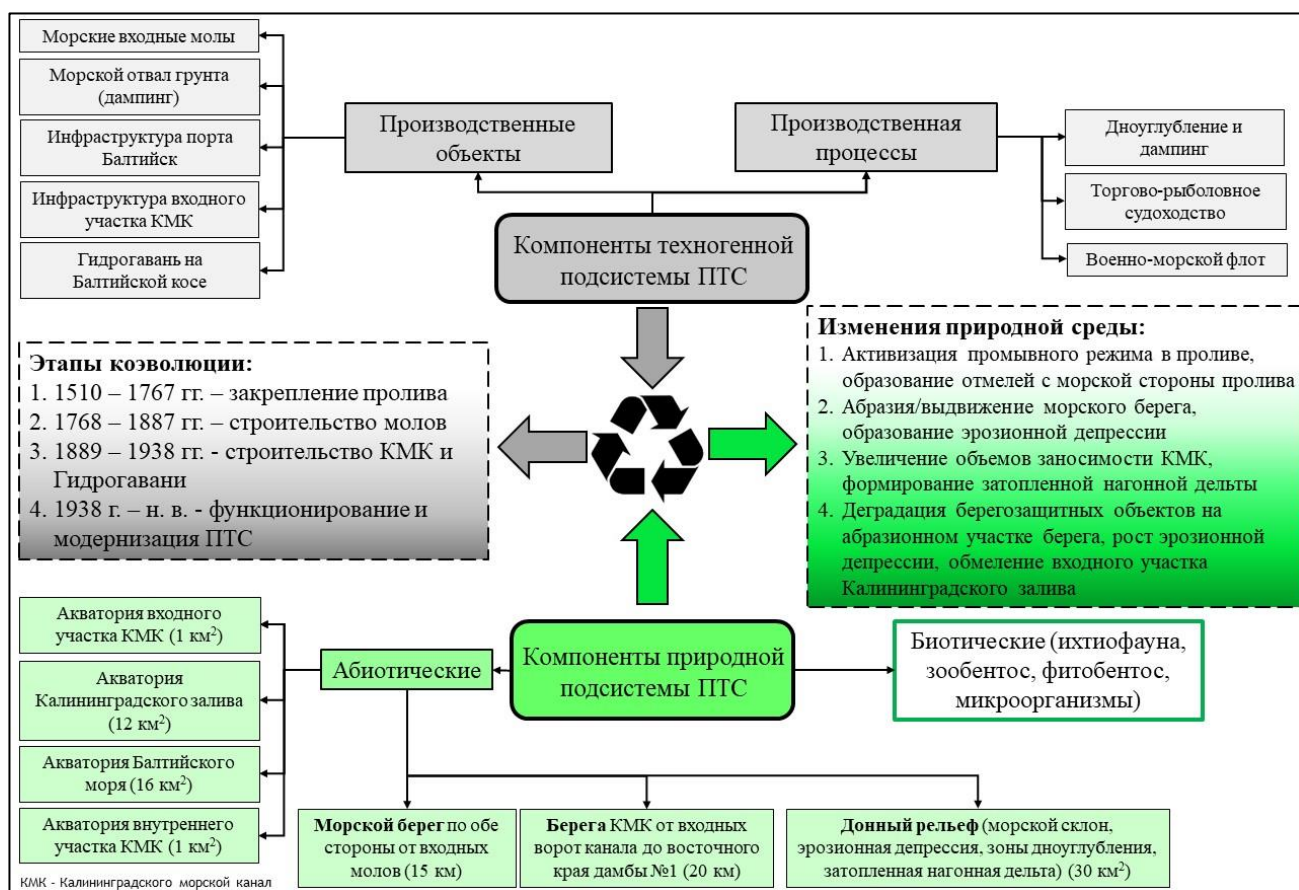


Рисунок 1.9 – Структура и факторы развития природно-технической системы входного участка Калининградского морского канала

### 1.6.2. Границы ПТС в пространстве

**Зоны взаимодействия природной и технической подсистем** определяют пространство и границы ПТС (рисунок 1.10). С морской стороны выдвинутые в море морские молы служат естественными ограничителями вдольбереговому потоку наносов. В качестве зоны влияния ПТС в сторону открытого моря принята ширина вдольберегового потока наносов (до 1.5 км), а участок нарушенного берегового равновесия по обе стороны от входных молов отнесем к вдольбереговому влиянию на юг от молов - 5 км [Болдырев, Бобыкина, 2010; Бобыкина, Карманов, 2009], на север от молов - до 10 км [Бабаков, Чубаренко, 2019]. Общая площадь морской зоны влияния составляет около 16 км<sup>2</sup> (рисунок 1.10).

В зону морского влияния ПТС вошла морская свалка площадью 1.5 км<sup>2</sup> (рисунок 1.10), со среднегодовым объемом дампинга 27 000 м<sup>3</sup>/год [Чечко и др., 2008]. Она характеризуется собственным влиянием на природные компоненты системы, в основном из-за периодического возникновения облака взвеси (4-6 раз в сутки во время сброса материала дноуглубления) и его штормового разноса. Свалка расположена в зоне вдольберегового потока наносов, поэтому сбрасываемый материал распространяется по акватории в зависимости от направлений ветра [Chubarenko et al., 2017; Sokolov, Chubarenko, 2018].

В акватории пролива (1 км<sup>2</sup>), акватории Калининградского залива (12 км<sup>2</sup>) и акватории внутреннего участка Калининградского морского канала (1 км<sup>2</sup>) единственное значимое влияние оказывает заносимость, поэтому границы ПТС логично установить по ареалу морских песчаных наносов в заливе (песчаная отмель) и по зонам активного дноуглубления в канале. Таким образом площадь зоны влияния в акватории залива составляет 14 км<sup>2</sup>.

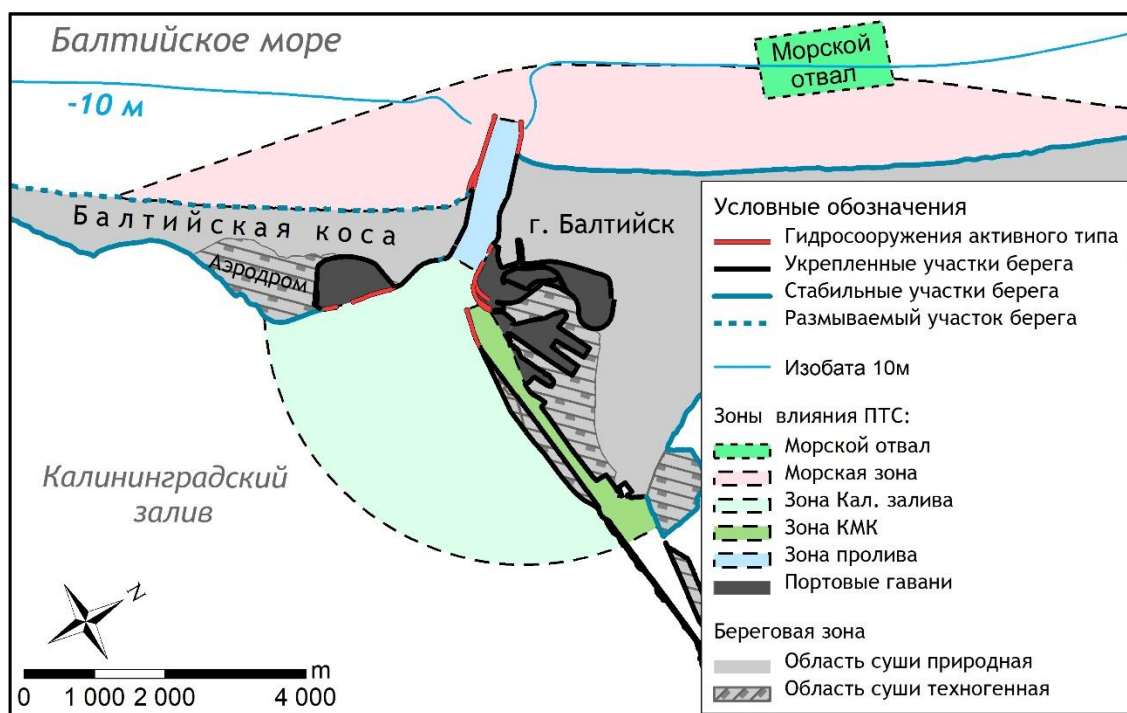


Рисунок 1.10 – Зоны взаимовлияния между компонентами природной и техногенной подсистем входного участка Калининградского морского канала

## 1.7. Выводы

1. ПТС входного участка КМК исторически формировалась с начала XVI в. по XX вв. путем поочередного введения в эксплуатацию гидротехнических объектов ПТС с попеременным нарастанием межсистемных связей между компонентами антропогенной и природной подсистем.

2. По совокупности природных и техногенных признаков в развитии ПТС выделено четыре этапа коэволюции. На первом этапе закрепление берегов пролива (1510-1767 гг.) спровоцировало усиление промывного режима, углубление пролива с 3 до 7 м, образование песчаных банок с морской стороны протоки. На втором этапе строительство входных молов (1768-1887 гг.) нарушило литодинамическое равновесие морского берега, активизировалась береговая абразия южнее молов и аккумуляция севернее; на третьем этапе введены в эксплуатацию Морской канал и Гидрогавань (1889-1938 гг.), гидротехнические сооружения за время третьего этапа приняли современный вид, пролив был искусственно углублен до 9м, в связи с чем усилилась заносимость судоходного

фарватера канала, активизировался рост песчаной отмели в заливе. На четвертом этапе (с 1938 г – наши дни) происходит модернизация ПТС, развиваются инфраструктура Морского канала (входные молы, портовые терминалы и внутренние гавани, подходы к ним). Остальные элементы техногенной подсистемы (судоходная зона в заливе, Гидрогавань) не используются по назначению, проход в акваторию залива преграждает песчаная отмель, а входные молы Гидрогавани пришли в аварийное состояние.

3. В составе ПТС в качестве управляющего фактора выделяется дноуглубление, благодаря которому обеспечивается функционирование КМК и регулируются экосистемные параметры сопредельных акваторий – энерго- и массообмен между заливом и морем.

4. По гидролого-литологическим особенностям района ПТС уточнены зоны взаимодействия природной и техногенной подсистем и их границы: морской – 16 км<sup>2</sup>, заливной – 14 км<sup>2</sup>, общая площадь ПТС входного участка КМК – 30 км<sup>2</sup>.

## **Глава 2. Геоморфологический анализ донного рельефа акватории ПТС**

Донный рельеф в зоне взаимовлияния компонентов природной и техногенной подсистем ПТС формируется при активном техногенном влиянии – наличии гидросооружений активного типа и регулярном дноуглублении [Закиров, Чубаренко, 2022]. На протяжении современного этапа развития ПТС, ее литодинамическая обстановка в зоне влияния Калининградского залива развивалась бесконтрольно, ареал морских песков увеличился в размерах, а песчаная отмель преградила прямой проход из пролива в море [Chechko V.A., Blazhchishin, 2002; Чечко, 2017; Закиров, Чубаренко, 2019]. В данном разделе по морфологическим признакам в районе входного участка КМК выделены зоны осадконакопления, обоснованы механизмы образования песчаной отмели на входе в залив, определены типы донных осадков акватории ПТС.

### **2.1. Исходные данные и методы**

В данной главе реализована методика геоморфологических исследований, основанная на данных натуральных измерений с применением геоинформационных методов анализа. В основу анализа донного рельефа акватории ПТС легли батиметрические данные из различных источников (см. рисунок 1.2б):

- Данные промеров однолучевым эхолотом на входе в Калининградский залив за 2012 г, междугалсовое расстояние 100 м, формат данных «XYZ-файл», предоставлены сотрудниками ЛПС АОИОРАН [Домнин, 2012].
- Данные контрольного промера глубин на входе в Калининградский залив, полученные автором в 2019 г, измерения проводились однолучевым эхолотом.
- Данные многолучевых измерений на входном участке КМК за период 2008-2016 гг., размер ячейки сетки глубин 0.5/0.5 м., предоставлены коллегами из отдела контроля глубин ФГУП «Росморпорт» в формате планшетов PDF. Оцифровка планшетов выполнялась в программном пакете ГИС Esri ArcGIS 10.0.



- Батиметрические данные для акваторий Калининградского залива и Балтийского моря получены с использованием инструментов открытой геоинформационной системы SAS.Planet ([www.sasgis.org](http://www.sasgis.org)) и доступных в ней морских электронных карт по акватории Вислинского залива и Гданьского бассейна Балтийского моря.
- Батиметрические данные многолучевого измерения НИС Петров при проходе через КМК в 2021 г были получены из архивных материалов АО ИО РАН [Дорохов, Дорохова, 2021].

Данные предварительно были приведены к Балтийской системе высот, обработка выполнялась в программных пакетах ГИС Esri ArcGIS 10.0. Батиметрические данные совмещены в одном ГИС-проекте и интерполированы в трехмерную поверхность. Геоморфологический анализ донного рельефа акватории ПТС выполнялся с использованием стандартных картографических методов: профилирование и расчет объема, затем, по морфологическим признакам аналогично типовой модели осадконакопления волнового эстуария [Reading, 1978; Hayes, 1979; FitzGerald, Pendleton, 2002; Барабошкин, 2007] были выделены зоны осадконакопления.

Морфодинамика донного рельефа анализировалась по выделенным зонам с использованием программных инструментов ГИС Esri ArcGIS 10.0 и PDS Teledyne 4.4.3.0: профилирование и вычитание поверхностей. По данным многолучевых измерений ФГУП «Росморпорт» за 9-летний период (2008 - 2016 гг.) изучалась динамика эрозионной депрессии и объемы дноуглубления в проливе. Границы дноуглубления были оцифрованы с промерных планшетов (формат PDF) и преобразованы в векторный формат Esri Shapefile для добавления в гис-проект.

По данным однолучевых промеров за 2012 г и 2019 г. изучалась морфодинамика песчаной отмели на входе в залив. Измерения в 2019 г проводились теми же инструментальными средствами и при схожих погодных условиях, как в 2012 г: эхолот Garmin GPS map 421s, маломерное плавсредство,

тихая погода. Работы выполнялись 29 и 30 июня методом параллельных галсов, средняя длина галса 2 км, междугалсовое расстояние 100 м, общая длина промерного трека около 60 км. Данные измерений были привязаны к Балтийской системе высот, затем к высоте была применена поправка на заглубление эхолота. Потом полученные значения экспортированы в XYZ файлы, которые затем преобразованы в грид-модель с ячейкой 50x50м и интерполированы методом ближайшего соседа с коэффициентом интерполяции 150 м. Инструмент вычитания поверхностей в PDS Teledyne 4.4.3.0 работает по принципу вычитания значений ячейки одной поверхности из значений ячейки другой, на выходе получается дифференциальная поверхность: отрицательные значения – эрозия, положительные значения - аккумуляция (рисунок 2.1)

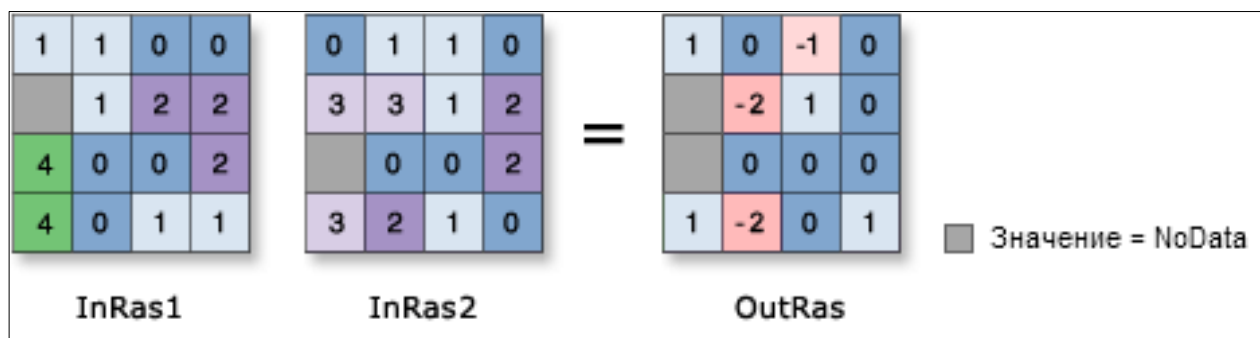


Рисунок 2.1 – Схема «вычитания растров», на выходе получается дифференциальная поверхность [Справка Arc Gis]

*Методы пробоотбора.* Пробоотбор был выполнен в шести точках (B1-6) (рисунок 2.2) одноканатным грейферным ковшом конструкции Ван Вина, работы проводились с малого плавсредства. При касании с грунтом механизм ковша приходит в действие - при поднятии ковша под своим весом он захлопывается. Донный материал вываливался в пластиковый поддон, отложения отбирались в полиэтиленовые пакеты для передачи на лабораторный анализ (рисунок 2.3).

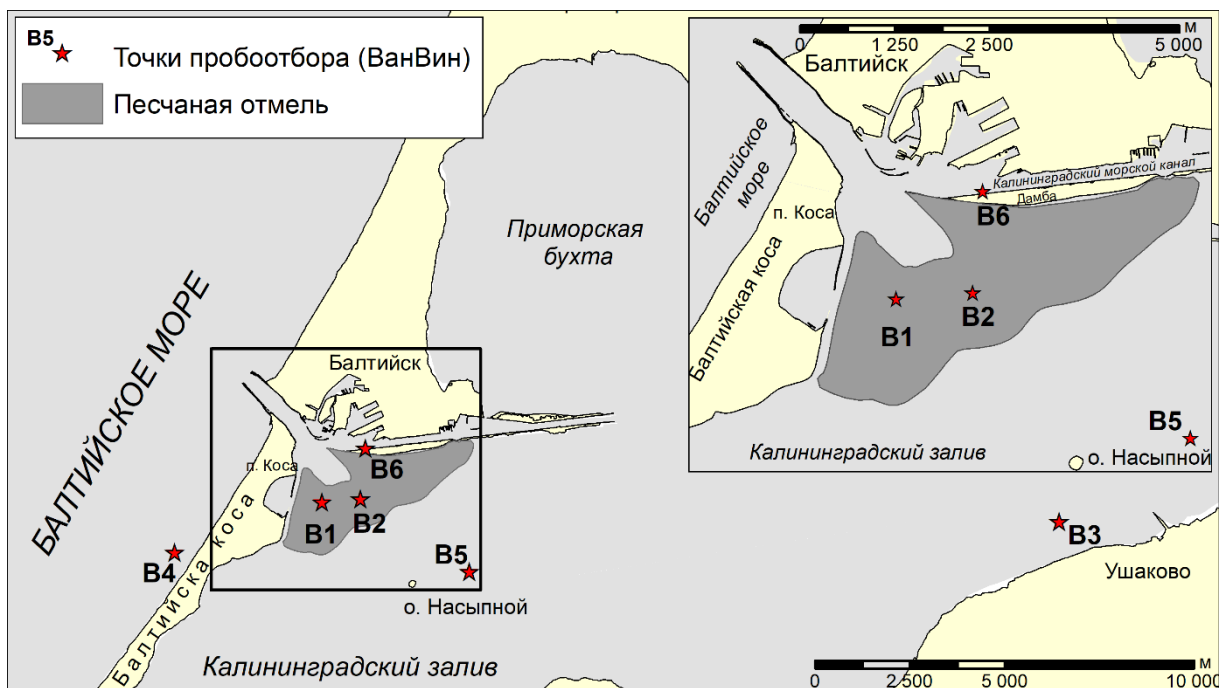


Рисунок 2.2 – Схема пробоотбора



Рисунок 2.3 – Фото рабочего процесса: (а) – Ручной одноканатный грейферный ковш конструкции Ван Вина и пластиковый поддон для грунта; (б) – Рабочий процесс: вываливание грунта из ковша на поддон

*Методы лабораторного анализа.* Лабораторный анализ отобранных осадков проводился на базе ЛПС АО ИОРАН Чечко В. А., гранулометрический состав определялся по массовому содержанию частиц различной крупности (в процентах от массы исследуемого образца) ситовым (фракции  $> 0.04$  мм) и водно-механическим (фракции  $< 0.04$  мм) методами [Буданова и др., 2013]. В соответствии с классификацией Вентворта [Wentworth, 1922], выделены следующие фракции: крупный песок (coarse sand, 1.0-0.5 мм), средний песок

(medium sand, 0.5-0.25 мм), мелкий песок (fine sand, 0.25-0.125 мм), очень мелкий песок (very fine sand, 0.125-0.063 мм), крупный ил (coarse silt, 0.063-0.04 мм), средний и мелкий ил (medium, fine silt, < 0.04 мм).

## 2.2. Геоморфологическая модель седиментационной обстановки

Для характеристики гидро-литодинамической обстановки ПТС входного участка КМК за основу была взята широко применяемая за рубежом классификация обстановок осадконакопления, которая применяется для эстуариев (рисунок 2.4) [Reading, 1978; Hayes, 1979; FitzGerald, Pendleton, 2002]. В отечественной практике эта классификация применяется при разведке или разработке продуктивных залежей осадочных отложений в прибрежно-морской зоне [Барабошкин, 2007; Кравченко, Габова, 2016]. В этой классификации выделяется особый тип эстуариев – приливно/отливный эстуарий с преимущественно волновым режимом водообмена (волновой эстуарий) [Reading, 1978; Барабошкин, 2007]. Данный тип эстуариев формируются в системах «река - лагуна - пролив - море», для него характерно наличие песчаного барьера между лагуной и морем, *протоки* сквозь барьер (пролив), *затопленной приливно/отливной дельты* со стороны лагуны, *центральной части эстуария и внутренней речной дельты*.

Калининградский залив – это бесприливной водоем лагунного типа, где смешиваются морские и пресные воды, поэтому его можно отнести к эстуариям [Reading, 1978; Chubarenko, Margonski, 2008]. Приливно-отливные движения фактически отсутствуют в Балтийском море, но очень развиты нагоны различного генезиса, обеспечивающие приток морских вод в залив и, соответственно, отток этих вод при исчезновении нагонных условий [Chubarenko, Zakirov, 2021]. Вместе с морскими водами в залив заносится морской песок, пройдя пролив он оседает и образует песчаную отмель [Chechko, Blazhchishin, 2002; Чечко, 2017; Закиров, Чубаренко, 2019].

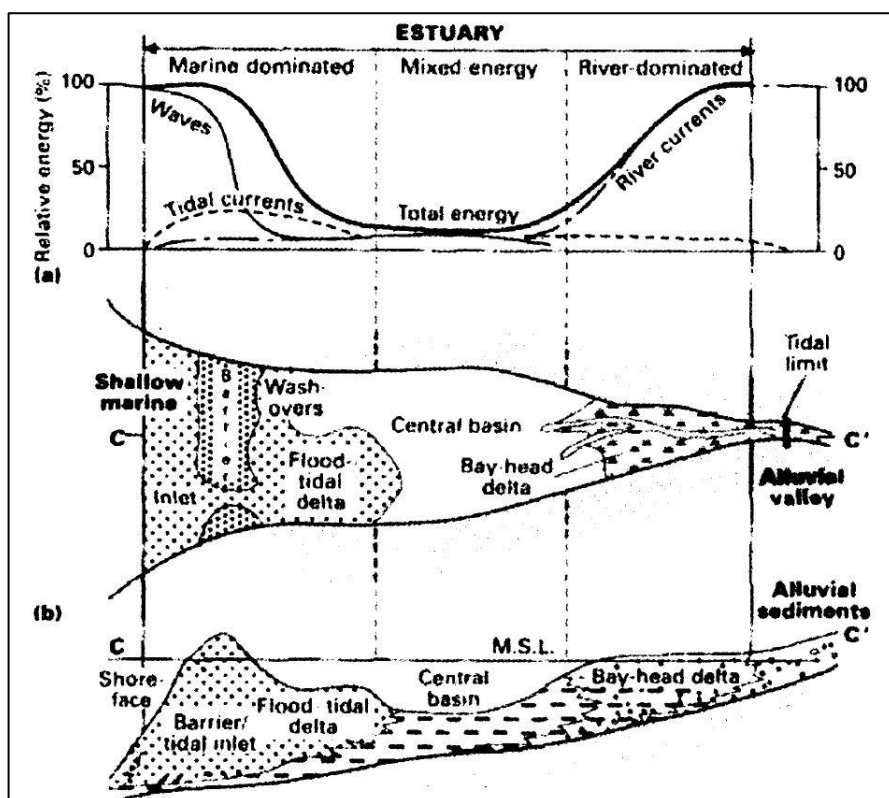


Рисунок 2.4 – Геоморфологическая схема приливно/отливного эстуария с преимущественно волновым режимом воздействия (волновой эстуарий) [Барабошкин, 2007]

Аналогично типовой модели осадконакопления волнового эстуария [Reading et al., 1978] по морфологическим признакам в районе акватории входного участка КМК можно выделить зоны (рисунок 2.5):

- Балтийская коса и пролив - песчаный барьер и проход сквозь него; (с 1938 г – наши дни)
- песчаная отмель на входе в залив – нагонная дельта (по аналогии с приливной);
- Калининградский залив – центральная часть эстуария.

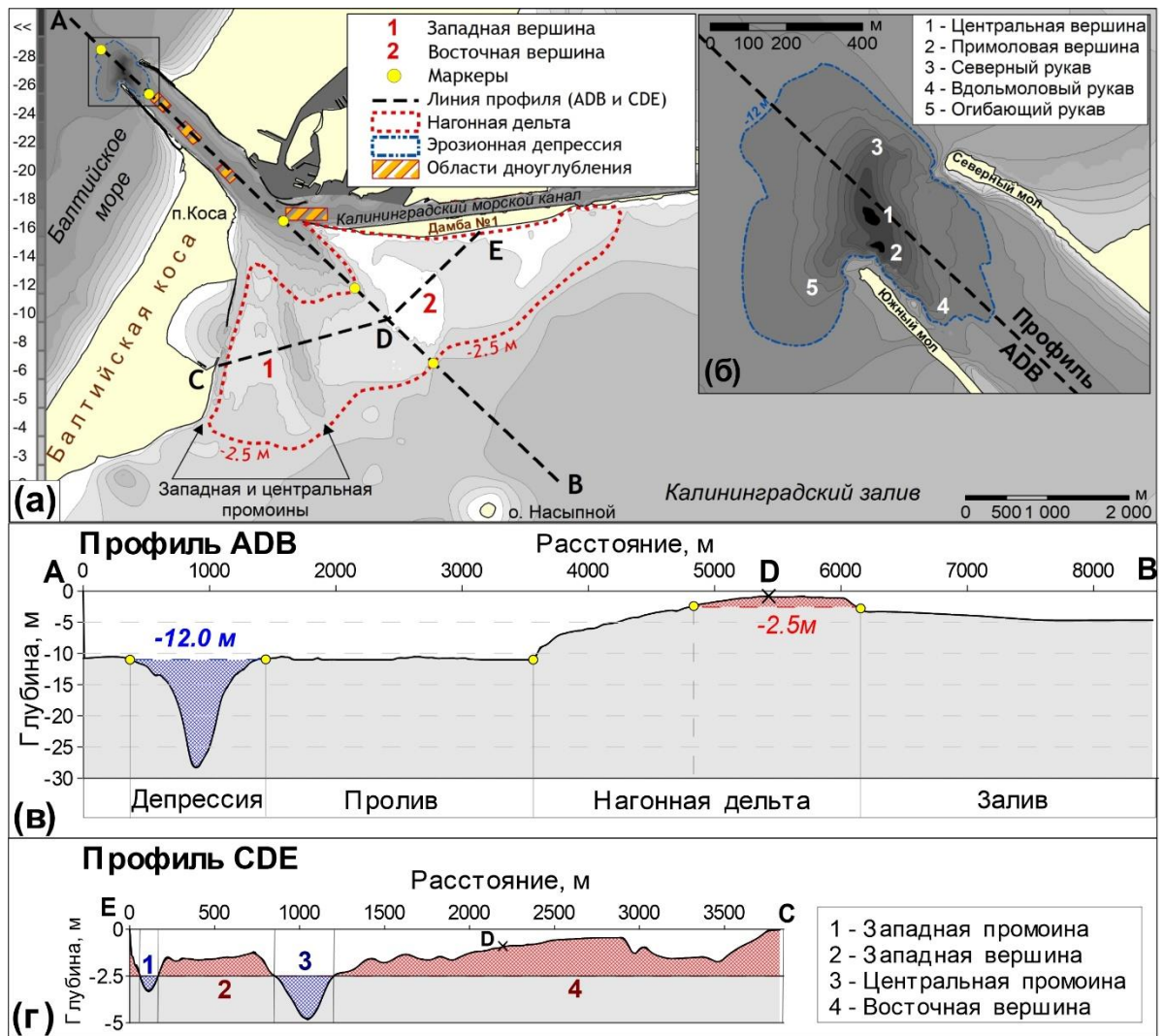


Рисунок 2.5 – Схема морфологического строения донного рельефа акватории ПТС входного участка КМК: (а) – вид в плане всей акватории; (б) – эрозионная депрессия; (в) - профиль ADB и деление акватории ПТС на зоны; (г) - профиль CDE и строение аккумулятивной области нагонной дельты

### 2.3. Эрозионная депрессия

Необходимо отметить, что эрозионная депрессия не попадает под характеристику модели осадконакопления волнового эстуария, но причины образования, размеры и место расположения делают ее неотъемлемой частью ПТС. Природа образования депрессии до конца не ясна, в Российских источниках конца прошлого века доминирует представление о том, что она является типичным морфометрическим образованием, возникающим при взаимодействии вдольберегового потока и выдвинутых в море гидротехнических сооружений. Основатели этой гипотезы использовали ее как один из главных аргументов при

обосновании направленности вдольберегового переноса потоков [Chubarenko, Babakov, 2016; Бабаков, 2017; Бабаков, Чубаренко, 2019].

Известно, что образовалась депрессия сразу после строительства выдвинутых в море оградительных молов в XIII веке (рисунок 2.6) и уже в начале XXI века ее максимальная глубина достигала 28 м, а после реконструкции оконечностей молов в 2006-2008 гг. максимальная глубина увеличилась до 31 м [Chubarenko, Babakov, 2016; Закиров и др., 2018]. Южный мол, являясь гидротехническим сооружением, находится в неблагоприятных условиях, т.к. наличие депрессии создает угрозу устойчивости его морской оконечности.

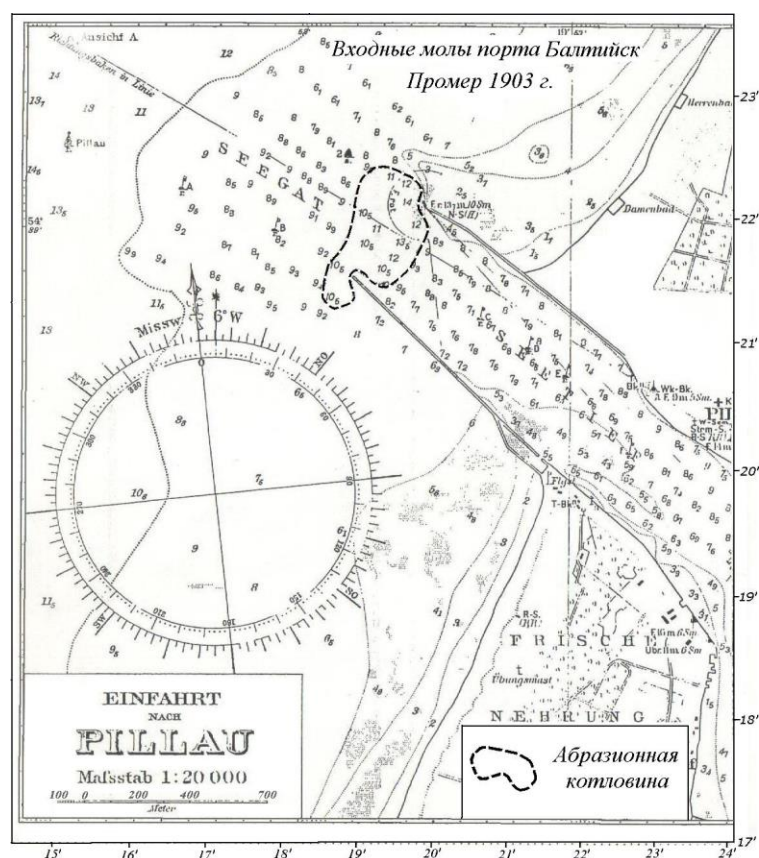


Рисунок 2.6 – Эрозионная депрессия на навигационной карте 1903 г.  
[Chubarenko, Babakov, 2010]

Для геоморфологического анализа эрозионной депрессии, в ее структуре были введены следующие обозначения (рисунок 2.5):

- Очертания депрессии – область, описанная изобатой 12 м

- Эрозионные рукава – естественные каналы размывающих водных потоков, описанные изобатой 16 м
- Вершинная область – область, описанная изобатой 28 м
- Вершина – точка максимальной глубины

Депрессия примыкает к оголовку южного мола, имеет вытянутую форму, ее очертания описываются изобатой 12м (рисунок 2.5). Объем депрессии ниже 12 м изобаты – 1 420 000 м<sup>3</sup>, в структуре депрессии выделено две вершины – **центральная** и **вдольмоловая**, а вокруг них вершинные области. От эрозионных вершин в разных направлениях устремлены три эрозионных рукава: северный, вдольмоловый, огибающий. Северный рукав ориентирован на север, вдольмоловый ориентирован вглубь канала, **огибающий** – примыкает к оголовку южного мола и огибает его.

Объем депрессии рассчитывался ниже изобат -23 м, -25 м, -27 м (рисунок 2.7). За рассматриваемый период он немонотонно возрастал (отклонение от линии тренда составило от (-9%) до 6%). Средний суммарный прирост составил 2450 м<sup>3</sup>/год, процентное изменение объема по отношению к минимально достигнутой за период величине составило до 27 %. В 2008 г. депрессия имела две вершинные области (зоны глубже 28 м): центральную и примоловую, в 2016 г. две области слились в одну – центральную. За 9-летний период депрессия углублялась: глубина центральной вершины немонотонно возрастала (рисунок 2.8), глубина примоловой вершины изменялась скачкообразно, в период 2009 - 2011 гг. отмечалось резкое углубление до 31 м. По результатам сопоставления батиметрических данных на профиле АВ отмечен подмыв основания стенки южного мола, подтверждено слияние вершинных областей и углубление депрессии в области центральной вершины (рисунок 2.9). Анализ динамики глубины на профиле CD показал медленное выполаживание восточного склона депрессии по направлению в залив.



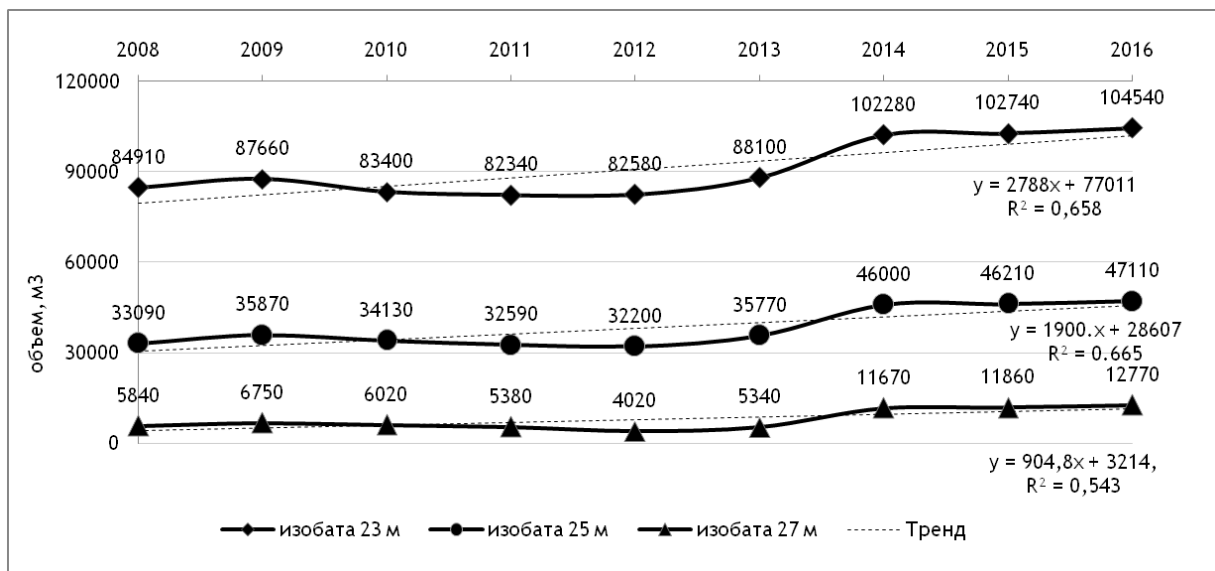


Рисунок 2.7 – Динамика объема (м<sup>3</sup>) эрозионной полости депрессии, описанной изобатами 23м, 25м, 27м за 2008-2016 гг.

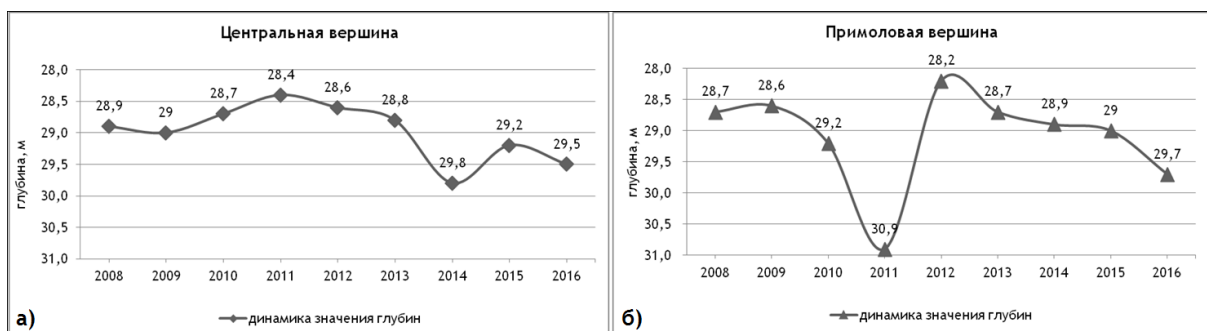


Рисунок 2.8 – Динамика глубины центральной (а) и примоловой (б) вершин за 2008-2016 гг.

Примечательно, что депрессия увеличивается в размерах несмотря на высокую интенсивность заносимости входного участка КМК. В связи с этим предполагается, что эрозионная депрессия поддерживается сильными течениями со стороны северных румбов за счет взаимодействия вдольберегового морского течения и выдвинутых в море оградительных молов [Закиров и др., 2018]. Входные молы, значительно выдаваясь в море, уменьшают сечение вдольберегового потока и способствуют его ускорению при огибании препятствий, таким образом, постоянное взаимодействие препятствий с вдольбереговым потоком формирует турбулентный поток, который препятствует заносимости котловины.

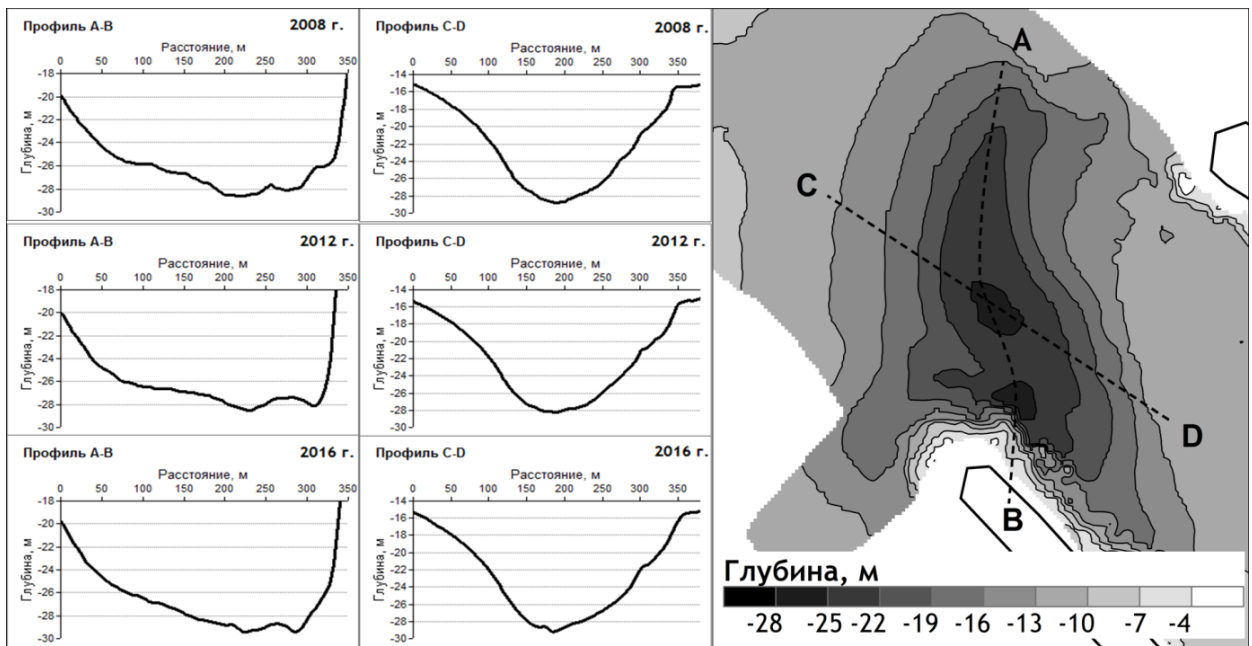


Рисунок 2.9 – Динамика глубины эрозионной депрессии вдоль профиля АВ и CD за 2008-2016 гг.

#### 2.4. Пролив

Песчаный материал, транспортируемый вдоль морского берега Вислинско-Янтарной вогнутости Балтийского побережья, заносится входными течениями в акваторию КМК и частично откладывается в ней. По дну пролива пролегает поле рифелей, которые свидетельствуют об активном движении донных наносов на входном участке КМК, среднее расстояние между пиками около 9 м, перепад высоты между поднятием и понижением около 40 см (рисунок 2.10). На протяжении года поле рифелей не исчезает, меняется только положение гребней, к сожалению, по имеющимся данным трудно выделить движение одного гребня во времени.

В связи с заносимостью пролива морскими наносами, на входном участке КМК регулярно проводятся дноуглубительные работы по поддержанию рабочих глубин (11 м). Объемы дноуглубления за 9-тилетний период представлены в таблице 2.1. По данным ФГУП «Росморпорт» непосредственно на входном участке КМК дноуглубление проводится каждый год, а на внутреннем всего один

раз в 7 лет. Средняя скорость заносимости входного участка КМК за 2008-2016 гг. составила 27000 м<sup>3</sup> в год.

Таблица 2.1 – Объемы дноуглубления на входном участке Калининградского морского канала (по данным ФГУП «Росморпорт»)

Год	Месяц	Объем, м <sup>3</sup>
2008	август	7100
	ноябрь	2050
2009	июль	12540
	октябрь	8800
2010	октябрь	15130
2011	сентябрь	15430
2012	август	63550
2013	июль	26760
2014	ноябрь	17200
2015	октябрь	28980
2016	март	45000

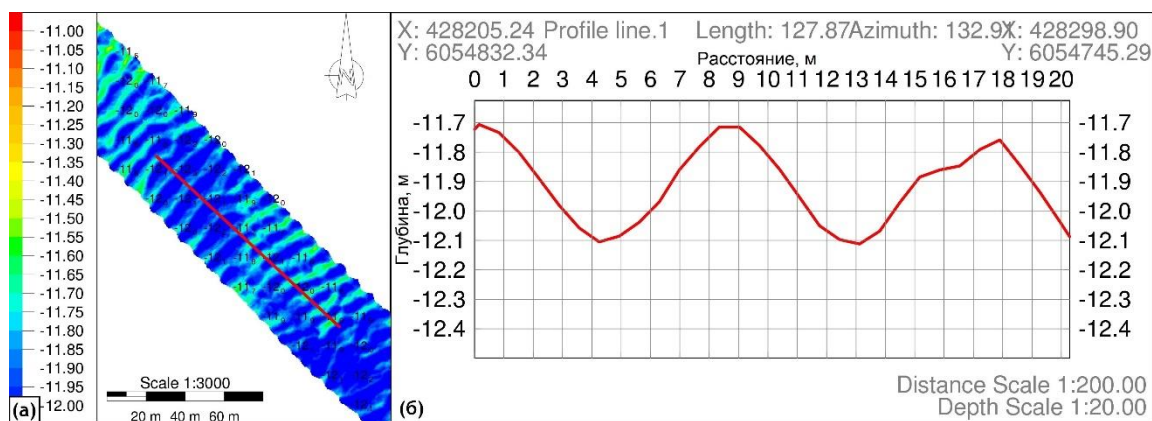


Рисунок 2.10 – Схема донного рельефа в районе поля рифелей по данным многолучевой съемки: (а) вид в плане; (б) вид в профиле [Дорохова, Дорохов, раб. материалы, 2022]

## 2.5. Затопленная нагонная дельта

Аналогично определению приливной дельты [Наyes, 1979], *нагонная дельта* – это отмель, которая формируется в устье протоки (пролива) на стороне лагуны/залива, для ее образования необходимо обязательное наличие вдольберегового потока наносов со стороны мористой части барьера и протоки, соединяющей лагуну/залив с морем. Эти аккумулятивные образования сложены главным образом осадками, которые «перехватываются» (в классическом

варианте - приливно-отливной, а в нашем случае - сгонно-нагонной компонентой движения) проливом из вдольберегового потока наносов, существующего в морской акватории, и затем распределяются в соответствии с гидро-литодинамическими условиями внутри акватории лагуны/залива [Афанасьев и др., 2019]. Другими словами, нагонная дельта в системе движения наносов через акваторию входного участка КМК служит зоной конечного депонирования. В ее морфологической структуре введены следующие обозначения:

- Аккумулятивная область – область выше изобаты 2.5 м
- Эрозионная область – область ниже изобаты 2.5 м
- Мористый склон – морской склон отмели с плавным переходом от глубин КМК к глубинам аккумулятивной области
- Эрозионная промоина – естественный промывной канал пересекающий аккумулятивную область
- Аккумулятивная вершина – отсеченная эрозионной промоиной часть аккумулятивной области

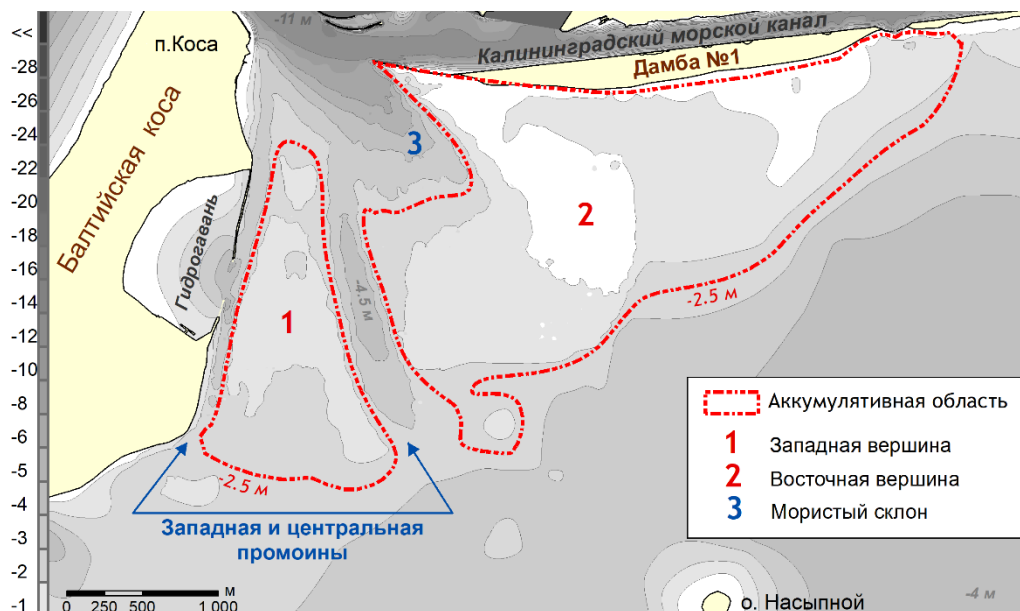


Рисунок 2.11 – Морфологическое строение затопленной нагонной

Затопленная нагонная дельта расположена на входе в Калининградский залив, частично перекрывает прямой судоходный проход из залива в море

(рисунок 2.11). Изобатой 2.5 м в её теле выделена аккумулятивная и эрозионная области, переходный участок дна между аккумулятивной областью и фарватером КМК обозначен как мористый склон нагонной дельты.

Расчетный объем аккумулятивной области (объем выше изобаты 2.5 м) составляет 6 500 000 м<sup>3</sup>, область прорезана естественными промывными каналами: западной и центральной промоинами. Западная промоина ориентирована вдоль берега Балтийской косы и отделяет аккумулятивную область от побережья, ее длина около 2 км, максимальная глубина 5.5 м, средняя - 3 м, ширина 100 м. Центральная промоина разделяет аккумулятивную область на западную и восточную вершины, ее максимальная глубина - 5 м, средняя - 2.8 м, ширина - около 300 м.

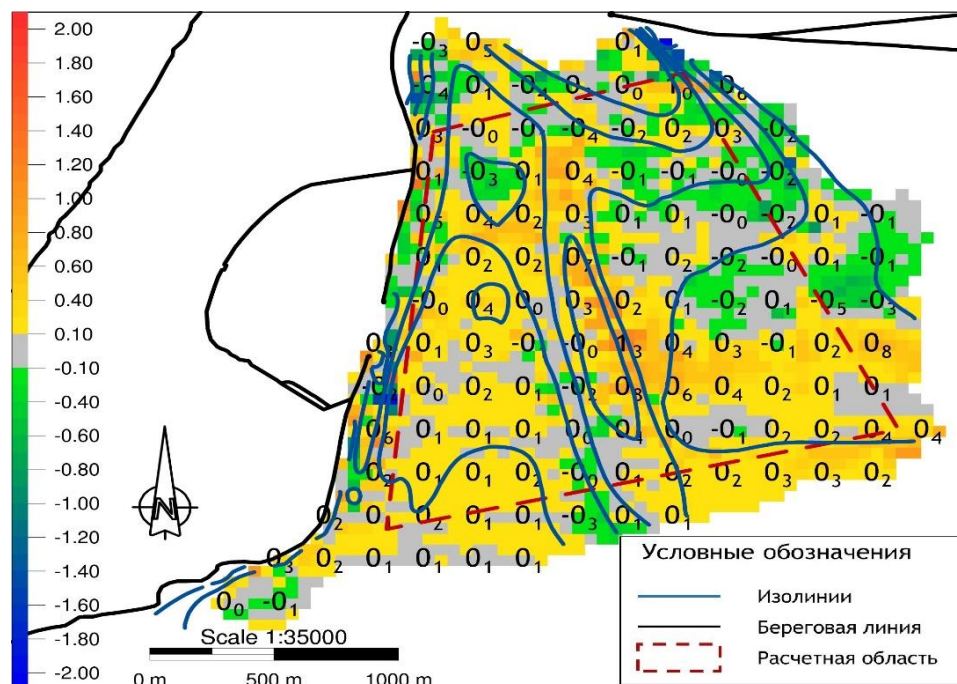


Рисунок 2.12 – Дифференциальная поверхность - деформация нагонной дельты между 2012 г и 2019 г (отрицательные значения - эрозия, положительные – аккумуляция, за 0 принят диапазон 20 см (-0.1/+0.1 м))

За рассматриваемый 7-летний период (2012 - 2019 гг.) донная деформация зафиксирована по всей поверхности нагонной дельты (рисунок 2.12), объем ее аккумулятивной области увеличился на 400 000 м<sup>3</sup>, что эквивалентно 15 см слою или 55 000 м<sup>3</sup>/год. С учетом среднегодовых объемов дноуглубительных работ

(27 000 м<sup>3</sup>/год по данным дноуглубления) объем заносимости акватории входного участка КМК может составлять около 80 000 м<sup>3</sup>/год.

## **2.6. Гранулометрический состав донных осадков**

Автором было принято решение не использовать результаты пробоотбора в точках В3 (п. Ушаково) и В4 (морские отложения). Район п. Ушакова не учитывался по причине удаленности от входного участка КМК, а морские отложения из-за активных литодинамических процессов выражены непостоянными полями песков [Бабаков, 2012]. В качестве основного источника о составе морских отложений в районе оградительных молв и отложений акватории залива использовались результаты исследований [Чечко и др., 2008] и [Chechko, 2008].

По гранулометрическому составу донные осадки в районе акватории ПТС неоднородны (таблица 2.2), в основном это очень мелкий, мелкий и средний пески, при этом содержание определённой фракции в пределах отдельной морфологической зоны неоднозначно.

По данным пробоотбора отложения аккумулятивной области нагонной дельты (точка В2) содержат 51% средних песков (medium sand) и 39% мелких песков (fine sand), а отложения центральной промоины (точка В1) 84.8% мелких песков (таблица 2.2) (рисунок 2.13). Доля крупных песков (coarse sand) и очень мелких песков (very fine sand) в точках В1 и В2 составляет по 5%.

Преобладание средних и мелких песков в отложениях аккумулятивной области нагонной дельты (точка В2) свидетельствует о том, что она преимущественно подпитывается только этими фракциями. В глубине акватории залива, в точке В5 отложения содержат 50% очень мелких, 29% мелких, 10% средних песков и 10% илистых частиц (silts). В ограниченной дамбой №1 внутреннем участке КМК (точка В6) донные осадки содержат 60% мелкого песка, 26 % очень мелкого, 10% среднего и по 1% содержат ила и крупного песка.

Таблица 2.2 – Гранулометрический состав осадочного материала в точках В1, В2, В5, В6

№ точки	Крупный песок (coarse sand, 1.0-0.5 мм), %	Средний песок (medium sand, 0.5-0.25 мм), %	Мелкий песок (fine sand, 0.25-0.125 мм), %	Оч. мл. песок (very fine sand, 0.125-0.063 мм), %	Крупный ил (coarse silt, 0.063-0.04 мм), %	Мелкий, тонкий ил (medium, fine silt, < 0.04 мм), %
В1	1	4	85	10	0	0
В2	4	51	40	5	0	0
В5	0	10	29	50	10	0
В6	1	10	60	26	1	0

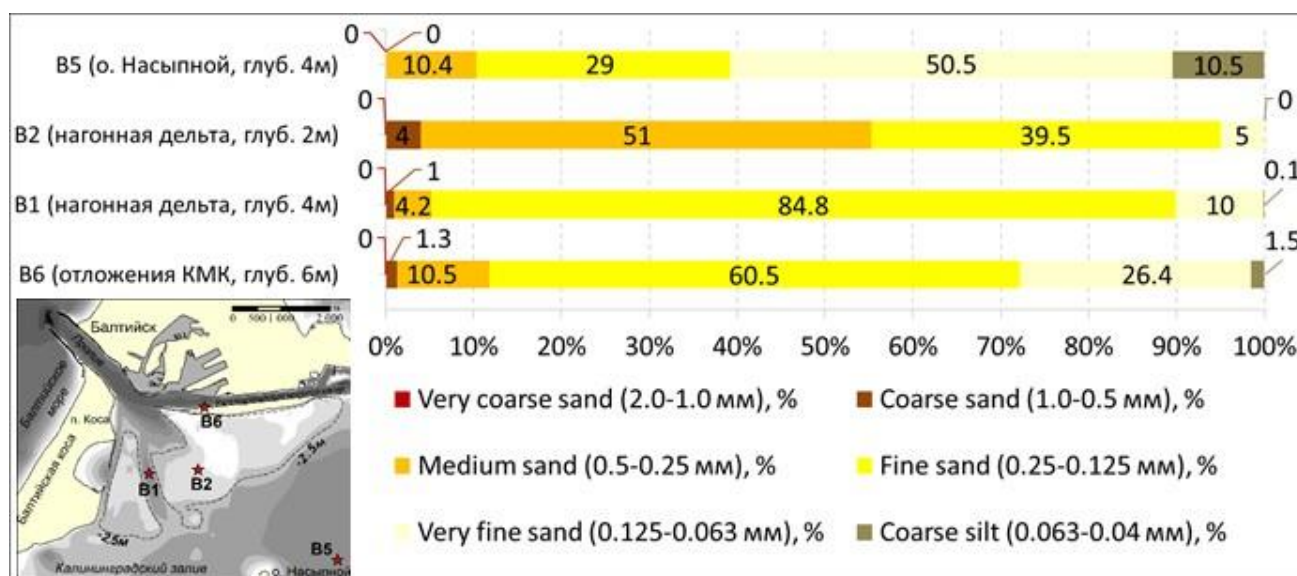


Рисунок 2.13 – Гранулометрический состав донных осадков на входном участке Калининградского залива

## 2.7. Выводы

1. Нагонная дельта, аналогично приливной [Hayes, 1979], сформировалась при взаимодействии входных потоков пролива с вдольбереговым потоком наносов. Она служит зоной конечного депонирования для морского песчаного материала, ее отложения состоят из мелкого (40-85%) и среднего (4-51%) песка с низким содержанием крупного (>1%), исходя из этого она подпитывается преимущественно этими фракциями.

2. За исследуемый 9-летний период (2008-2016 гг.) эрозионная депрессия увеличивалась в объеме со скоростью 2500 м<sup>3</sup>/год, на 2016 г. ее объем (ниже изобаты 12 м) составил 1 130 000 м<sup>3</sup>. Поле рифелей на входном участке КМК не исчезает в течении года, изменяется только положение гребней. Нагонная дельта за исследуемый 7 летний период (2012 – 2019 гг.) прибавила примерно 400 000 м<sup>3</sup> (+15 см).



### **Глава 3. Изучение гидро-литодинамических условий движения взвешенных наносов через входной участок КМК**

Характер движения донных и взвешенных наносов через входной участок КМК определяется гидродинамическими особенностями водообмена залива с морем [Chechko, Blazhchishin, 2002; Chechko, 2002]. Актуальные на данный момент измерения течений в проливе проводились в период 1951-1965 гг. [Лазаренко, Маевский, 1971]. Их дискретность и продолжительность не характеризуют частоту смены знака водообмена, поэтому автором для оценки балансовых характеристик Калининградского/Вислинского залива прибегают к численному моделированию [Chubarenko, Chubarenko, 2002a-b; Chechko, Chubarenko, 2016; Szydłowski et al., 2019]. В данном разделе приводятся анализ гидро-литодинамической обстановки ПТС входного участка КМК по данным натурных измерений.

#### **3.1. Исходные данные и методы**

Входной участок КМК служит единственной протокой между Калининградским заливом и Балтийским морем, поэтому морская навигация в КМК и часто сменяющиеся погодные условия создают существенные ограничения для проведения частых измерений. В связи с этим предпочтение было отдано стационарным методам измерений за пределами судоходного фарватера в акватории залива. Для изучения гидролого-седиментационных особенностей была организована серия измерений течений и эксперимент по отбору взвешенного материала накопительным способом.

##### *3.1.1. Схема точек измерений*

Расположение точек измерений выбрано в связи с особенностями морфологического строения нагонной дельты (рисунок 3.1). Точки 1,2 расположены по линии профиля АВ по середине центральной и западной эрозионных промоин на глубинах 4-5 м. Точки 3, 4, 5, 6, расположены по одной линии профиля CD, точки 3, 4 находятся в эрозионных промоинах на глубинах 3

м, точка 4 на западной вершине нагонной дельты на 2м глубине, а точка 6 на верхней бровке мористого склона на глубине 2 м. Точка 7 расположена по линии профиля EF у нижней бровки мористого склона на глубине 7 м, точка 8 за нагонной дельтой в акватории залива на глубине 4 м, а точка 7 вблизи о. Насыпной. Площадь сечения АВ составляет 4700 м<sup>2</sup>, сечения CD 4650 м<sup>2</sup>, сечения EF 4560 м<sup>2</sup>. Метеорологическая станция расположена на северном берегу пролива, а мареограф установлен на повороте Калининградского морского канала.

### *3.1.2. Оборудование и объем измерений*

Течения измерялись автономными измерителями - «инклинометрами», прибор представляет собой герметичный контейнер с электронным блоком и дополнительным элементом плавучести, заключенным в цилиндрическую пластиковую трубку с перфорированными стенками (рисунок 3.2). Инклинометр разработан для измерения донных течений в диапазоне скоростей 0.03–0.56 м/с с максимальной относительной погрешностью 25% для низких скоростей и 3-5% для высоких скоростей [Пака и др., 2019]. Скорость потока регистрируется как мгновенный наклон инклинометра на основании лабораторных калибровочных экспериментов. Из-за конструктивных особенностей у используемых моделей ресурс автономной работы ограничен - около 30 суток. Все операции по установке и снятию измерителей течений осуществлялись с маломерного плавсредства, после окончания измерений прибор передавался сотрудникам лаборатории геоэкологии АОИОРАН для извлечения и предварительной обработки данных (Корж А., Кондрашев А.). Измерения течений проводились четыре периода (таблица 3.1):

- Зимняя постановка 24.12.2019 - 13.02.2020 (51 сутки)
- Весенняя постановка 17.03.20 - 21.04.20 (35 суток)
- Калибровочная постановка 14.05.2020 – 22.05.2020 (8 суток)
- Летняя постановка 28.06.2020 – 02.08.2020 (35 суток)

По результатам зимней постановки выяснилось, что инклинометр может завершить работу раньше выработки своего ресурса, поэтому в последующих экспозициях участвовало не меньше четырех приборов одновременно.

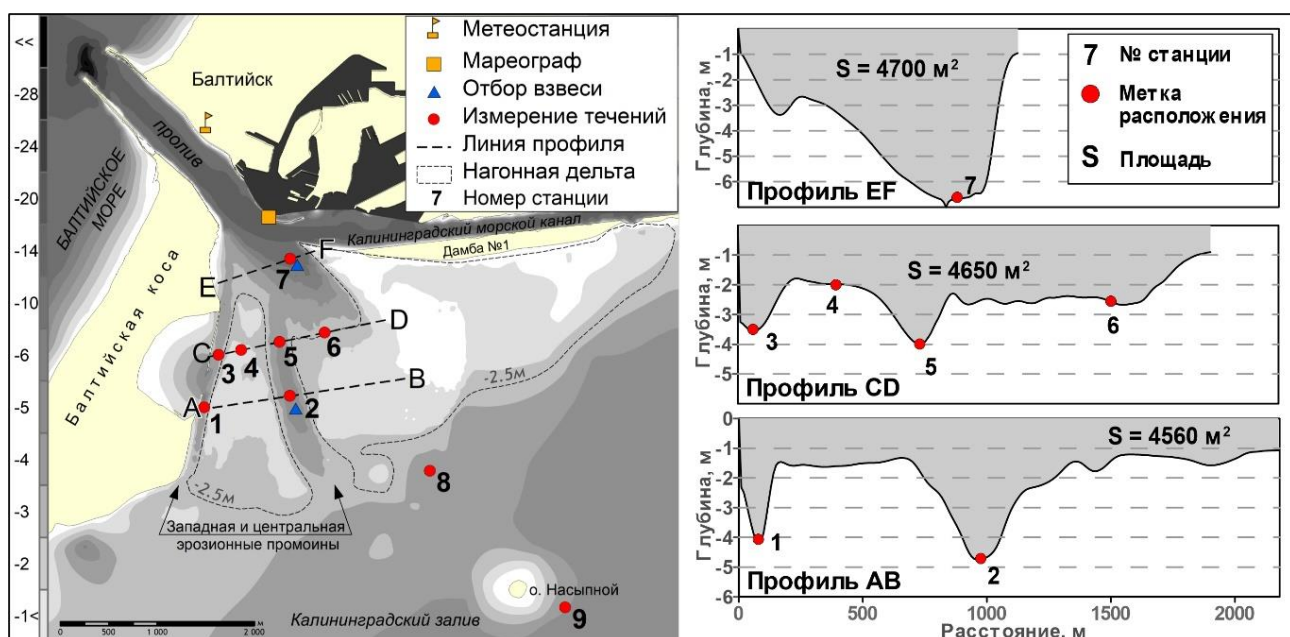


Рисунок 3.1 – Схема расположения станций измерений в период полевых работ 2019-2020 гг.: слева – вид в плане; справа – расположение станций на сечениях донного рельефа АВ, CD, EF

Пробоотбор **взвешенных наносов** проводился в соответствии с методическими разработками [Анцыферов, 1987] и [Christiansen et al., 2002; Lund-Hansen et al., 1997, 1999]: на дне залива устанавливается жесткий пирамидальный каркас, на который крепится кассета с наносонакопителем 2-х типов («банка» и «стакан») (рисунок 3.2). Как стаканы, так и банки накапливают материал вне зависимости от направления потока – у банок боковые отверстия расположены по всему периметру, у стаканов полностью открыт верхний торец.

Пробоотбор проводился в двух точках в период с 28.06.2020 по 02.08.2020: в течение 35 суток в точке 2 на горизонтах 40, 100, 150, 200 см от дна, в точке 7 – 18 суток на горизонтах 40, 100, 150, 200 см от дна (таблица 3.1). В обеих экспозициях участвовали наносонакопители двух типов, но при подъеме

конструкции в точке 2 материал из стаканов был утерян, в точке 7 материал из 2-х типов наносонакопителей благополучно сохранен.

Сопутствующие данные по уровню моря были получены с автоматического мареографа в Калининградском морском канале (данные предоставлены ФГУП «Росморпорт») (Рисунок 3.1).

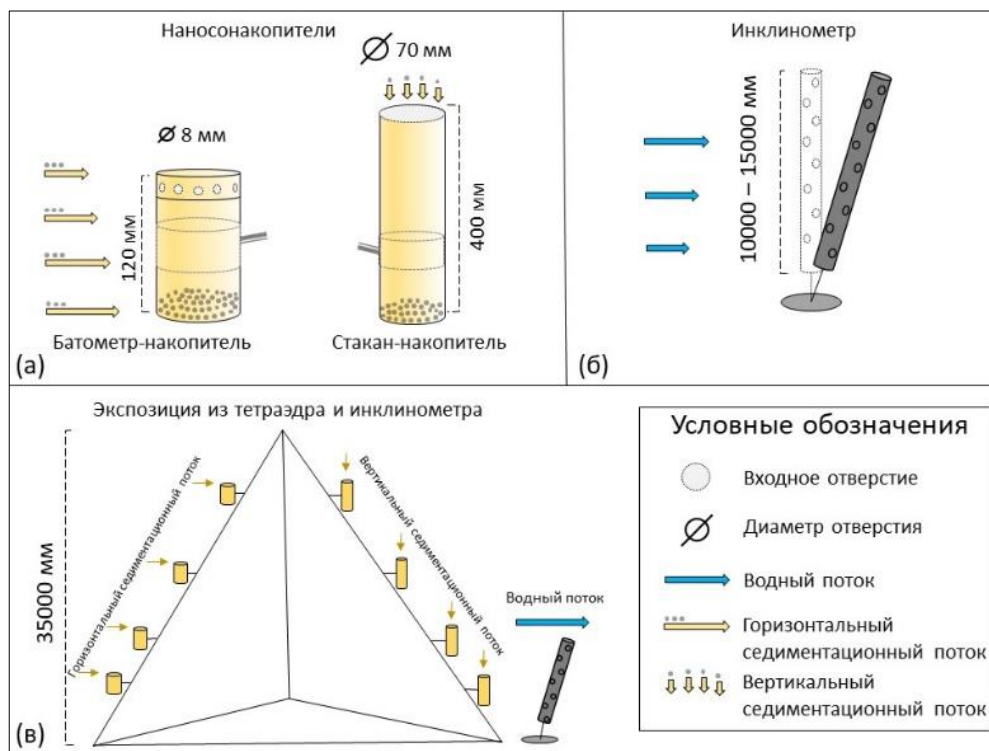


Рисунок 3.2 – Измерительный комплекс: (а) – наносонакопители двух типов, закрепленные на разных горизонтах: батометр и стакан; (б) – измеритель течений (инклинометр); (в) – наносонакопители на кассете, закрепленной на раме (инклинометр устанавливался в 20-30 м от конструкции) Измерительный комплекс: (а) – наносонакопители двух типов, закрепленные на разных горизонтах: батометр и стакан; (б) – измеритель течений (инклинометр); (в) – наносонакопители на кассете, закрепленной на раме (инклинометр устанавливался в 20-30 м от конструкции)

Таблица 3.1 – Журнал измерений

Постановка	№ станции	Прибор	Координаты точки, широта; долгота	Начало работы прибора	Окончание работы прибора	Время работы прибора, сутки
Зимняя	1	Инклинометр	54.617062; 19.889412	24.12.2019	06.01.2020	13
Зимняя	2	Инклинометр	54.617185; 19.885763	24.12.2019	13.01.2020	20
Весенняя	3	Инклинометр	54.621192; 19.887577	-	-	
Весенняя	4	Инклинометр	54.62205; 19.89155	-	-	
Весенняя	5	Инклинометр	54.621784; 19.897652	17.03.2020	11.04.2020	25
Весенняя	6	Инклинометр	54.621733; 19.904316	17.03.2020	11.04.2020	25
Весенняя	7	Инклинометр	54.630034; 19.899234	17.03.2020	12.04.2020	26
Калибровочная	1	Инклинометр	54.61718; 19.88571	14.05.2020	22.05.2020	8
Калибровочная	2	Инклинометр	54.61707; 19.89944	14.05.2020	22.05.2020	8
Калибровочная	3	Инклинометр	54.62109; 19.88753	14.05.2020	22.05.2020	8
Калибровочная	4	Инклинометр	54.62215; 19.89138	14.05.2020	22.05.2020	8
Калибровочная	7	Инклинометр	54.63000, 19.89959	14.05.2020	22.05.2020	8
Летняя	2	Инклинометр	54.616826; 19.899569	28.06.2020	27.07.2020	29
Летняя	7	Инклинометр	54.629253; 19.899305	28.06.2020	12.07.2020	14
Летняя	8	Инклинометр	54.610604; 19.921513	28.06.2020	26.07.2020	28
Летняя	9	Инклинометр	54.597946; 19.942641	28.06.2020	27.07.2020	29
Летняя	2	Наносоулов.	54.617682; 19.899427	28.06.2020	02.08.2020	35
Летняя	7	Наносоулов.	54.629253; 19.899305	15.07.2020	02.08.2020	18

### 3.1.3. Обработка данных измерений течений

Исходные данные измерений были предварительно приведены к одинаковому шагу с дискретностью 1 изм./10 мин. Методом математического пересчета векторные единицы измерений скорости течений были преобразованы в скалярные. Введена условно ориентированная математическая система координат ХУ, где ОХ логически ориентирована по направлению на приток и заток, вектор ( $\bar{V}_a$ ) представлен в географической системе отсчета (N-E-S-W) (рисунок 3.4).

При таком взаиморасположении географической и математической систем отсчета верны следующие формулы пересчета углов  $\alpha_0$ ,  $\gamma$  и  $\varphi$ :

$$\gamma = \alpha_0 - \varphi \quad (1)$$

$$\varphi = \alpha_0 - \gamma \text{ или } \varphi = \gamma - \alpha_0 \quad (2)$$

Тогда продольная составляющая вектора скорости течения ( $\bar{V}_{..}$ ) вычисляется по формуле:

$$\bar{V}_{..} = |\bar{V}_a| * \cos \varphi, \quad (3)$$

где  $|\bar{V}_a|$  – модуль скорости течения.

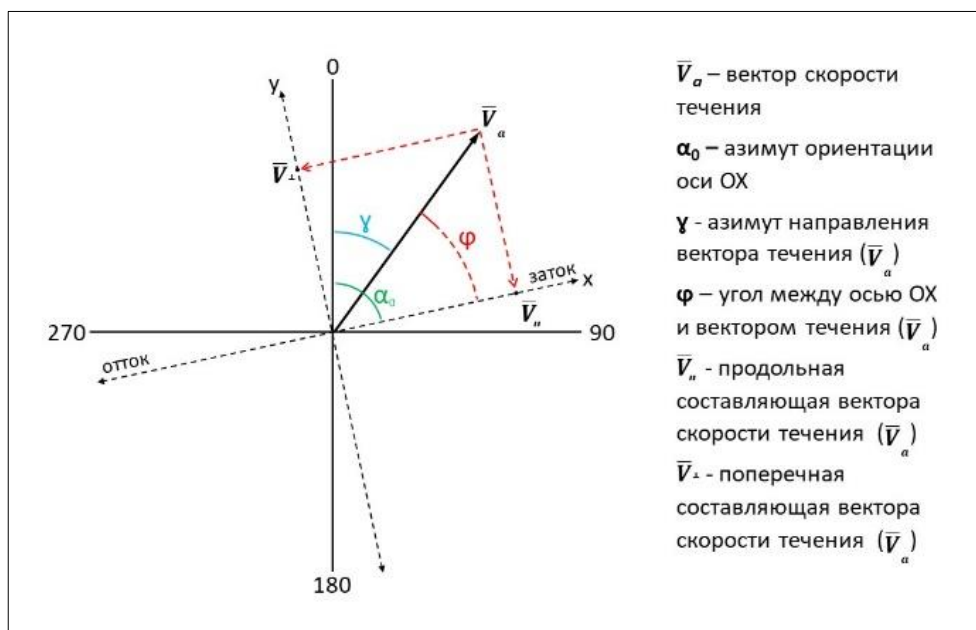


Рисунок 3.3 – Схема взаимной ориентации математической системы координат и вектора скорости течения ( $\bar{V}_a$ )

Поперечная составляющая вектора скорости течения ( $\bar{V}_\perp$ ) вычисляется по формуле:

$$\bar{V}_\perp = |\bar{V}_a| * \sin \varphi, \quad (4)$$

где  $|\bar{V}_a|$  – модуль скорости течения.

Формулы 3-4 были применены ко всем измерениям течений, результат визуализировался с помощью точечных диаграмм, выражающих соотношение продольной ( $\bar{V}_n$ ) и поперечной ( $\bar{V}_\perp$ ) составляющих (рисунок 3.3).

Microsoft Office Excel позволяет рассматривать массив данных и точечную диаграмму, как единую математическую функцию, поэтому, исходя из представления о двунаправленном характере течений (на приток и отток), методом подбора был определен наиболее оптимальный угол  $\varphi$ , при котором линия тренда точечной диаграммы ориентирована параллельно оси OX (положительные значения – **приток**, отрицательные значения – **отток**). Иными словами, математическая система координат XY была искусственно повернута

таким образом, чтобы угол ( $\varphi$ ) между линией тренда и осью OX равнялся нулю (рисунок 3.4).

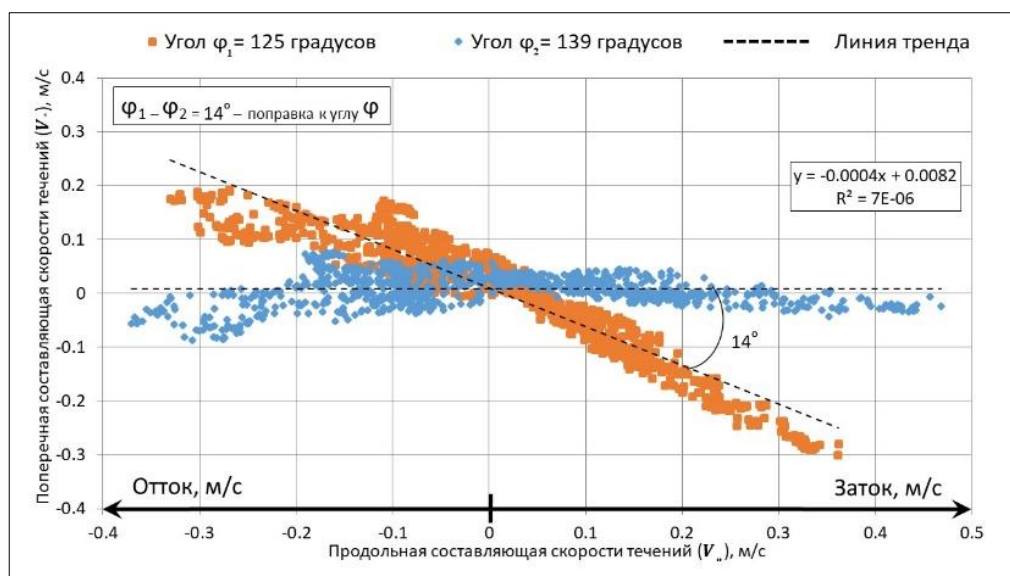


Рисунок 3.4 – Соотношения данных продольной ( $\bar{V}_x$ ) и поперечной ( $\bar{V}_y$ ) составляющих скорости течения при различных значениях угла  $\phi$

Оценка водообмена осуществлялась через условные сечения донного рельефа АВ, CD, EF (см. рисунок 3.1), их площадь ( $S$ ) рассчитывались по формуле:

$$\int_0^L h(x) (dx) = h_{\text{ср}} * L, \quad (5)$$

где  $L$  - длина отрезка АВ;  $h(x)$  – переменная глубина.

Необходимо отметить, что между скоростями течений ( $\bar{V}$ ) в разных точках получены довольно высокие значения коэффициентов корреляций (таблица 3.2), на основании этого была рассчитана усредненная скорость водного потока  $V_{\text{ср}}(t)$ :

$$V_{\text{ср}}(t) = \frac{\bar{V}_1(t) + \bar{V}_2(t) + \dots + \bar{V}_n(t)}{n}, \quad (6)$$

где  $n$  – количество точек измерений на линии сечения

Зная среднюю скорость водного потока в определенный момент времени  $V_{cp}(t)(m/s)$  и площадь поперечного сечения ( $S, m^2$ ) по формуле (7) был получен расход воды  $Q(t) (m^3/s)$ :

$$Q(t) = S * V_{cp}(t) \quad (7)$$

Таблица 3.2 – Коэффициенты корреляции между скоростями течений ( $\bar{V}$ ), приуроченных к одному периоду измерений и одной линии профиля

<b>№ постановки</b>	<b>Линия профиля</b>	<b>Коррелируемые точки</b>	<b>Коэффициент корреляции</b>
1	AB	№ 1 / № 2	0.99
2	CD	№ 5 / № 6	0.99
3	AB	№ 1 / № 2	0.94
3	CD	№ 3 / № 4	0.92

Водообмен притока-оттока  $W_{in/out}(m^3)$  – это объем воды, текущей в и из акватории залива через площадь сечения ( $S$ ) во время событий притока и оттока  $T_{in/out}(s)$ , он рассчитывался по формуле (8):

$$W_{in/out} = T_{in/out} * Q \quad (8)$$

Под кумулятивным водообменом (на момент времени  $t$ ) мы понимаем суммарный объем воды, прошедший через контрольное сечение за период времени  $[T_0, t]$  ( $T_0$  – отсчетный момент времени), причем приток и отток вкладываются в кумулятивный водообмен с разными знаками (приток – положительный вклад, отток – отрицательный вклад). Величина кумулятивного водообмена изменяется во времени, так как приток и отток сменяют друг друга и происходят с разной интенсивностью. За продолжительный период времени (год и более) кумулятивный водообмен становится примерно равным величине годового стока рек (для акватории залива атмосферные осадки примерно уравновешиваются испарением), так как водность залива остается примерно постоянной.



$$V_{\text{кум}}(t) = \int_{T_0}^t v(\tau) d\tau = \int_{T_0}^t S * Q(\tau) d\tau, \quad (9)$$

где  $Q(t)$  [ $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ] – расход воды от времени (положительный – приток, отрицательный – отток),  $S$  [ $\text{м}^2$ ] – площадь сечения.

### 3.1.4. Методы лабораторного анализа

Лабораторный анализ накопленной взвеси выполнялся на базе АО ИОРАН (Чечко В. А.): проведена оценка массы, концентрации взвешенных наносов, скорости седиментации. Гранулометрический состав накопленной взвеси определялся по массовому содержанию частиц различной крупности (в процентах от массы исследуемого образца) ситовым (фракции  $> 0.04$  мм) и водно-механическим (фракции  $< 0.04$  мм) методами [Буданова и др., 2013]. В соответствии с классификацией Вентворта [Wentworth, 1922] выделены следующие фракции: крупный песок (coarse sand, 1.0-0.5 мм), средний песок (medium sand, 0.5-0.25 мм), мелкий песок (fine sand, 0.25-0.125 мм), очень мелкий песок (very fine sand, 0.125-0.063 мм), крупный ил (coarse silt, 0.063-0.04 мм), средний и мелкий ил (medium, fine silt,  $< 0.04$  мм).

### 3.1.5 Изучение условий взвесеperеноса

Поскольку для измерения содержания взвешенных наносов в водном потоке отсутствовал специальный прибор, время насыщения потока приходилось оценивать эмпирически. Процесс движения взвешенных наносов можно представить, как последовательность трех условных фаз – взмучивание, перенос и седиментация (рисунок 3.5, пример для мелкого песка).

Таблица 3.3 – Пороги скорости взмучивания и осаждения по диаграмме Хюльстрема [Hjulström, 1939] для различных гранулометрических размерностей

Тип взвеси (по Вентворту)	Размер частиц, мм	Порог взмучивания, см/с	Порог осаждения, см/с
Medium, fine silt	0.04-0.063 мм	25	0.5
Coarse silt	0.063-0.125 мм	20	0.9
Very fine sand	0.125-0.250 мм	25	1.8
Fine sand	0.250-0.500 мм	30	3.6
Medium sand	0.5-1.0 мм	45	6.6

Условные пороги скорости течений, при которых возникают эти фазы, можно получить (таблица 3.3) из диаграммы Хюльстрема [Hjulstrøm, 1939]. На их основе по данным измерений течений были выделены временные интервалы фаз «взмучивание–перенос–седиментация» для гранулометрических размерностей песков и илов (по классификации Вентворта), при этом не учитывались те фазы потенциального осаждения и переноса, которые не были подкреплены предшествующими фазами взмучивания. Полученные временные интервалы движения взвешенных наносов были переведены в процентные доли (%) от общей продолжительности измерений отдельно для актов оттоков и заток.

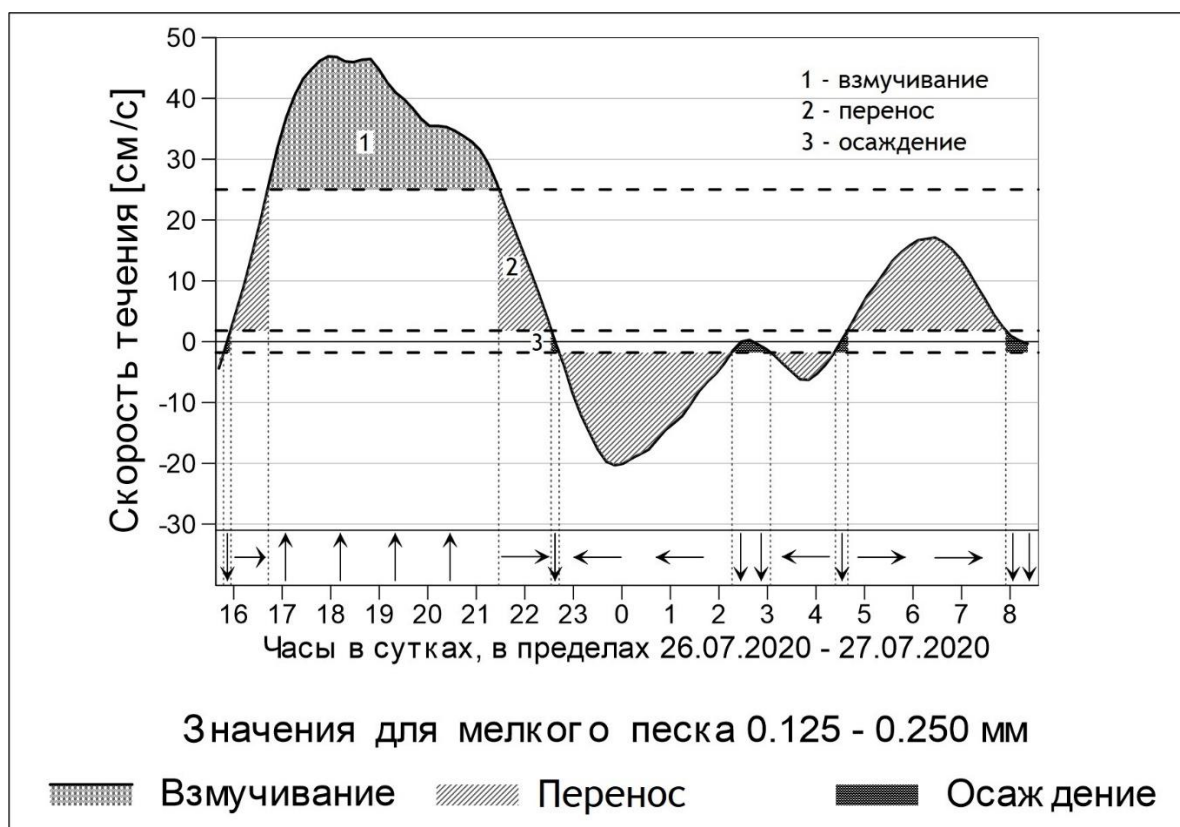


Рисунок 3.5 – Фазы скорости течений, при которых происходит потенциальное взмучивание (1), транспорт (2) и осаждение (3) для частиц диапазона размерности 0.125-0.250 мм (мелкий песок). Горизонтальные пунктирные линии обозначают пороги взмучивания и осаждения для выбранного диапазона крупности. Положительная скорость потока означает приток воды в залив, отрицательная – отток. Стрелками вдоль горизонтальной оси схематично обозначены процессы осадконакопления, транспорта и взмучивания

### 3.2. Скорость и ориентация течений

В районе нагонной дельты скорости течений хорошо коррелированы (коэффициенты корреляций в пределах 0.92 – 0.98) (таблица 3.2) и подчиняются режимным особенностям водообмена залива с морем, поэтому ориентированы двунаправленно - на приток и отток (диапазон  $\pm 5-30^\circ$ ) (таблица 3.4). За пределами нагонной дельты течения подчиняются внутренней циркуляции вод акватории залива и направлены хаотично.

Скорости течений в точках № 1-7 изменялись синхронно с коэффициентом корреляции от 0.92 до 0.98 (таблица 3.2) (рисунок 3.6). Зимой во время актов затoka средняя скорость течений была 0.30 м/с, весной 0.18 м/с, летом 0.15 м/с. Средняя скорость течений во время актов оттока зимой была 0.25 м/с, весной 0.20 м/с, летом 0.14 м/с. Скорости течений в каналах эрозионных промоин во время пиков актов оттока были несколько выше (на 0.2 м/с) скоростей на мелководье аккумулятивных вершин.

Таблица 3.4 – Результирующие направления затоковых и оттоковых течений в точках 1-7

Постановка	№ точки измерения	Профиль, на котором расположена точка	Ориентация среднего вектора затоковых течений, градусы	Ориентация среднего вектора оттоковых течений, градусы
Зимняя	1	AB	160	345
Зимняя	2	AB	163	337
Весенняя	5	CD	215	15
Весенняя	6	CD	168	331
Весенняя	7	EF	100	280
Калибровочная	1	AB	185	135
Калибровочная	2	AB	157	335
Калибровочная	3	CD	177	346
Калибровочная	4	CD	167	347
Калибровочная	7	EF	135	300
Летняя	2	AB	111	303
Летняя	7	EF	143	329

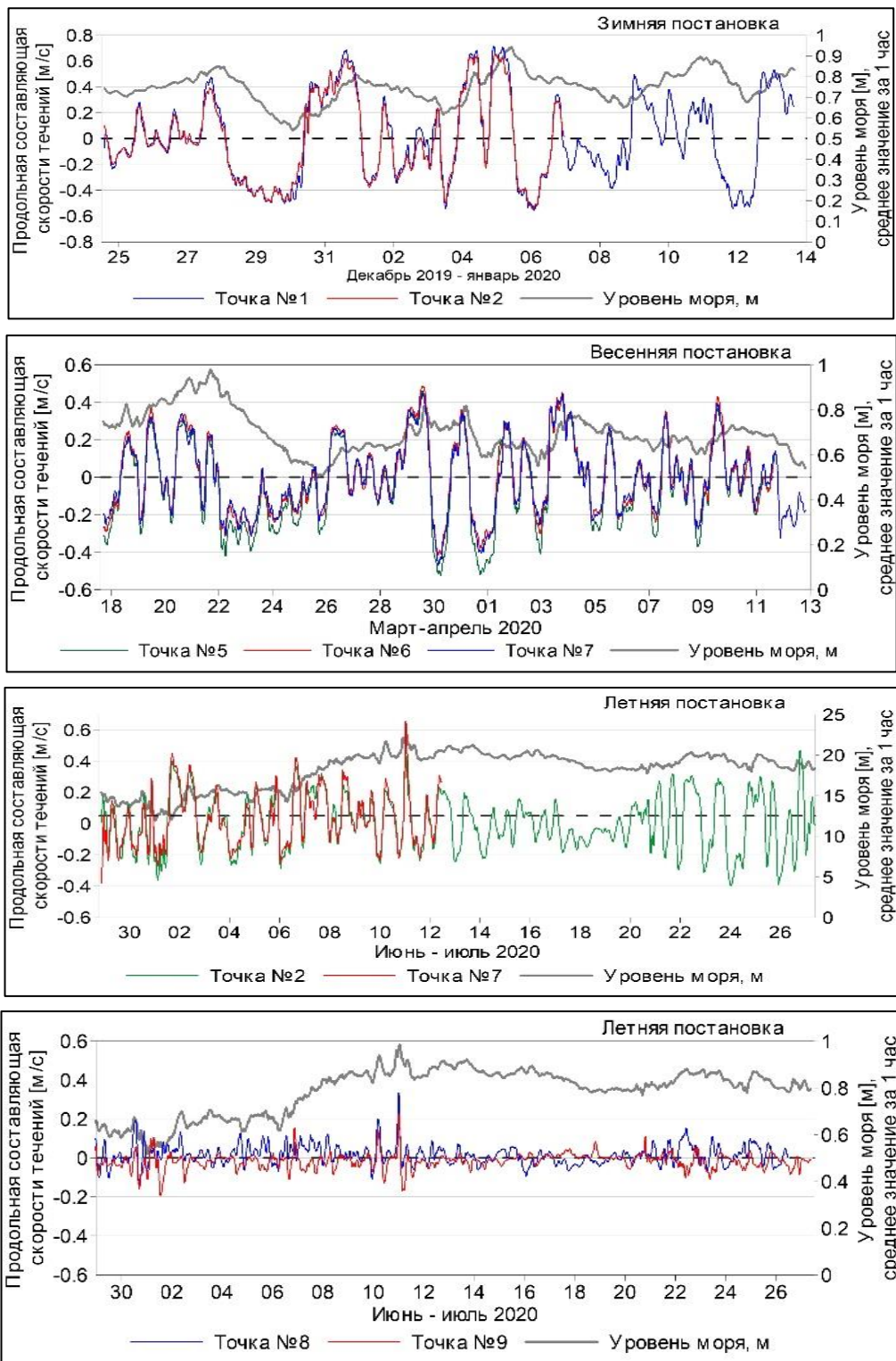


Рисунок 3.6 – Скорость течений и уровня моря по данным измерений в зимний, весенний и летний периоды измерений

### 3.3. Водообмен через акваторию ПТС

#### 3.3.1. Повторяемость актов затока и оттока

За период зимней постановки зарегистрировано 17 пар актов затока и оттока, за период весенней постановки 25 пар, за период летней постановки 39 пар. Длительность актов затока и оттока менялась в широких диапазонах: акты затока длились от 30 минут до 40 часов, а акты оттока длились от 50 мин до 56 часов. Существует небольшая асимметрия в распределении длительности актов затока и оттока: зимой средняя длительность актов оттока на 23 % (2.6 часа) была короче средней длительности актов затока, весной короче на 18 % (на 2.3 часа), а летом акты средняя длительность затока и оттока выровнялась. Суммарно от зимнего «штормового сезона» к сезону «летнему затишью» средняя длительность событий отток/заток монотонно уменьшалась (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Средняя длительность событий оттока и притока

Название постановка	Профиль	Длительность измерения, часы	События оттока, часы	События притока, часы
Зимняя постановка	профиль АВ	481	15.6	12
Весенняя постановка	профиль CD	601	12.7	10.4
Весенняя постановка	профиль EF	601	10.1	9.2
Летняя постановка	профиль АВ	686	8.7	8.7
Летняя постановка	профиль EF	329	7.5	7.5

#### 3.3.2. Объем водообмена

Зимой за 17 событий актов заток\отток из моря в залив поступило примерно 642 млн. м<sup>3</sup>, а убыло 662 млн. м<sup>3</sup>, отток превысил заток на 20 млн. куб. м<sup>3</sup> (3%). В среднем за один акт оттока зимой убывало 36 млн. м<sup>3</sup>, что на 8% меньше прибывавшего объема за один акт затока - 39 млн. м<sup>3</sup>. Весной за 25 пар актов затока\оттока в залив поступило 810 млн.м<sup>3</sup>, а убыло 960 млн. м<sup>3</sup>, отток превысил заток на 149 млн. куб. м<sup>3</sup> (15%), в среднем за один акт оттока весной убывало 37 млн. м<sup>3</sup>, что на 9% выше прибывавшего объема за один акт затока - 31 млн. м<sup>3</sup>. Летом за 39 пар актов затока\оттока в залив поступило 850 млн. м<sup>3</sup>, а убыло 766

млн. м<sup>3</sup>, заток превысил отток на 90 млн. куб. м<sup>3</sup> (11%), в среднем за один акт оттока убывало 20 млн. м<sup>3</sup>, что на 5% ниже прибывавшего за один акт затока объема - 21 млн. м<sup>3</sup>.

### 3.3.3. Интенсивность водообмена

Интенсивность водообмена характеризует скорость водного потока (м<sup>3</sup>) за единицу времени (час), в данном случае рассмотрена средняя интенсивность водообмена во время актов затока и оттока. Примечательно, что интенсивность водообмена в межсезонье не изменялась и сохранялась в диапазоне 1.62-2.20 м<sup>3</sup>/час при оттоках и диапазоне 1.83-2.28 м<sup>3</sup>/час при затоках, что характеризует устойчивую пропускную способность входного участка КМК. На заток интенсивность водообмена преобладала в условиях зимней штормовой активности и летнего затишья, весной во время актов затока интенсивность была меньше, чем во время актов оттока (рисунок 3.1, профиль EF) (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Средняя интенсивность водообмена

Название постановка	Профиль	Длительность измерения, часы	За события оттока, млн. м <sup>3</sup> /час	За события притока, млн. м <sup>3</sup> /час
Зимняя постановка	профиль АВ	481	1.6	2.0
Весенняя постановка	профиль CD	601	2.2	2.1
Весенняя постановка	профиль EF	601	1.8	1.8
Летняя постановка	профиль АВ	686	2.0	2.1
Летняя постановка	профиль EF	329	1.7	2.3

### 3.3.4 Кумулятивный водообмен

Величина кумулятивного водообмена складывается из объема воды, прошедшего через условное сечение (АВ, CD, EF) за определенный период времени (t). Так как водность залива - величина постоянная, то разница между суммарными значениями кумулятивного объема актов оттока и затока будет характеризовать величину поступившего объема воды в акваторию залива с водосборного бассейна и атмосферными осадками.

В сезонном масштабе общий кумулятивный объем монотонно уменьшался от зимнего «штормового сезона» к «летнему затишью» (таблица 3.7). За период зимней постановки через сечение АВ из моря в залив поступило на 8 % (3.2 млн. м<sup>3</sup>) меньше, чем убыло. За период весенней постановки эта разница составила 15% (5.7 млн м<sup>3</sup>) для объема, поступившего через сечение CD. За период весенней постановки объем, убывший из залива в море через сечение EF, уравнился с объемом, поступившим из моря в залив. За период летней постановки через профиль АВ из моря в залив прибыло меньше на 8% (1.8 млн. м<sup>3</sup>) чем убыло обратно, а для профиля EF эта разница составила 30% (7.1 млн. м<sup>3</sup>).

Таблица 3.7 – Средний кумулятивный объем водообмена

Название постановка	Профиль	Длительность измерения, часы	События оттока, млн. м <sup>3</sup>	События притока, млн. м <sup>3</sup>
Зимняя постановка	профиль АВ	481	38.9	35.7
Весенняя постановка	профиль CD	601	36.9	31.2
Весенняя постановка	профиль EF	601	25.9	26.2
Летняя постановка	профиль АВ	686	19.6	21.4
Летняя постановка	профиль EF	329	14.5	21.6

#### 3.4. Влияние уровня моря на режим водообмена

Водообмен между Калининградским/Вислинским заливом и Балтийским морем регулируется сгонно-нагонными колебаниями уровня воды [Chubarenko, Chubarenko, 2002b], подтверждают это утверждение результаты измерений течений совместно с информацией об изменении уровня моря. Все три периода измерений характеризовались закономерными изменениями уровня моря, плавный подъем уровня сменялся плавным понижением и наоборот, зимой средняя длительность таких колебаний была 37 часов (минимум 20.5 ч, максимум 63 ч). Подъем или понижение уровня моря с амплитудой выше 5 см вызывали смену между актами затока и оттока. Мелкомасштабные колебания уровня с

амплитудой до 5 см и длительностью до 6-8 ч не вызывали смену знака водообмена, но влияли на скорость потока, замедляли его, либо ускоряли.

Таблица 3.8 – Эпизоды разнонаправленных колебаний уровня моря и связанные с ними явления притока-оттока за зимний период измерений (24.12.2019 – 14.01.2020)

Эпизод	Начало-конец (день, время)	Продолжительность (часы)	Средняя скорость уровня воды (см/ч)	Количество заток	Количество оттоков
AB	25.12.19 (06:00) - 27.12.19 (21:00)	63	0.37	3	3
BC	28.12.19 (02:00) - 30.12.19 (02:00)	48	-1.02	0	1
CD	30.12.19 (02:00) - 31.12.19 (23:30)	45.5	0.92	1	0
DE	31.12.19 (23:30) - 03.01.20 (10:30)	59	-0.51	3	3
EF	03.01.20 (10:30) - 04.01.20 (08:30)	22	1.45	1	0
FG	04.01.20 (08:30) - 04.01.20 (14:00)	5.5	-1.45	0	1
GH	04.01.20 (14:00) - 05.01.20 (10:30)	20.5	1.37	1	0
HI	05.01.20 (10:30) - 06.01.20 (11:00)	24.5	-1.10	0	1
IJ	06.01.20 (11:00) - 08.01.20 (19:00)	56	-0.32	1	2
JK	08.01.20 (19:00) - 10.01.20 (23:30)	52.5	0.69	3	2
KL	Не считается				
LM	11.01.20 (04:00) - 12.01.20 (07:00)	20.5	-1.61	1	0
MN	12.01.20 (07:00) - 13.01.20 (14:30)	31.5	0.86	0	1

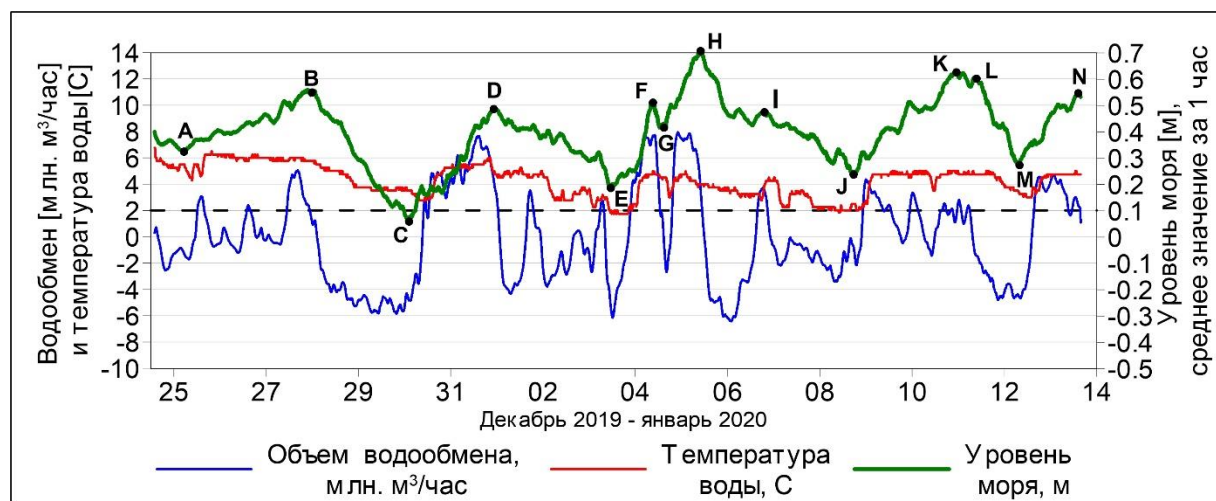


Рисунок 3.7 – Динамика объема водообмена (заток – положительный; отток – отрицательный), уровня моря и температуры за зимний период измерений (24.12.2019 – 14.01.2020). Тенденции динамики уровня моря обозначены латинскими буквами (А, В, С и т. д.)



Учитывая среднюю скорость изменения уровня моря и количество изменений между эпизодами затока и оттока на примере зимней постановки (таблица 3.8), можно сделать следующий вывод: заток или отток является устойчивым (например, эпизоды BC, CD, EF, FG, GH, HI, LM, рисунок 3.7) в том случае, когда скорость изменения уровня моря выше 0.8 см/ч. Если скорость изменения уровня менее 0.7 см/ч, за рассматриваемый период может произойти несколько эпизодов затока/оттока.

Для зимнего периода измерений хорошим индикатором происхождения водных масс является температура воды. При истинном затоке, когда морские воды поступали в залив, она была более 4.5°C, а при истинном оттоке, когда воды залива вытекали - меньше 4.5°C. Во время весеннего и летнего периодов измерений вода в заливе уже достаточно перемешалась, температуры между морем и заливом выровнялись.

Калининградский залив является приемным водоемом для речного стока, следовательно, он сбрасывает воду в море импульсивно. Импульсно-кратный режим водообмена является результатом непосредственного воздействия подъема уровня воды различного происхождения (ветровой нагон, собственные колебания Балтики, колебания различного происхождения). При относительно быстром подъеме уровня воды (скорость выше 0.8 см/ч) заток развивается устойчиво, по мере того, как подъем уровня воды замедляется, прекращается или изменяется в сторону уменьшения, вода из залива начинает вытекать.

Из-за инерционности процессов затока/оттока существует очевидная временная задержка между моментами, когда уровень моря меняет тенденцию подъема или опускания, и моментом, когда течения на входе в залив меняют свой знак, приток сменяется оттоком и наоборот. Средняя задержка между падением уровня моря и началом оттока составляет 3.6 часа (от 3 до 5 часов). Задержка между моментом подъема уровня моря и началом притока составляет 6.3 часа (от 3 до 9 часов), таким образом, система легче стремится к естественному состоянию оттока, чем к установлению затока.

### 3.5. Влияние уровня моря на кумулятивный объем водообмена

Между изменчивостью кумулятивного водообмена и динамикой уровня моря зафиксирована надежная линейная зависимость, коэффициенты корреляций составили от 0.84 до 0.98 (рисунок 3.8), коэффициенты детерминации для линейной и квадратичной аппроксимации между ними также достаточно высокие – от 0.78 до 0.8 (рисунок 3.9)

Линейная зависимость (4) между кумулятивным водообменом и уровнем моря в любой заданный момент времени (t) в течение периода времени [T<sub>0</sub>,t] вполне ожидаема, так как отражает дифференциальную зависимость (5), часто используемую при моделировании граничных условий.

Совокупный объем (м<sup>3</sup>) водообмена:

$$\int_{T_0}^t v(\tau) d\tau = A * h(t) + B, \quad (4)$$

Или в дифференциальной форме удельный объем (v, м<sup>3</sup>/с) водообмена:

$$v(t) = S \cdot Q(t) = A \cdot \frac{dh}{dt} \quad (5)$$

где Q(t) – временная функция расхода водообмена (м<sup>3</sup>/(с·м<sup>2</sup>)), h(t) – временная функция изменения уровня моря.

Полученная хорошая линейная (4) и квадратичная аппроксимация (6) зависимости между временной изменчивостью суммарного водообмена и временными вариациями уровня моря позволяет рекомендовать для практического использования соотношения (5) и (7) для оценки интенсивности водообмена (м<sup>3</sup>/с) за период времени, когда уровень изменяется монотонно (понижается или повышается):

$$\int_{t_0}^t v(\tau) d\tau = C \cdot h^2(t) + D \cdot h(t) + E \quad (6)$$

$$v(t) = 2 \cdot C \cdot h(t) + D \cdot \frac{dh}{dt} \quad (7)$$

где h(t) – функция изменения уровня моря во времени, v(t) – интенсивность водообмена (м<sup>3</sup>/с).

Для практического использования, при интервале времени  $[t_1, t_2]$ , в течении которого уровень изменяется монотонно (повышается или понижается), зависимость интенсивности водообмена через рассматриваемую площадь АВ можно оценить по формуле:

$$V_{12} \text{ (m}^3\text{)} = v_{12} \cdot (t_2 - t_1) = 692.53 \text{ (m}^2\text{)} \cdot [h(t_0 + \Delta t) - h(t_0 - \Delta t)] \quad (8)$$

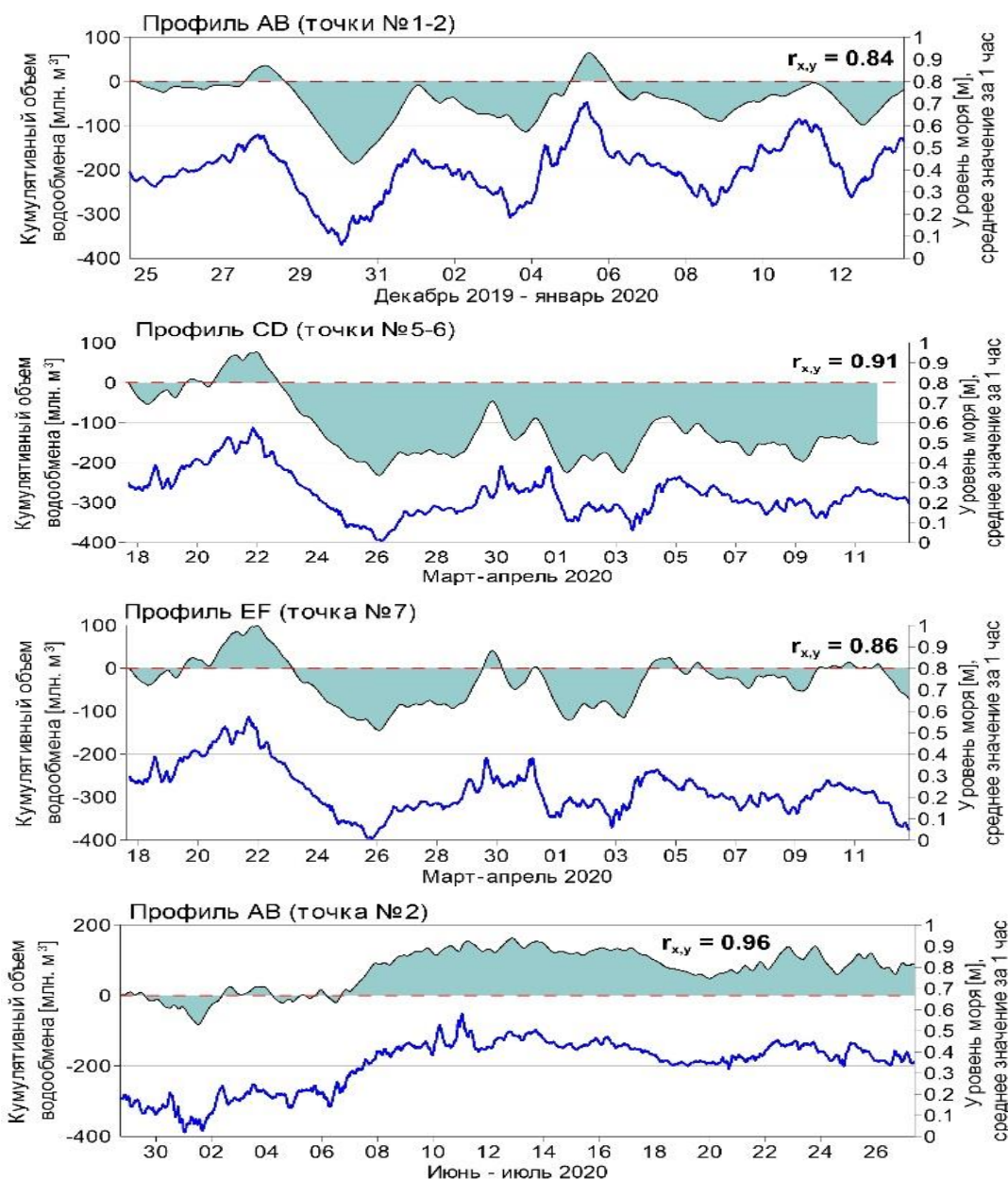


Рисунок 3.8 – Кумулятивный объем водообмена между Калининградским заливом и Балтийским морем совместно с динамикой уровня моря: график с заливкой – кумулятивный водообмен (положительный – приток, отрицательный – отток, теневая заливка); график без заливки – динамика уровня моря

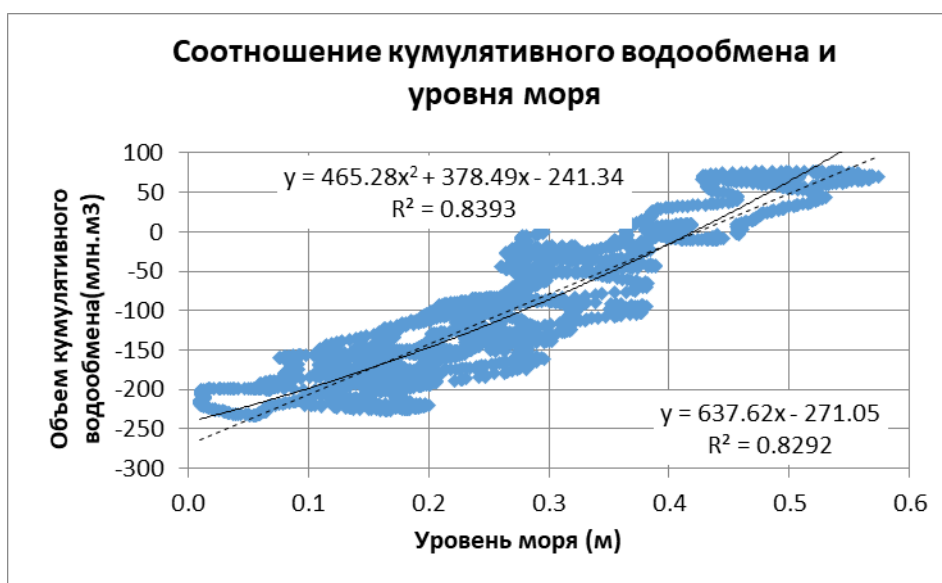


Рисунок 3.9 – Диаграмма рассеяния между кумулятивным водообменом и уровнем моря по данным весеннего периода измерений (18.03.2020 – 12.04.2020)

### 3.6. Поток взвешенных наносов

#### 3.6.1. Вертикальное распределение взвешенного материала

Экспериментальный пробоотбор взвешенного материала в точках 2 и 7 показал плавное уменьшение массы накопленного материала при удалении от дна. Вертикальное распределение может быть интерполировано экспоненциальной кривой (1) с достаточно высоким коэффициентом регрессии ( $r$  от 0.85-0.98) и небольшим стандартным отклонением ( $\sigma$  в пределах 0.3-0.6 г):

$$m = A \cdot e^{-H/H_0}, \quad (1)$$

где  $A$  (г) и  $H_0$  (см) – параметры регрессионной зависимости (таблица 3.9).

Учитывая пропорцию во времени экспозиции наносоуловителей в т. 2 и т. 7 (687 и 432 часа), наносонакопители горизонтального типа (банки) в обеих точках пробоотбора накопили примерно равное количество материала, что говорит о равномерном распределении потока взвешенного материала над всей площадью нагонной дельты.

Хотя характеристики интерполяционных кривых, описывающих вертикальное распределение взвешенного материала, на первый взгляд различаются, данные свидетельствуют, что в пределах водной толщи от горизонта

(40 см до горизонта 200 см) количество накопленного материала изменяется в пределах всего 25% от максимума, находящегося на горизонте 40 см, что говорит о слабой стратификации потока по вертикали в пределах 2 м водного слоя над нагонной дельтой. А, значит, возможна его оценка по данным, полученным всего на нескольких горизонтах.

Таблица 3.9 – Масса взвешенного материала по результатам экспериментального пробоотбора ( $m_{mea}$ ) и интерполяции ( $m_{int}$ ) в точках 2, 7

Горизонт (Н), см	Горизонтальный поток, точка №2		Горизонтальный поток, точка №7		Вертикальный поток, точка №7	
	28.06.20 - 02.08.20 (687 часов)		15.07.20 - 02.08.20 (432 часов)		15.07.20 - 02.08.20 (432 часов)	
	Масса накопленного материала, гр					
	$m_{mea}$	$m_{int}$	$M_{mea}$	$m_{int}$	$m_{mea}$	$m_{int}$
40	20.0	20.0	9.0	8.7	21.5	20.7
60	18.5	19.0	-	8.4	-	19.0
80	18.5	18.0	-	8.2	-	17.4
100	-	17.0	7.5	7.9	15.0	15.9
120	16.0	16.1	-	7.7	-	14.6
150	-	14.9	7.5	7.6	13.0	12.8
170	14.0	14.1	-	7.1	-	11.7
200	-	13.0	7.0	6.8	10.5	10.2
Параметры регрессионной зависимости (1)						
A (г)	22.3		9.2		24.7	
H0 (см)	370		670		230	
r	0.98		0.85		0.98	
$\sigma$ (г)	0.3		0.3		0.6	

Масса материала в наносонакопителях вертикального типа (стаканы) в точке 7 также плавно увеличивается от верхнего к нижним горизонтам с характеристиками, схожими с теми, что получены для масс, накопленных в ловушках для горизонтального потока. С той лишь разницей, что масса в вертикальных накопителях нарастает быстрее (отличие в 2 раза значений на горизонтах 200 см и 40 см), чем в горизонтальных (отличие в 1.3-1.4 раза), что

естественно, т.к. нижние накопители интегрируют в себя весь вертикальный поток, который нарастает от горизонта к горизонту.

### 3.6.2. Гранулометрический состав взвешенных наносов

По результатам гранулометрического анализа отобранной взвеси установлено, что в сезонных условиях «летнего затишья» над нагонной дельтой в 2-х метровом слое от дна водным потоком переносилось 55-61% илистого материала, 34-39% очень мелкого песка, 4-8% мелкого песка (таблица 3.10). Средние и крупные пески в банках не обнаружены. Вертикальными наносоуловителями накоплено 40% илистого материала, 44% очень мелкого песка, 16% мелкого песка и до 1% среднего песка.

Таблица 3.10 – Гранулометрический состав осадочного материала и водной взвеси в точках В1, В2, 2, 7

№ точки	Способ отбора	Тип материала	Крупный песок (coarse sand, 1.0-0.5 мм), %	Средний песок (medium sand, 0.5-0.25 мм), %	Мелкий песок (fine sand, 0.25-0.125 мм), %	Очень мелкий песок (very fine sand, 0.125-0.063 мм), %	Крупный ил (coarse silt, 0.063-0.04 мм), %	Мелкий, тонкий ил (medium, fine silt, < 0.04 мм), %
2	Стаканы	Взвесь	0	0	8	39	53	1
7	Стаканы	Взвесь	0	0	5	34	61	0
7	Банки	Взвесь	0	1	16	44	40	0

Содержание илистой фракции в морских отложениях незначительно [Чечко и др., 2008], поэтому очевидно, что эта фракция исключительно выносилась из залива в море. Пески широко распространены как в море, так и в заливе [Chechko, 2008], поэтому их накопление в наносоуловителях могло обеспечиваться затоками из моря и оттоками из залива. Хотя отложения нагонной дельты содержат до 50%

средних песков, его отсутствие в наносонакопителях вполне соответствует тому, что, судя по зафиксированным скоростям, фактически отсутствовали условия для его переноса (см. длительность в таблица 3.11). Это также указывает на кратковременность процесса восполнения нагонной дельты этими размерностями.

### **3.7. Оценки времен переноса взвеси различных фракций**

Поскольку была обнаружена хорошая корреляция между записями придонных скоростей (таблица 1.1) на данном этапе анализа (оценки условий по взвесепереносу) использовались усредненные скорости водного потока, полученные по данным измерений в точках 1-7.

На первом этапе были оценены суммарные временные интервалы (ситуации затока и оттока анализировались отдельно), когда потенциального происходил взвесеперенос наносов разной крупности (таблица 3.11). Оказалось, что скоростные характеристики как при затоке, так и при оттоке, были достаточны для переноса водной взвеси всех размерностей. При этом максимальная длительность переноса каждой размерности в разные периоды может реализоваться и при оттоке, и при затоке.

Процесс движение взвешенных наносов через входной участок КМК можно охарактеризовать суммой и разностью длительностей потенциального взвесепереноса, реализовавшихся при затоке и оттоке. Дольше всего (в % от всей длительности измерения) водным потоком сохранялись условия для переноса илистых (32-54%) и очень мелких песчаных размерностей (48-64%), затем, по мере увеличения крупности следует длительность переноса мелкого песка (32-44%), среднего (17-34%) и крупного (1-3%) песков (таблица 3.11).

Если рассматривать движение взвешенных наносов как поступательно-возвращательное (или знакопеременное), из моря в залив и обратно в море, то разность продолжительности взвесепереноса между актами заток и оттоков будет характеризовать баланс движения взвешенных наносов через входной участок КМК за рассматриваемый период времени (таблица 3.12).

Таблица 3.11 – Длительность потенциального переноса взвешенных наносов в зоне нагонной дельты по данным измерений скорости течений в зимний, весенний, летний периоды измерений (% указан от общей длительности измерений)

Тип взвеси	Зимний период (481 ч)				Весенний период (601 ч)				Летний период (687 ч)			
	Заток		Отток		Заток		Отток		Заток		Отток	
	часы	%	ч.	%	ч.	%	ч.	%	ч.	%	ч.	%
Medium, fine silt	101	21	91	19	134	22	189	31	116	17	104	15
Coarse silt	130	27	131	27	167	28	215	36	175	25	158	23
Very fine sand	101	21	91	19	140	23	121	20	115	17	102	15
Fine sand	49	10	54	11	98	16	105	17	69	10	50	7
Medium sand	0	0	0	0	8	1	11	2	10	1	0	0

Илистый материал может переноситься как из залива в море, так и обратно в залив, между тем, незначительное содержание илистого материала в морских отложениях делает маловероятным возможность вовлечения в перенос уже вынесенного объема. Движение очень мелкого песка происходит транзитом, т.к. этот материал не откладывается в зоне конечного депонирования, условия его выноса из залива в море дольше сохранялись зимой (на 0.2%) и весной (на 8.1%), летом длительность условий переноса из моря в залив преобладала над выносом (на 2.4%). Мелкий песок в основном транспортируется из моря в залив, т.к. для всех периодов измерений условия переноса из моря в залив сохранялись дольше зимой на 2%, весной на 3.2 %, летом на 1.8 %. Средний песок может как заноситься из моря в залив, так и выноситься обратно в море – в зимний и весенний периоды условия его выноса сохранялись дольше на 0.9% и 1.2% соответственно, а летом, наоборот, перенос из моря в залив был дольше на 2.9%. Крупного песка в залив заносится меньше всего, условия для его переноса отмечены только весной и летом, при этом весной баланс оказывался в пользу выноса (на 0.6 %), а летом перенос мог осуществляться только при затоках (1.4%).



Суммарно за все три периода измерений (73 суток), условия переноса илистого материала и очень мелкого песка дольше сохранялись во время актов оттока на 1.8% и 1.9%, а перенос мелкого, среднего и крупного песков во время актов затора, на 2.3%, 0.5%, 0.4% соответственно (рисунок 3.10). Из этого следует, что нагонная дельта за исследуемый период накапливала материал, в большей степени она подпитывалась мелким песком, в меньшей – средним и крупным песками.

Таблица 3.12 – Сумма и разность длительности потенциального взвесеperеноса между актами затора и оттока за три периода измерений

	Зимний период (481 час измерений)		Весенний период (601 час измерений)		Летний период (687 часов измерений)	
	Сумма,%	Разност ь, %	Сумма,%	Разность, %	Сумма,%	Разность, %
Coarse silt	40	2	54	-9.1	32	1.8
Very fine sand	54	-0.2	64	-8.1	48	2.4
Fine sand	40	2	44	3.2	32	1.8
Medium sand	21	-0.9	34	-1.2	17	2.9
Coarse sand	0	0	3.2	-0.6	1.4	1.4

### 3.8. Характеристика литодинамических процессов акватории ПТС

Проведенные измерения проиллюстрировали естественный ход литодинамических процессов – движение взвешенного материала через акваторию входного участка КМК. По сути, этот район является транзитным, но оцененная в работе разница в условиях транзита позволяет сделать предположения об общем характере взвесеperеноса. Илистый материал транзитом выносится из залива в море, очень мелкий песок характеризуется поступательно-возвращательным движением и может как выноситься, так и заноситься обратно в залив, при этом очень мелкий песок не откладывается в зоне конечного депонирования. Отложения нагонной дельты состоят в основном из мелкого и среднего песка с незначительным содержанием крупного. Их

источником служит вдольбереговой поток взвешенных наносов, но все же, движение этих размерностей характеризуется как поступательно-возвращательное, поэтому при высокой интенсивности водообмена отложения нагонной дельты могут вновь вовлекаться в перенос и выносятся обратно в море.

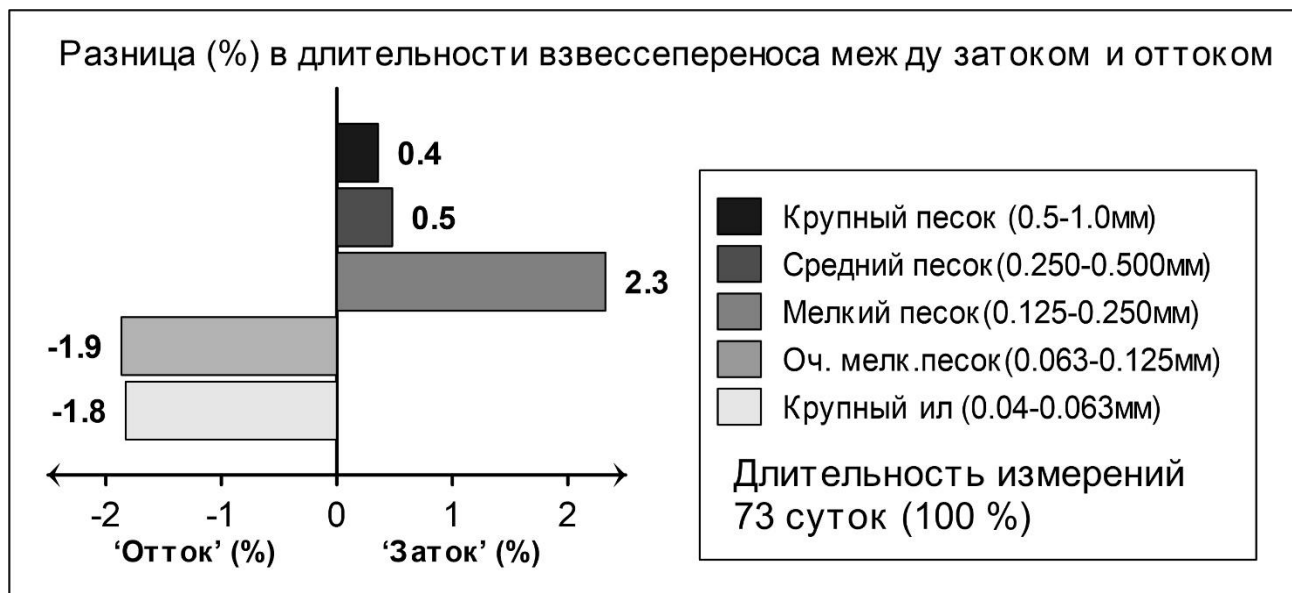


Рисунок 3.10 – Процентное значение разницы между длительностью взвесеperеноса актов затока и оттока за 73 суток проведенных измерений (отрицательные значение – преобладание оттока, положительные – преобладание затока)

Низкое содержание мелкого и среднего песка в наносоуловителях соответствует тому, что в периоды измерений не были зафиксированы достаточные скорости водного потока для массового переноса этого вида взвеси.

Нагонная дельта, свойственная модели осадконакопления море-пролив-эстуарий, существует и испытывает небольшой прирост [Закиров, Чубаренко, 2019]. Но скорость прироста так мала, что не может обеспечивать формирование этой дельты в том объеме, который существует в настоящее время. Факт наличия регулярного дноуглубления на входном участке КМК может объяснять медленные скорости развития дельты в настоящее время. Видимо, основной поток морских песчаных наносов перехватывается дноуглублением еще на подступах к зоне конечного депонирования, что, по всей видимости, замедляет ее развитие.

Придерживаясь эстуарной модели осадконакопления можно предположить, если нагонная дельта в дальнейшем будет активно развиваться, то со временем она еще больше увеличится в размерах и тогда поток морских наносов напрямик устремится в рукав Калининградского морского канала.

### 3.9. Выводы

1. Обмен массой и энергией между заливом и морем определяется колебаниями уровня моря (коэффициенты корреляций от 0.84 до 0.98), для оценки интенсивности водообмена ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) с хорошей точностью можно использовать временную серию колебаний уровня моря на входном участке КМК (см. формулы 1, 2).

2. Донные осадки нагонной дельты состоят в основном из мелкого и среднего песков, исходя из этого она подпитывается преимущественно этими фракциями. Инструментально зафиксировано, что в сезонных условиях «летнего затишья» над нагонной дельтой водным потоком переносится илистая, *очень мелкая* и *мелкая песчаная взвесь*, отсутствие переноса *среднего* песка указывает на кратковременность процесса восполнения нагонной дельты этой размерностью.

3. Движение взвешенных наносов через акваторию входного участка КМК осуществляется как при заторах, так и при оттоках. По сути, она является в большей степени транзитной, только разница в условиях при оттоках и заторах позволяет предположить общий характер седиментообмена. Илистая и мелкая песчаная взвесь преимущественно выносятся из залива в море, а мелкая, средняя и крупная песчаные фракции наоборот, заносятся в залив.

## **Глава 4. Разработка рекомендаций по хозяйственному освоению песчаных запасов**

На современном этапе развития ПТС входного участка КМК дноуглубление выступает главной управляющей компонентой, оно не только поддерживает условия судоходства, но регулирует энерго- и массообмен между заливом и морем. В данной главе пересматривается современная схема утилизации извлеченного в ходе дноуглубления материала, а для отложений нагонной дельты разработана схема использования ее материала в хозяйственных целях.

### **4.1. Исходные данные и методы**

#### *4.1.1. Методы лабораторного анализа*

В ходе исследования часть отобранного в точках В1-В6 материала была передана на геохимический и гранулометрический анализ в центр лабораторного анализа и технических измерений по Калининградской области (ЦЛАТИ). В пробах определялось содержание нефтепродуктов и тяжелых металлов. В одной пробе, отобранной в пределах нагонной дельты (В2), дополнительно определялось содержание опасных веществ. Распределение загрязняющих веществ в отложениях нагонной дельты (В1, В2) оценивалось по отношению к предполагаемому источнику загрязнения – отложениям Калининградского/Вислинского залива (В5) и отложениями Калининградского морского канала (В6). Результаты пробоотбора в точках В3 и В4 в разделе не рассматриваются по причине значительной удаленности района пробоотбора точки В3 от района исследования и изначально чистого состава морских отложений в точке В4.

Для сравнения отложений нагонной дельты с отложениями морского пляжа Балтийской косы состав материала пробы В2 определялся по широко применяемой в отечественной практике десятичной гранулометрической шкале. Ситовым методом были определены следующие гранулометрические размерности: крупный гравий (5.0 - 10.0 мм); мелкий гравий (2.0 - 5.0 мм); грубый

песок (1.0 до 2.0 мм); крупный песок (0.50 - 1.0 мм); средний песок (0.25 - 0.50 мм); мелкий песок (0.10 - 0.25 мм); илистый материал < 0.10 мм.

#### 4.1.2. Оценка загрязненности

Оценка загрязненности донных осадков выполнялась по региональному нормативу «Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга», на основе этого документа донным отложениям присваивается класс, степень и уровень загрязненности (таблица 4.1). Приведенные в документе нормы и критерии (таблица 4.2) широко применяются в отечественной дноуглубительной практике и распространяются на все типы извлекаемых при дноуглубительных работах донных отложений и при решении вопросов дальнейшего использования этих отложений в хозяйственных целях: намыв территорий, сброс в водные объекты, складирование в специально оборудованные отвалы с выполнением комплекса защитных мероприятий [Нормы и критерии, 1996]. В 2015 г на основании этого документа фарватер КМК был поделен на участки, исходя из этого деления чистые донные отложения сбрасываются на морском отвале в открытом море, а загрязненные рефулируются на острова-дамбы [Заключение №188..., 2015].

Таблица 4.1 – Классификация извлекаемых донных отложений [Нормы и критерии, 1996]

Классификация загрязненности	Степень загрязненности	Уровень загрязненности
Класс IV.	Опасно загрязненные отложения	Уровень вмешательства
Класс III.	Сильно загрязненные отложения	
Класс II.	Умеренно загрязненные отложения	Проверочный уровень
Класс I.	Слабозагрязненные отложения	Предельный уровень
Класс 0.	Чистые отложения	Целевой уровень

Таблица 4.2 – Предельные содержания загрязняющих веществ по классификации регионального норматива [Нормы и критерии..., 1994]

Наименование показателя	Целевой уровень	Предельный уровень	Проверочный уровень	Уровень требующий вмешательства
Группа 1. Опасные вещества				
Бенз(а)пирен, мг/кг	1	1	10	40
Полихлорированные бифенилы (ПХБ), мг/кг	0.02		0.2	1
Гексахлорбензол, мг/кг	0.025	0.004	0.02	
Альфа-ГХЦГ, мг/кг	0.0025		0.02	
Гамма-ГХЦГ(линдан), мг/кг	0.00005	0.001	0.02	
2,4'-ДДД, 4,4'-ДДД, 2,4'-ДДЕ, 4,4'ДДЕ (суммарно), мг/кг	0.0025	0.01	0.02	4
Группа 2. Тяжелые металлы и нефтепродукты				
Цинк (Zn), мг/кг	140	480	720	720<
Медь (Cu), мг/кг	<35	35	90	190
Хром (Cr), мг/кг	100	380	380	380
Свинец (Pb), мг/кг	85	530	530	530
Кадмий (Cd), мг/кг	0.8	2	7.5	12
Никель (Ni), мг/кг	35	35	45	210
Ртуть (Hg), мг/кг	0.3	0.5	1.6	10
Мышьяк (As), мг/кг	29	55	55	55
Нефтепродукты, мг/кг	180	1000	3000	5000

*Целевой уровень* - донные отложения считаются чистыми, относятся к классу 0 и могут без ограничений использоваться для намыва территорий, отвала в водные объекты и любых других целей. *Предельный уровень* - максимально приемлемый риск как для здоровья людей и природы, принадлежат классу I, считаются слабозагрязненными и могут использоваться только для намыва территорий. В особых случаях, значения не превышают допустимого уровня,

разрешается их сброс в водные объекты. *Проверочный уровень* - могут оказывать негативное воздействие на чистую водную среду, принадлежат классу II, считаются умеренно загрязненными и могут использоваться для намыва территорий под строительство промышленно-коммунальных зон. *Уровень, требующий вмешательства* - принадлежат классу III, считаются опасно загрязненными, сюда же можно отнести класс IV, донные отложения класса III и IV необходимо хранить только в специально оборудованном отвале или подлежат переработке. При извлечении и складировании донных отложений классов III и IV должна проводиться оценка воздействия на окружающую среду, а также долгосрочный мониторинг очищаемых водных объектов и отвалов загрязненных донных отложений [Нормы и критерии, 1996].

#### **4.2. Загрязненность осадков**

По содержанию тяжелым металлов отмечено уменьшение концентраций цинка (Zn), мышьяка (As), меди (Cu), ртути (Hg), хрома (Cr) и нефтепродуктов по направлению из залива в море. Содержание кадмия (Cd), никеля (Ni) и свинца (Pb) в донных осадках нагонной дельты (B2) находятся либо на одном уровне, либо эти значения выше концентраций в заливе, что объясняется естественным фоном (таблица 4.3). Общее содержание тяжелых металлов в донных осадках акватории ПТС находится в допустимых пределах. Больше всего отложения содержат никеля (Ni) (от 32 до 35 мг/кг) затем, по мере уменьшения максимальных значений следует хром (Cr) (от 7.3 до 39 мг/л), свинец (Pb) (от 21 до 24 мг/кг), цинк (Zn) (от 7.5 до 28 мг/кг), медь (Cu) (от 1.7 до 8.2 мг/кг), мышьяк (As) (от 0.05 до 1.9 мг/кг), кадмий (Cd) (от 0.064 до 0.094 мг/кг), ртуть (Hg) (от 0.0073 до 0.029 мг/кг). Содержание нефтепродуктов (от 40 до 179 мг/кг) находится в допустимых пределах, но в заливе эти значения приближаются к пороговой отметке. Содержание опасных веществ в отложениях аккумулятивной области нагонной дельты находится в пределах значений целевого уровня (таблица 4.4).

По критериям регионального норматива материал затопленной нагонной дельты относится к классу 0 и считается чистым, донные отложения этого класса могут без ограничений использоваться для намыва территорий, отвала в водные объекты и в других хозяйственных целях.

Таблица 4.3 – Содержание тяжелых металлов в поверхностном слое донных осадков (точки пробоотбора В1 – В6)

Район отбора пробы	Глубина, м	Цинк (Zn), мг/кг	Медь (Cu), мг/кг	Хром (Cr), мг/кг	Свинец (Pb), мг/кг	Кадмий (Cd), мг/кг	Никель (Ni), мг/кг	Ртуть (Hg), мг/кг	Мышь (As), мг/кг	Нефтепродукты, мг/кг
В1 (нагонная дельта)	4.5	20	1.9	29	23	0.078	37	0.005	1.1	40
В2 (нагонная дельта)	1	24	2.3	39	24	0.094	35	0.0073	3.7	40
В4 (морское побережье Вислинской косы)	5	7.5	1.7	7.3	24	0.064	33	0.01	0.05	40
В5 (о. Насыпной)	4	28	8.2	32	21	0.077	32	0.029	1.9	179
В6 (южная бровка КМК)	2	16	1.11	22	18	0.062	25	0.09	1.5	156
Целевой уровень		140	35	100	85	0.8	35	0.3	29	180

Таблица 4.4 – Содержание опасных веществ в осадках нагонной дельты (В2)

Точка пробоотбора	Бензапирен, мг/кг	Полихлорированные бифенилы, мг/кг	Гексахлорбензол, мг/кг	Альфа-ГХЦГ, мг/кг	Гамма-ГХЦГ(линда), мг/кг	2,4'-ДДД, 4,4'-ДДД, 2,4'-ДДЕ, 4,4'-ДДЕ(суммарно), мг/кг
В2	0.005	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002
Целевой уровень	1	0.02	0.025	0.0025	0.005	0.0025



### 4.3. Схема хозяйственного освоения песчаных запасов

В условиях эксклавноности Калининградской области возрастает потребность в поиске и разведке новых источников полезных ископаемых для восполнения региональной минерально-сырьевой базы [Загородных, 2005]. На региональном уровне в строительной индустрии и берегозащите природный песок самый востребованный материал, помимо этого, для решения вопросов берегозащиты необходим определенный по крупности и составу песок, который невозможно найти в чистом виде на суше [Ялтанец, 2011]. Известные запасы такого песка на подводных месторождениях Калининградской области находятся на приличном расстоянии от берега [Блажчишин, Болдырев, 1999], их разработка будет экономически затратной, поэтому автором предложена схема разработки отложений затопленной нагонной дельты для дальнейшего использования этого материала в хозяйственных целях (рисунок 4.1).

По данным пробоотбора отложения нагонной дельты (точка В2) содержат 44 % среднего песка (0.25 - 0.50 мм), 42 % мелкого песка (0.1 – 0.25 мм), 12% алеврита и пелита (<0.10 мм) и 1 % крупного песка (рисунок 4.2). Высокое содержание мелкого песка в аккумулятивной области нагонной дельты (39%) не соответствует содержанию этой размерности в отложениях морского пляжа (10%), но несмотря на это в окрестностях акватории ПТС мелкий песок самый инертный материал, он в больших количествах содержится, как в морских отложениях, так и в заливе, поэтому его использование при намыве пляжа допустимо [Ялтанец, 2011]. Аккумулятивные отложения нагонной дельты (В2) на 50% состоят из среднего песка, что делает их еще более пригодными для намыва на пляж – по данным [Bobykina et. al. 2018] пляжные отложения содержат более 40% среднего песка (0.25 - 0.50 мм).

С целью компенсации негативных литодинамических процессов на абразионном участке берега автором предлагается направить для намыва пляжа те объемы песка, которые перехватываются в результате дноуглубления и не доходят до зоны конечного депонирования. В основу этой рекомендации лежит

ранее предлагаемый сотрудниками ИОРАН способ рефулирования песка пряником в основание южного мола [Чечко и др., 2008].

Материал затопленной нагонной дельты предлагается добывать гидромеханизированными способами и временно складировать на еще не освоенных площадях северного берега КМК (рисунок 4.1).

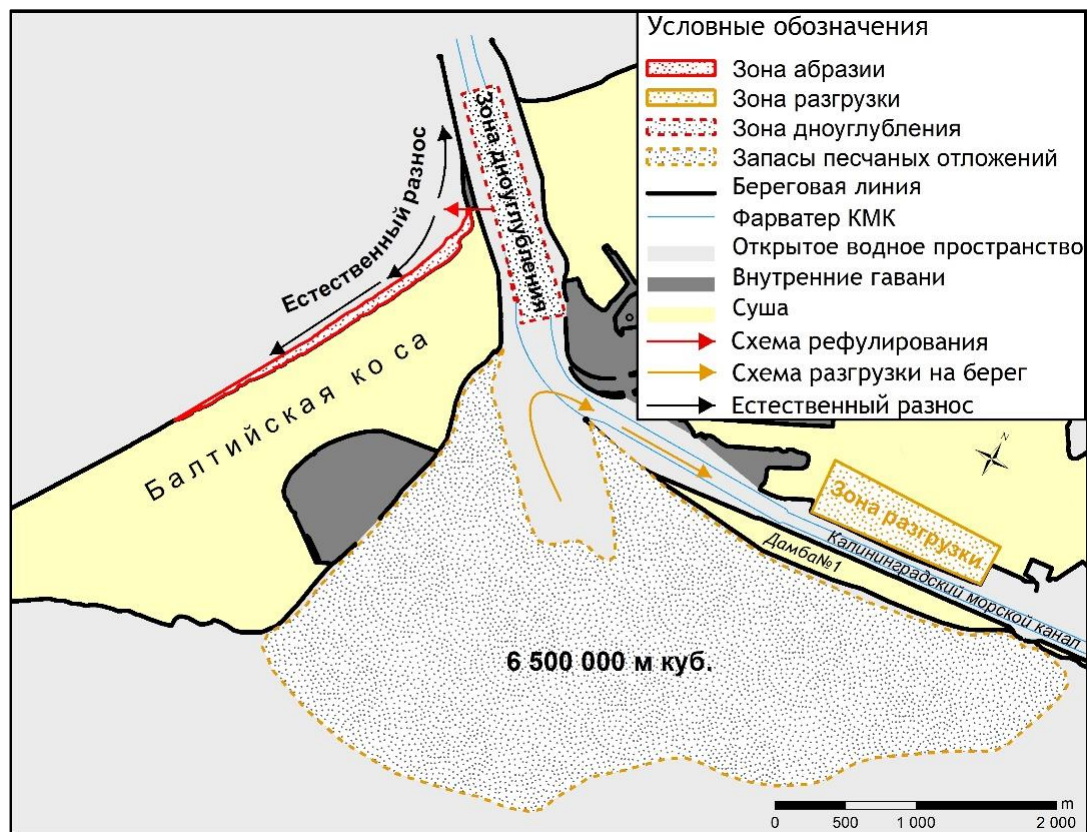


Рисунок 4.1 – Схема доставки извлекаемого на входном участке КМК песчаного материала к месту берегоукрепления и схема доставки отложений нагонной дельты на условную береговую зону разгрузки

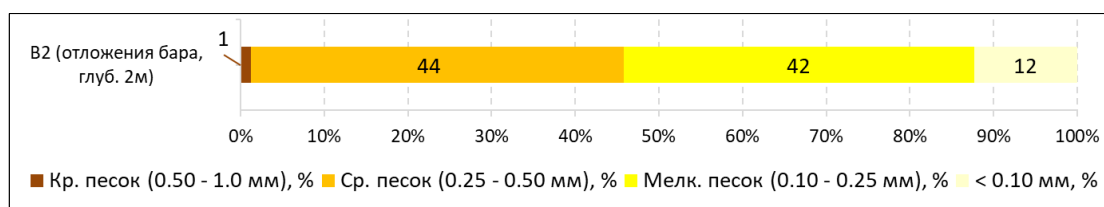


Рисунок 4.2 – Гранулометрический состав отложений аккумулятивной области затопленной нагонной дельты (по десятичной гранулометрической шкале)

#### 4.4. Выводы

Содержание тяжелых металлов, нефтепродуктов и опасных веществ в отложениях аккумулятивной области нагонной дельты не превышают допустимых значений, поэтому они считаются чистыми и могут без ограничений использоваться для намыва территорий, отвала в водные объекты и в других хозяйственных целях.

Материал в пределах нагонной дельты по своему гранулометрическому составу соответствует составу пляжных наносов [Вобукина et. al. 2016], поэтому может использоваться при гидростроительстве и защите берега – современный объем нагонной дельты (естественно восполняемой аккумулятивной области) оценивается в 6 500 000 м<sup>3</sup> (за исследуемый 7 летний период он увеличился на 400 000 м<sup>3</sup>).

Ныне существующую технологическую цепочку по утилизации чистого материала дноуглубления (объем которого неминуемо будет возрастать при дальнейшем развитии ПТС входного участка КМК) целесообразно пересмотреть с учетом возможной компенсации абразионных процессов на морском побережье Балтийской косы в соответствии с предложениями АО ИОРАН [Чечко и др., 2008].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. ПТС входного участка КМК исторически формировалась с начала XVI в. по XX вв. путем поочередного введения в эксплуатацию гидротехнических объектов ПТС с попеременным нарастанием межсистемных связей между компонентами антропогенной и природной подсистем. По совокупности природных и техногенных признаков в развитии ПТС выделено четыре этапа коэволюции. На первом этапе закрепление берегов пролива (1510-1767 гг.) спровоцировало усиление промывного режима, углубление пролива с 3 до 7 м, образование песчаных банок с морской стороны протоки. На втором этапе строительство входных молов (1768-1887 гг.) нарушило литодинамическое равновесие морского берега, активизировалась береговая абразия южнее молов и аккумуляция севернее; на третьем этапе введены в эксплуатацию Морской канал и Гидрогавань (1889-1938 гг.), гидротехнические сооружения за время третьего этапа приняли современный вид, пролив был искусственно углублен до 9 м, в связи с чем усилилась заносимость, активизировался рост песчаной отмели в заливе. На четвертом этапе (с 1938 г – наши дни) происходит модернизация ПТС, развиваются инфраструктура Морского канала (входные молы, портовые терминалы и внутренние гавани, подходы к ним).

2. Главная задача ПТС входного участка КМК - обеспечение порта Калининград транспортной доступностью современной емкости, но при этом она еще выполняет регуляторные функции для экосистемы всего Калининградского залива – регулирует энерго- и массообмен между заливом и морем. В качестве управляющего фактора в составе ПТС выделено дноуглубление, благодаря которому обеспечивается функционирование КМК и регулируются экосистемные параметры сопредельных акваторий. Современные границы ПТС выражаются зонами взаимодействия ее технической и природной подсистем: морская – 16 км<sup>2</sup>, заливная – 14 км<sup>2</sup>, исходя из этого общая площадь ПТС входного участка КМК составляет 30 км<sup>2</sup>.

3. Нагонная дельта, аналогично приливной [Hayes, 1979], сформировалась при взаимодействии входных потоков пролива с вдольбереговым потоком наносов. Она служит зоной конечного депонирования для морского песчаного материала, ее отложения состоят из мелкого (40-85%) и среднего (4-51%) песка с низким содержанием крупного (>1%), исходя из этого она подпитывается преимущественно этими фракциями.

4. За исследуемый 9-летний период (2008-2016 гг.) эрозионная депрессия увеличивалась в объеме со скоростью 2500 м<sup>3</sup>/год, на 2016 г. ее объем (ниже изобаты 12 м) составил 1 130 000 м<sup>3</sup>. Поле рифелей на входном участке КМК не исчезает в течении года, изменяется только положение гребней. Нагонная дельта за исследуемый 7 летний период (2012 – 2019 гг.) прибавила примерно 400 000 м<sup>3</sup> (+15 см).

5. Обмен массой и энергией между заливом и морем определяется колебаниями уровня моря (коэффициенты корреляций от 0.84 до 0.98), для оценки интенсивности водообмена (м<sup>3</sup>/с) с хорошей точностью можно использовать временную серию колебаний уровня моря на входном участке КМК (см. формулы 1, 2).

6. Движение взвешенных наносов через входной участок КМК осуществляется как при затоках, так и при оттоках. По сути, она является в большей степени транзитной системой, только разница в условиях при оттоках и затоках позволяет предположить общий характер седиментообмена. Илистая и мелкая песчаная взвесь преимущественно выносятся из залива в море, а мелкая, средняя и крупная песчаные фракции наоборот, заносятся в залив.

7. Инструментально зафиксировано, что в сезонных условиях «летнего затишья» над нагонной дельтой водным потоком переносилась илистая, *очень мелкая* и *мелкая песчаная взвесь*, отсутствие переноса *среднего* песка указывает на кратковременность процесса восполнения нагонной дельты этой размерностью.

8. Содержание тяжелых металлов, нефтепродуктов и опасных веществ в отложениях аккумулятивной области нагонной дельты не превышают допустимых значений, поэтому они считаются чистыми и могут без ограничений использоваться для намыва территорий, отвала в водные объекты и в других хозяйственных целях.

9. Материал в пределах нагонной дельты по своему гранулометрическому составу соответствует составу пляжных наносов [Вобукина et. al. 2016], поэтому может использоваться при гидростроительстве и защите берега – современный объем нагонной дельты (естественно восполняемой аккумулятивной области) оценивается в 6 500 000 м<sup>3</sup> (за исследуемый 7 летний период он увеличился на 400 000 м<sup>3</sup>).

10. Ныне существующую технологическую цепочку по утилизации чистого материала дноуглубления (объем которого неминуемо будет возрастать при дальнейшем развитии природно-технической системы входного участка КМК) целесообразно пересмотреть с учетом возможной компенсации абразионных процессов на морском побережье Балтийской косы в соответствии с предложениями АО ИОРАН [Чечко и др., 2008].

## 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. Деятельность России в прибрежной зоне моря и проблемы экологии. М.: Наука, 2005.
3. Акимова Т.А., Кузьмин А.П., Хаскин В.В. Экология. Природа – Человек – Техника. М.: ЮНИТИ- ДАНА, 2001. 343 с.
4. Александров С. В., Горбунова Ю. А. Продукция фитопланктона и содержание хлорофилла в эстуариях различного типа //Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. – 2012. – №. 1. – С. 90-98.
5. Александров С.В., Жигалова Н.Н., Зезера А.С. Многолетняя динамика зоопланктона в юго-восточном районе Балтийского моря // Биология моря. 2009. Т. 35. № 4. С. 241–248.
6. Анциферов С.М., Косьян Р.Д. Взвешенные наносы в верхней части шельфа. М.: Наука. 1986. 224 с.
7. Афанасьев, В. В., Уба А. В., Левицкий А. И. Миграция проливов и морское осадконакопление в лагунах // Геосистемы переходных зон. – 2019. – Т. 3. – № 3. – С. 310-317. – DOI 10.30730/2541-8912.2019.3.2.310-317. – EDN CUJKVR.
8. Бабаков А.Н. Вдольбереговой транспорт наносов в пределах восточного побережья Гданьского залива и “абразионный” критерий оценки итогового переноса наносов. Обзор. Калининград: АО ИО РАН, 2017. 9 с.
9. Бабаков А.Н. Динамика осадочного вещества в береговой зоне моря // Нефть и окружающая среда Калининградской области. Том 2. Море. Раз.1.2. Калининград: Терра Балтика, 2012. С.37-59.

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. Географ. фак-т. КГУ.2003г. 273 с.

11. Бабаков А.Н. Чубаренко Б.В. Структура результирующего вдольберегового транспорта наносов в восточной части Гданьского залива // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, №4. С. 370–384.

12. Балтийск. // Пиллау – Балтийск. Прошлое и настоящее. – Калининград: ГИПП «Янтарный сказ», 2000. – 112 с.

13. Балтийская коса: природа, история, современность / Е. Е. Шалагинова, М. А. Шмутинский, В. А. Цветков, Н. С. Борисова. – Калининград: Янтарный сказ, 2009. – 288 с. ISBN 978-5-7406-1044-3

14. Барабошкин Е. Ю. Практическая седиментология (терригенные коллектора) // Томск: ТПУ. – 2007.

15. Басс О. В. Эволюция взаимодействия природных и техногенных процессов в ходе строительства порта Балтийск // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2007. - №7. - С. 35-43.

16. Басс О. В., Жиндарев Л. А. Техногенез в береговой зоне песчаных побережий внутренних морей (ст. 2. Влияние портовых оградительных сооружений на морфодинамику береговой зоны Юго-Восточной Балтики) // Геоморфология. 2011. № 2. С. 35-41.

17. Басс О.В. Воздействие техногенных факторов на морфолитодинамические процессы прибрежной зоны юго-восточной Балтики // дисс. канд. геогр. наук: 25.00.28. Калининград, 2006. 162 с.

18. Белошапков А.В., Белошапкова С.Г., Брасавс Г.Х. Особенности динамики наносов на западном побережье Самбийского полуострова // Строение шельфа морей СССР как основа оценки инженерно-геологических условий. Сб. науч. тр. ВНИИ моргео. Рига. 1984. С. 42-45.



19. Блажчишин А.И., Болдырев В.Л. 1999. Ресурсы инертных материалов на Калининградском побережье // Экологические проблемы Калининградской области и юго-восточной Балтики. Калининград: КГУ. С. 76-79.
20. Бобыкина В. П., Карманов К. В. Динамика берегов вершины Гданьского залива и связь с антропогенным воздействием //Создание искусственных пляжей, островов и других сооружений в береговой зоне морей, озер и водохранилищ: тр. междунар. конф. Новосибирск. – 2009. – С. 119-124.
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. – DOI 10.7868/S0321059615030025. – EDN TPWYXL.
22. Богданов Н. А., Ермолаев Б. В., Басс О. В., Паранина А. Н. Ртуть в донных осадках акватории и в устьях рек: Калининградский залив // Геосферные исследования. – 2020. – № 2. – С. 76-82. – DOI 10.17223/25421379/15/6.
23. Богданов Н.А., Басс О.В., Савостина О.А., Ермолаев Б.В., Ляпунов С.М. Тяжёлые металлы и «чернобыльский след» в донных отложениях внутреннего водоёма: Калининградский залив. Гигиена и санитария. 2021;100(3):208-217. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-3-208-217>
24. Богданов Н.А., Воронцов А.А., Морозова Л.Н. Тенденции химического загрязнения и динамика Калининградского залива. Водные ресурсы. 2004; 31(5): 576–90.
25. Болдырев В. Л., Бобыкина В. П., Чубаренко Б. В., Бурнашов Е. М., Карманов К. В. Абразионные процессы на берегах Юго-Восточной Балтики // Учение о развитии морских берегов: вековые традиции и идеи современности: Материалы конф. в честь 100-летия проф. В.П. Зенковича. (г. Санкт-Петербург, 5-9 окт. 2010 г.): Изд-во РГГМУ, 2010. ISBN 978-5-86813-283-4. С. 54-55

26. Болдырев В.Л. Калининградское побережье Балтики с позиций комплексного народохозяйственного освоения // Береговая зона моря. АН СССР. М.: Наука, 1981. С. 126 - 133.
27. Большой энциклопедический словарь Калининградской области. – Калининград: Аксиос, БалТАГП, 2011. – 456 с. Электронная версия с исправлениями: [http://gako2006.narod.ru/bolshoy\\_slovar/index.htm](http://gako2006.narod.ru/bolshoy_slovar/index.htm).
28. Бондаренко В. Л., Лещенко А. В., Меженский В. И. Природно-технические системы в природоохранном обустройстве бассейновых геосистем // НАУ. 2015. №2-3 (7). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prirodno-tehnicheskie-sistemy-v-prirodoohrannom-obustroytve-basseynovyh-geosistem> (дата обращения: 22.07.2022).
29. Бондаренко В. Л., Лещенко А. В., Поляков Е. С. Методологические подходы к оценке экологически устойчивого функционирования природно-технических систем «Природная среда - Объект деятельности - Население» // Природообустройство. 2013. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-podhody-k-otsenke-ekologicheskii-ustoychivogo-funktsionirovaniya-prirodno-tehnicheskikh-sistem-prirodnaya-sreda> (дата обращения: 22.03.2022).
30. Бондарик Г.К., Ярг Л.А. Инженерно-геологические изыскания. М.: КДУ, 2011. 418 с.
31. Бондарик Г.К. Экологическая проблема и природно-технические системы. М.: Икар, 2004. 152 с.
32. Бровко П. Ф., Лымарев В. И. Основы береговедения // Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 1997. – 112 с. – ISBN 5-7444-0778-2. – EDN YCXQXV.
33. Буданова Т.Е., Озмидов О.Р., Озмидов И.О. Современные методы изучения гранулометрического состава грунтов // Инженерные изыскания. 2013. № 8. С. 66-73.

34. Бурнашов Е.М. Современная динамика морского побережья Калининградской области по данным ежегодных мониторинговых исследований // Вопросы современной науки и практики, Университет им. В.И. Вернадского. Тамбов: Тамбовский госуниверситет, 2011. №2. С. 10-17.
35. Введенский А.Р., Дианский Н.А., Кабатченко И.М., Литвиненко Г.И., Резников М.В., Фомин В.В. Расчет и анализ ожидаемого воздействия гидротехнического сооружения на экологическую обстановку и донную топографию акватории при строительстве подходного канала к порту Сабетта // Вестник МГСУ. 2017. Вып. 12, №5. С. 480–489.
36. География Янтарного края России / Под ред. В.В. Орленка. – Калининград: ГИПП «Янтарный сказ», 2004. – 416 с.
37. Географический атлас Калининградской области. – Калининград: Изд-во КГУ: ЦНИТ, 2002. – 276 с.
38. Гидрометеорологический режим Вислинского залива / Под ред. Н.Н. Лазаренко и А. Маевского.– Ленинград: Гидрометиздат, 1971. – 279 с.
39. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Справочник. Т.1. Балтийское море. Вып.3. Куршский и Вислинский заливы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. 71 с.
40. Гуменюк И.С., Шванковска Б., Сташкевич А., Кушевски В., Коба Р. Калининградский/Вислинский залив и окружающие территории в планах территориального развития Калининградской области // Пространственное планирование как инструмент координации развития портов и гаваней Калининградского/Вислинского залива. Калининград, 2015. С. 52–62.
41. Денисов, В.В. Эколого-географические основы устойчивого природопользования в шельфовых морях / В.В. Денисов-Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2002. – 502 с.

42. Довыденко Л.В. 60 лет ЗАО «Гидрострой» Калининградской области. Калининград: ФГУП «Издательство и типография газеты «Страж Балтики», Минобороны России, 2016. 120 с.
43. Довыденко Л.В. Калининградский морской канал. Калининград: ООО «Живем», 2011. 197 с.
44. Домнин Д. А. Результаты эхолотной съемки песчаной отмели на входе в Калининградский залив (19.06.2012). / Фондовые материалы АОИОРАН. 2019
45. Дорохов Д.В., Дорохова Е.В. Результаты эхолотной съемки Калининградского морского канала (29.11.2021). / Фондовые материалы АОИОРАН. 2022.
46. Евченко С.В., Домнин Д.А., Пилипчук В.А. Российская часть Калининградского/Вислинского залива. // Каталог малых портов и гаваней Калининградского/Вислинского залива. / Под ред. Чубаренко Б.В., Шванковска Б., Федорова Г.М., Гриценко В.А. – М.: Изд-во «Экслибрис». – 2015. С. 20-42.
47. Загородных В.А., Кунаева Т.А. Геология и полезные ископаемые Калининградского региона. Калининград, 2005. 208 с
48. Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В. Входной участок Калининградского залива как природно-техническая система / Российский журнал прикладной экологии. – 2022. – № 1. – С. 48-59. – DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.1.48.59>
49. Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В. Морфометрические характеристики подводного песчаного бара на входе в Калининградский залив как индикаторы гидродинамической структуры водообмена залива с морем // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Севастополь, 22- 26 апреля 2019 г. [Электронный ресурс]. Севастополь: ФГБУН МГИ, 2019, С. 276-278. [http://mhiras.ru/news/news\\_201904151055.html](http://mhiras.ru/news/news_201904151055.html)

50. Закиров Р. Б., Чубаренко Б. В., Сологуб С. П., Шушарин А. В. Динамика эрозионной депрессии на входе в Калининградский залив // Известия Иркутского государственного университета. Серия: науки о Земле. – №26.– 2018.– С. 46-59

51. Закиров Р.Б., Чубаренко Б.В., Чечко В.А. Геоэкологическая оценка песчаных отложений бара на входе в Калининградский-Вислинский залив // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 8(110). Ч1. – С. 192-198. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.110.8.032>

52. Заключение № 188 экспертной комиссии государственной экологической экспертизы материалов «Экологическое обоснование хозяйственной деятельности по поддержанию проектных глубин на акватории морского порта Калининград в 2015-2024 гг. I очередь. Поддержание проектных глубин в период 2015-2016 гг. // СПб: департамент Росприроднадзора по СЗФО. – 2015. – 35 с.

53. Зеняускайте А. А. Проблемы рациональное природопользование на морском побережье Калининградской области // Научный электронный журнал «Академическая публицистика». – 2020. – С. 525.

54. Исаев С.В. Концепция природно-технических систем и ее использование при изучении антропогенной трансформации природной среды // Географический вестник. 2016. №3. С. 105–113. doi: 10.17072/2079-7877-2016-3-105-113.

55. Кнапс Р.Д. О принципах компоновки оградительных сооружений на песчаных побережьях // Сб. науч. Трудов ЛенморНИИпроект Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации береговых сооружений и морского транспорта. М.,1979. С. 3-16.

56. Кнапс Р.Д. Оградительные сооружения типа молов и движение наносов на песчаных побережьях // Изв. АН Латв. ССР. 1952. № 6 (59). С. 87-130.

57. Кнапс Р.Я. Перемещение наносов у берегов восточной Балтики // Развитие морских берегов в условиях колебательных движений земной коры. Таллин: Вальгурс, 1965. С 21-29.
58. Кнапс. Р.Д. Влияние неровностей контура берега и вдольбереговое перемещение наносов // Baltica. 1982. Вып 7. Vilnius. С. 195-202.
59. Кононенко М., Шилин М. Б. Стратегии планирования в комплексном управлении прибрежной зоной // [Текст]. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2003.-151 с.
60. Кочешкова О. В. Полихеты Вислинского залива (Балтийское море): формирование видового состава и адаптации видов к условиям эвтрофной солоноватой лагуны: Дисс. на соиск. уч. ст. канд. биологических наук, Санкт-Петербург, 2006. 171 с.
61. Кравченко Г.Г., Габова К.В. Седиментационная модель средне-позднеоксфордских отложений Казанской группы месторождений по результатам исследования керна (западная Сибирь) / Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 11. 45–56
62. Куликов А. В., Корнюшенков Г. В., Чемакин Д. А. Проблемы и перспективы развития Калининградской области: монография. – Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2012. – 161 с.
63. Кушевски В., Люкс К., Чубаренко Б.В., Гуменюк И.С., Баранова Ю.В., Кошелев В.Н. Возможные сценарии устойчивого развития // Регион Калининградского/Вислинского залива: современное состояние и сценарий развития. Калининград: БФУ им. И. Канта, 2014. С. 187–195.
64. Лазаренко Н.К., Маевский А.П. Гидрометеорологические условия Вислинского залива. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 178 с.
65. Левкевич В.Е. Крепление берегов и верховых откосов подпорных сооружений гидроузлов Беларуси. Минск: БНТУ, 2019. 172 с.

66. Леонтьев И.О. Прогнозирование развития берега в масштабе столетия (на примере Вислинской (Балтийской) косы) // Океанология. 2012.Т. 52. № 5. С. 757-767.
67. Лымарев, В.И. Береговое природопользование. Вопросы методологии, теории, практики [Текст] / В.И. Лымарев. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2000.-166 с.
68. Мамаева М.А., Жигульский В.А., Царькова Н.С., Шилин М.Б. Экологическая стратегия развития морского портового комплекса в Лужской губе // Биосфера. 2016. №4. С. 381–389.
69. Мазур И.И., Молдаванов О.И. Курс инженерной экологии. М.: Высшая школа, 2001. 510 с.
70. Михайленко Р.Р. Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений как природно-техническая система для интегрированного управления водными ресурсами: социальная, экономическая и экологическая значимость // Биосфера. 2015. Т. 7, №1. С. 1–25.
71. Михневич Г. С., Лосева В. М. Классификация геологических и инженерно-геологических факторов экологического риска в прибрежной зоне Калининградской области //Геопространственные исследования общественных и природных систем: теория и практика. – 2019. – С. 115-123.
72. Науменко Е. Н., Хлопников М. М., Рудинская Л. В. Потоки энергии в экосистеме Вислинского (Калининградского) залива Балтийского моря //Журнал Сибирского федерального университета. Биология. – 2012. – Т. 5. – №. 2. – С. 184-202.
73. Науменко, Е. Н. Структурно-функциональная организация зоопланктона Куршского и Вислинского заливов Балтийского моря: специальность 03.00.18: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук / Науменко Елена Николаевна. – Санкт-Петербург, 2009. – 42 с.

74. Новиков Г.А. Основы общей экологии и охраны природы: - Ленинград: Изд-во ЛГУ, 1979. - 350 с.
75. Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга. Региональный норматив, утвержден центром Государственного комитета санитарно-эпидемиологического надзора Санкт-Петербурга и Государственным комитетом по охране окружающей среды и природных ресурсов Санкт-Петербурга и Ленинградской области. – СПб.: ОАО "Ленморниипроект".- 1996.- 13 с.
76. Носкова Е.Д. Морские заливы Калининградской области. – Калининград: Книжн. изд-во, 1978.– 63 с.
77. Огнев А.О. Системный подход в науках о Земле / А.О. Огнев - М.: Изд-во ИКиП, 2006.
78. Огнев, А.О. Основы системологии: учеб. пособие / А.О. Огнев. – 2-е изд. – Тольятти : ТГУ, 2008. – 254 с
79. Пака В.Т., Набатов В.Н., Кондрашов А.А., Корж А.О., Подуфалов А.П., Облеухов С.Д., Голенко М.Н., Щука С.А. Об усовершенствовании инклинометрического измерителя скорости придонных течений // Океанологические исследования, 2019, Том 47, № 2, С. 220–229
80. Пендин В. В., Невечеря В. В. Структура локальных исторических природнотехнических систем // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации. – 2016. – С. 532-538.
81. Погребов В.Б., Шилин М.Б. Экологический мониторинг береговой зоны // Основные концепции современного берегопользования. Т. 1. СПб: изд-во РГГМУ, 2009. С. 95-123.
82. Полищук, И. В., Другачук Д. А. Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений - 10 лет эффективной эксплуатации // Гидротехника. – 2021. – № 4(65). – С. 32-35. – EDN EYBZCX.



83. Приказ Минтранса России от 05.11.2013 гю №335 «Об утверждении Обязательных постановлений в морском порту Калининград».

84. Пролив. // Большая российская энциклопедия. Электронная версия (2016); <https://bigenc.ru/geography/text/3179961> Дата обращения: 30.08.2022

85. Ревзон А.Л. Картография состояния природно-технических систем. М.: Недра, 1992. 223 с.

86. Реестр зарегистрированных в АГКГН географических названий объектов на 23.08.2022 (Калининградская область) // Государственный каталог географических названий URL: <https://cgkipd.ru/science/names/reestry-gkgn.php> (дата обращения: 26 августа 2022 года).

87. Рожков-Юрьевский Ю.Д. К вопросу о географических названиях на Калининградском/Вислинском заливе. / Каталог малых портов и гаваней Калининградского/Вислинского залива. / Под ред. Чубаренко Б.В., Шванковска Б., Федорова Г.М., Гриценко В.А. – М.: Изд-во «Экслибрис». – 2015. – С. 144-148.

88. Соловьев А.Н. О проявлениях сейшевых колебаний Балтийского моря в Калининградском заливе по данным автономного нефелометра. // Океанология. 1999. т.39, №1. С. 158–160.

89. Сочава Б. В. Введение в учение о геосистемах. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1978. – 319 с.

90. Справка ArcGis:[сайт]. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/>

91. [10.3/tools/3d-analyst-toolbox/minus.htm](https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/minus.htm)

92. Суздалева А. Л. Системная техноэкология и управляемые природно-технические системы // Безопасность в техносфере. – 2016. – Т. 5. – №. 3. – С. 6-14.

93. Суздалева А. Л. Управляемые природно-технические системы энергетических и иных объектов как основа обеспечения техногенной

безопасности и охраны окружающей среды. М.: Изд-во «ИД Энергия», 2015. 160 с.

94. Федоров М.П., Суздалева А.Л. Гидротехническое строительство как основа устойчивого развития // Гидротехническое строительство. 2014. №11. С. 27–30.

95. Федоров, Г. М., Кузнецова Т. Ю., Разумовский В. М. Влияние близости моря на развитие экономики и расселения Калининградской области // Известия Русского географического общества. – 2017. – Т. 149. – № 3. – С. 15-31. – EDN YSLLEV

96. Федоров М.П., Шилин М.Б. Концепция экологического образования в техническом университете // [Текст].-СПб.: Изд. СПб ГТУ, 1998.-43 с.

97. Хренов Н.Н. Методика изучения изменений геоэкологической ситуации при сооружении комплекса сжижения газа в пос. Сабетта (П-ОВ ЯМАЛ) // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. №1 (20).

98. Царькова Н. С. Геоэкологический мониторинг дноуглубительных работ в морском торговом порту Усть-Луга //Автореф. дисс.. канд. геогр. наук. СПб: РГГМУ. – 2016.

99. Чечко В. А., Чубаренко Б. В., Топчая В. Ю. Влияние природных и антропогенных факторов на формирование осадочной толщи Калининградского залива Балтийского моря // Известия КГТУ. 2018. №48.

100. Чечко В.А. Особенности современных процессов осадкообразования в Вислинском и Куршском заливах // Система Балтийского моря / Ред. А.П. Лисицын. М.: Научный мир, 2017. С. 373-380.

101. Чечко В.А., Чубаренко Б.В., Болдырев В.Л., Бобыкина В.П., Курченко В.Ю., Домнин Д.А. О динамике береговой зоны моря в районе оградительных молов Калининградского морского канала. // Водные ресурсы. 2008.-Т. 35. № 6. С. 1 - 11.

102. Чубаренко Б. В., Шванковска Б. Введение. // Каталог малых портов и гаваней Калининградского/Вислинского залива. / Под ред. Чубаренко Б.В., Шванковска Б., Федорова Г.М., Гриценко В.А. – М.: Изд-во «Экслибрис». – 2015. – С. 5-6.
103. Шарапов Р.В. Переход от технических к природно-техническим системам // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2012. № 2(12). С. 43–46.
104. Шилин М.Б., Голубев Д.А., Леднова Ю.А. Техносферная безопасность дреджинга.- СПб: изд-во Политехнического ун-та, 2010.- с. 385. EDN: QNPKIR
105. Шилин М.Б. Геоэкологический мониторинг прибрежных природно-технических систем: Дисс. докт. геогр. наук. СПб, 2006. 293 с.
106. Шилин М.Б., Жигульский В.А., Бобылев Н.Г., Ахмад Алаа, Леднова Ю.А., Дун Сянли Развитие комплекса компенсационных мероприятий по снижению негативного воздействия строительства аванпорта Бронка на южный берег Невской губы // Естественные и технические науки. 2020. Вып. 3. С. 178–188.
107. Ялтанец И. М. Справочник по гидромеханизации. – 3-е изд., испр. И доп. – М.: Издательство «Горная книга», 2011. С. 525-538.
108. Bobykina V., Chubarenko B., Karmanov K. Morphodynamics of the shores of the Vistula Spit (the Baltic Sea) in a period of 2002-2015 by results of in-situ measurements. [In] “Managing risks to coastal regions and communities in a changing world”. Proc. Int. Conf. EMECS'11-SeaCoasts XXVI, Saint-Petersburg, 22-27 August, 2016. Saint-Petersburg, RSHU, 2016. ISBN 978-5-369-00829-4. P. 130-140. DOI: 10.21610/conferencearticle\_58b4315ec153d
109. Chechko V. Spatial structure and evolution of bottomsediments in the Vistula Lagoon.(In) Transboundary waters and basins in the South-East Baltic.B. Chubarenko (Ed.). Kaliningrad:TerraBaltica, 2008, ISBN 978-5-98777-031-3. pp. 244-249.

110. Chechko V., Chubarenko B. Sediment balance of the Vistula Lagoon. [In] "Managing risks to coastal regions and communities in a changing world". Proc. Int. Conf. EMECS'11-SeaCoasts XXVI, Saint-Petersburg, 22-27 August, 2016. Saint-Petersburg, RSHU, 2016. ISBN 978-5-369-00829-4. P. 174-185. DOI: 10.31519/conferencearticle\_5b1b94303c55f9.63278465

111. Chechko V.A., Blazhchishin A.I. Bottom sediments of the Vistula Lagoon of the Baltic Sea. *The Baltica*.- 2002.- №15.- C. 13-22.

112. Chechko, V.A. "Analysis of space and time variations in the suspended matter distribution in Kaliningrad Bay of the Baltic Sea", *Water Resources*.- 2002.- 29(4).- C. 384–387.

113. Christiansen C., Edelvang K., Emeis K., Graf G., Jähmlich S., Kozuch J., Laima M., Leipe T., Löffler A., Lund-Hansen L. C., Miltner A., Pazdro C., Pempkowiak J., Shimmield T., Smith J., Voss M., Witt G. Material transport from the nearshore to the basinal environment in the southern Baltic Sea: I. Processes and mass estimates // *Journal of Marine Systems*. – 2002. – T. 35. – №. 3-4. – C. 133-150.

114. Chubarenko B., Babakov A. SEDIMENT TRANSPORT NEAR THE VISTULA SPIT (BALTIC SEA). Proceedings of International Conference "Managing risks to coastal regions and communities in a changing world" (EMECS'11 - SeaCoasts XXVI), Saint-Petersburg, 22-27 August, 2016. DOI: 10.21610/conferencearticle\_58b4315e36e45

115. Chubarenko B., Domnin D., Navrotskaya S., Stont Zh., Chechko V., Bobykina V., Pilipchuk V., Karmanov K., Domnina A., Bukanova T., Topchaya V., Kileso A. Transboundary Lagoons of the Baltic Sea. // *The Diversity of Russian Estuaries and Lagoons Exposed to Human Influence*. K. Kosyan (Ed.). Springer, 2017. ISBN 978-3-319-43392-9. — Pp. 149-190. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-43392-9\\_6](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-43392-9_6)

116. Chubarenko B., Margoński P. The vistula lagoon // *Ecology of Baltic coastal waters*. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. – C. 167-195.

117. Chubarenko B., Zakirov R. Water exchange of nontidal estuarine coastal lagoon with the sea – example of the Vistula Lagoon (Baltic Sea) // *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*. 2021. doi: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000633.
118. Chubarenko I.P., Chubarenko B.V. (2002b) General water dynamics of the Vistula Lagoon. // *Environmental and Chemical Physics*.- 2002.- Vol. 24, N4.- 213 – 217.
119. Chubarenko, B. V., Leitsina, L. V., Esiukova, E. E., & Kurennoy, D. N. Model analysis of the currents and wind waves in the Vistula Lagoon of the Baltic Sea // *Oceanology*. – 2012. – T. 52. – №. 6. – C. 748-753.
120. Chubarenko, B.V., Chubarenko I.P. New way of natural geomorphological evolution of the Vistula Lagoon due to crucial artificial influence. / Emeliyanov E.M. (Ed.). *Geology of the Gdansk Basin, Baltic Sea. Yantarny Skaz, Kaliningrad, 2002 P. 372-375.*
121. Cieśliński R., Chlost I. Water balance characteristics of the Vistula Lagoon coastal area along the southern Baltic Sea // *Baltica*. 2017. 30(2). P. 107–117. <http://dx.doi.org/10.5200/baltica.2017.30.12>
122. Ezhova E, Chechko V. Peculiarities of bioturbation in the Vistula Lagoon, Baltic Sea / *Baltic Sea Science Congress. Abstracts*. - Rostock, 2007. - P.110.
123. FitzGerald D.M., Pendleton E. Inlet formation and evolution of the sediment bypassing system: New Inlet, Cape Cod, Massachusetts // *J. of Coastal Research*. 2002. Vol. 36, Spec. Iss. P. 290–299. <https://doi.org/10.2112/1551-5036-36.sp1.290>
124. Grinfeldt Y. S. Geomorphological engineering studies of anthropogenic variability of relief in the marine coastal zone // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2021. – T. 677. – №. 5. – C. 052024.

125. Hayes M.O. Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime // Leatherman S.P. (Ed.) Barrier islands from the Gulf of Mexico to the Gulf of St. Lawrence. New York: Acad. Press, 1979. P. 1–28
126. Hjulstrøm, F. Transportation of debris by moving water, in Trask // Recent Marine Sediments. A Symposium: Tulsa, Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists. Tulsa, Oklahoma. P. 5-31
127. Kondrat V, Šakurova I, Baltranaitė E, Kelpšaitė-Rimkienė L. Natural and Anthropogenic Factors Shaping the Shoreline of Klaipėda, Lithuania. Journal of Marine Science and Engineering. 2021; 9(12):1456. <https://doi.org/10.3390/jmse9121456>
128. Lund-Hansen L. C., Petersson M., Nurjaya W. Vertical sediment fluxes and wave-induced sediment resuspension in a shallow-water coastal lagoon // Estuaries. 1999. T. 22. №. 1. P. 39-46.
129. Lund-Hansen L. C., Valeur J., Pejrup M., Jensen A. Sediment fluxes, re-suspension and accumulation rates at two wind-exposed coastal sites and in a sheltered bay //Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 1997. – T. 44. – №. 5. – C. 521-531.
130. Musielak S., Osadczuk K., Kawiriska M. Evolution of the Świna Gate //Journal of Coastal Research. – 1995. – C. 305-308.
131. Reading H.G. Sedimentary environments and facies. Oxford, Blackwell Scientific Publ., 1978. 557 p
132. Sokolov, A., Chubarenko, B., 2018. Numerical simulation of dynamics of sediments disposed in the marine coastal zone of the south-eastern Baltic. Baltica, 31 (1), 13–23. Vilnius. ISSN 0067-3064.
133. Szydłowski, M., Kolerski, T., Zima, P. 2019 Impact of the Artificial Strait in the Vistula Spit on the Hydrodynamics of the Vistula Lagoon (Baltic Sea). Water, 11, 990.
134. Wentworth, C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. Journal of Geology (30): 1922. – P. 377-392.

135. Žilinskas, G., Janušaitė, R., Jarmalavičius, D., Pupienis, D. The impact of Klaipėda Port entrance channel dredging on the dynamics of coastal zone, Lithuania //Oceanologia. – 2020. – T. 62. – №. 4. – C. 489-500.