

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

На правах рукописи

Бубнова Екатерина Сергеевна

**РОЛЬ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В ИЗМЕНЧИВОСТИ
ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ
БАЛТИЙСКОГО МОРЯ**

Специальность 25.00.36 — Геоэкология

Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук

Научный руководитель:

к.г.-м.н., В.В. Сивков

Калининград – 2019

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. Геоэкологическое состояние вод Юго-Восточной Балтики	9
1.1. Физико-географическая характеристика	9
1.2. Геоэкологические проблемы	16
1.3 Водная взвесь как геоэкологический фактор	28
1.3.1 Балтийское море.....	29
1.3.2. Юго-восточная часть Балтийского моря.	41
Глава 2. Материалы и методы исследования	56
Глава 3. Пространственно-временная изменчивость концентрации и состава взвеси.....	67
3.1. Среднемноголетнее распределение взвеси в поверхностном и придонном слоях моря.....	67
3.2. Сезонная изменчивость вдольберегового распределения взвеси	71
3.3 Особенности вещественного состава взвеси в береговой зоне	75
3.4. Сезонная и межгодовая изменчивость вертикального распределения взвешенного вещества.....	79
Глава 4. Геоэкологический анализ распределения взвешенного вещества	93
4.1. Изменчивость вещественного состава взвеси в открытой части моря.....	93
4.2. Изменения в концентрации взвеси в береговой зоне	101
4.3. Формирование антропогенного ландшафта на западном побережье Калининградского полуострова	106
4.4. Совершенствование схемы мониторинга	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	118
Список литературы.	120
Список публикаций	133

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования

Как водосборный бассейн Балтийское море испытывает значительную антропогенную нагрузку. Наиболее острые экологические проблемы Балтики — эвтрофикация, загрязнение, уменьшение биоразнообразия и разрушение морского дна [HELCOM, 2018]. В береговой зоне моря сосредоточена основная хозяйственная деятельность, включая дноуглубление, строительство портовых и берегозащитных сооружений. Одна из важнейших функций Хельсинкской комиссии по защите экосистемы Балтики — геоэкологический мониторинг, охватывающий источники и показатели природного и антропогенного воздействия и различные параметры состояния бассейна.

Наиболее острая экологическая проблема Балтийского моря — эвтрофикация. Прогрессирующее увеличение первичной продукции не сопровождается пропорциональным повышением вторичной продукции. Взвешенное вещество — главный компонент круговорота осадочного материала в водной толще, источник донных осадков [Лисицын, 1978, 2008]. В геоэкологическом отношении аквальный седиментогенез изучен крайне неравномерно и недостаточно. В данной работе впервые сделана попытка оценить влияние взвешенного вещества на геоэкологическое состояние Юго-Восточной Балтики.

Известно, что избыток взвешенного органического вещества выводится из морской экосистемы путем седиментации, что приводит к увеличению его содержания в донных осадках, увеличению биогеохимического потребления кислорода и возникновению гипоксии [Исследование экосистемы Балтийского моря..., 1985]. К зонам максимальной концентрации и активизации взвешенного вещества отнесены границы океан–атмосфера, океан–берег, вода–дно. Кроме того, по [Spellman, 2014], высокие концентрации взвешенных частиц вызывают дополнительное повышение температуры воды и усиливают процесс эвтрофирования.

Взвесь — один из ключевых параметров оценки состояния морской природной среды, в частности — «взвешенные вещества» входят в перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования (Распоряжение Правительства РФ от 8 июля 2015 г. N 1316-р). Вместе с тем, взвесь — транспортный агент для других загрязняющих веществ, способных адсорбироваться на

поверхности частиц [Лебедев, 1986]. Суммарная площадь поверхности частиц взвеси в 10 раз больше поверхности вода–живое вещество и в тысячу раз больше раздела океан–атмосфера [Айзатуллин и др., 1976]. Важно с этой точки зрения изучение процессов переноса, разрушения и накопления загрязняющих веществ, а также изучение динамики распределения состава и скорости их осаждения [Израэль и Цыбань, 2009]. При определенных условиях и уровнях содержания в воде взвесь способна вызывать вредные (стрессовые) эффекты, вплоть до гибели организмов. Воздействие на морские организмы экстремальных (природных и техногенных) концентраций взвеси проявляется в снижении интенсивности фотосинтеза, поражений органов фильтрации, ухудшении условий питания и размножения, изменения поведения, а при физиологических стрессах даже гибели [Патин, 2001]. Помимо этого, взвешенные частицы являются центрами активных микробных процессов, так как на поверхности частиц происходит окисление и трансформация многих органических соединений [Израэль и Цыбань, 2009].

Объект исследования — взвешенное вещество юго-восточной части Балтийского моря.

Предмет исследования — закономерности изменчивости распределения и состава взвеси как индикатора геоэкологического состояния морской среды.

Степень изученности научной проблемы

Изучение специфика изменений состава и распределения взвешенного вещества в российском секторе юго-восточной части Балтийского моря, его гранулометрического, минерального и химического состава началось более полувека назад — в середине XX века [Емельянов, 1968; Емельянов, Пустельников, 1976]. Современные данные о распределении и вещественном составе взвеси в изученной акватории представлены в работах [Emelyanov, 2002; Сивков, 2012; Сивков и др., 2017; Лукашин и др., 2018; Kowalczyk et al., 2005; Wozniak et al., 2011; Vaiciute et al., 2012].

Согласно Руководству по мониторингу ХЕЛКОМ, взвешенное вещество входит в число гидрологических характеристик водной толщи, измерение которых необходимо для контроля уровня эвтрофикации и морского природопользования. К сожалению, в рамках мониторинга ХЕЛКОМ в юго-восточной части Балтийского моря расположена всего одна точка наблюдений — ВУ8, что явно недостаточно для такой акватории. С 2003 г. в исследуемой акватории ведется геоэкологический мониторинг, включающий

наблюдение и оценку состояния взвешенного вещества. Данные мониторинга обобщены лишь частично [Нефть и окружающая среда..., 2012]. В связи с этим проведение регионального мониторинга с дальнейшей интеграцией результата в международную систему исключительно актуально.

Цель исследования. Оценка роли взвешенного вещества как индикатора геоэкологического состояния юго-восточной части Балтийского моря.

Для достижения цели решались следующие **задачи**:

1. Выявление пространственной неоднородности циркумконтинентальной и вертикальной зональности распределения взвеси по данным геоэкологического мониторинга.

2. Оценка влияния изменчивости гидролого-гидрохимических условий открытого моря на вертикальное распределение взвешенного вещества.

3. Выявление изменчивости органического и минерального состава взвеси на характерных участках района исследований методом электронной сканирующей микроскопии.

4. Анализ трендов изменения концентрации взвеси в береговой зоне моря.

Научная новизна

На основе авторских карт распределения взвешенного вещества в российском секторе Юго-Восточной Балтики были выделены зоны повышенной концентрации (северное побережье Калининградского полуострова). Анализ вертикального распределения взвеси для акватории впервые был выполнен на основе комплексных гидрофизическо-гидрохимических данных в условиях ассимиляции вод, поступивших в результате заток североморских вод. Наблюденные плотностные седиментационные барьеры не были достаточно резки, чтобы вносить осложнения в распределение взвешенного вещества. Впервые для района исследования вещественный состав минеральной и биогенной фракций взвеси был исследован с помощью электронной сканирующей микроскопии, что выявило основные взвесеобразующие минералы (кварц, полевые шпаты и глинистые минералы) и позволило обнаружить скопление бактериальной взвеси на границе окислительно-восстановительных условий.

Практическая значимость работы

Модернизирована схема геоэкологического мониторинга, которая позволяет оптимизировать затраты на его проведение, в том числе, на выявление зон рискованного

рыболовства (гипоксии и сероводородного заражения) и абразии берега. Результаты исследования могут найти применение при разработке региональной системы комплексного управления прибрежной зоной в районе национального парка «Куршская коса», объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО и дополнить международную сеть мониторинга геоэкологического состояния Балтийского моря под эгидой Хельсинкской комиссии.

Личный вклад автора

Полевая и камеральная обработка проб взвешенного вещества в 11 экспедициях ИО РАН и их анализ методом сканирующей электронной микроскопии, статистическая обработка первичных данных, их интерпретация и картографическое представление выполнены лично автором. Сформирована база данных АО ИО РАН по весовой концентрации взвеси в и модернизирована существующая схема геоэкологического мониторинга юго-восточной части Балтийского моря.

Защищаемые положения:

1. Сезонная и межгодовая изменчивость концентрации и состава взвеси в поверхностном и придонном слоях Гданьского бассейна, определяется, главным образом, биопродуцированием в слое 0–40 м; ослаблена роль плотностных барьеров (термоклина и галоклина), препятствующих выводу взвеси из водной толщи в донные осадки.

2. Межгодовая изменчивость количества и состава взвеси в придонном слое Гданьской впадины зависит от противоположно направленного влияния эвтрофикации и импульсных затоков североморских вод; вызванная этим противодействием миграция верхней границы зоны сероводородного заражения (редоксклин) сопровождается соответственным перемещением взвеси, насыщенной бактериопланктоном.

3. Орография берега, соответствующие ей течения и локальные источники антропогенной взвеси в районе Куликовской бухты и Калининградского янтарного комбината приводят к осложнению циркумконтинентальной зональности ее распределения в юго-восточной части Балтийского моря — увеличению ширины прибрежной градиентной зоны ее концентрации.

4. Положительный тренд концентрации взвеси, сформировавшийся в 2003–2018 гг. между Куршской косой и Калининградским полуостровом, обусловлен действием

комплекса факторов: усилением эвтрофикации, штормовой активности береговой абразии и активизацией хозяйственной деятельности в береговой зоне моря.

Апробация работы. Материалы диссертации были представлены на международных и национальных конференциях, в том числе: EGU General Assembly 2016 (апрель 2016 года, Вена, Австрия); EMECS'11 — Sea Coasts XXVI Joint Conference (22-27 августа 2016 года, Санкт-Петербург, Россия); II Всероссийская научная конференция молодых ученых (10-14 апреля 2017 г., Москва, Россия); XXII Международная Научная конференция (Школа) по морской геологии (20-24 ноября 2017 г., Москва, Россия), 7th IEEE/OES Baltic Symposium (12-15 июня 2018 г., Клайпеда, Литва), Школа летняя, 14-й Коллоквиум по морской геологии Балтийского моря (4-5 сентября 2018 г., Стокгольм, Швеция), GeoHab 2019 (13-17 мая 2019 г., Санкт-Петербург, Россия). Работа в рамках диссертации была поддержана РФФИ (грант мол_а № 18-35-00656).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, из них 5 — статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 1 раздел в монографии и 4 статьи в международных сборниках.

Структура и объем диссертации.

Диссертация включает 134 страницы, 3 таблицы и 74 рисунка.

Глава 1 посвящена описанию геоэкологического состояния Юго-Восточной Балтики, характеристике проблем акватории, роли взвешенного вещества и истории его изучения. Глава 2 включает описание примененных методик и объем собранных материалов. В главе 3 представлена пространственно-временная изменчивость концентрации и состава взвеси в Юго-Восточной Балтике за 2003–2018 гг. В главе 4 сформулирован геоэкологический анализ распределения, изменчивости и состава взвешенного вещества в меняющихся геоэкологических условиях. Логическим итогом служит новая схема геоэкологического мониторинга.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю В.В. Сивкову за помощь на всех этапах исследований, критические замечания и полезные советы, а также своим коллегам из ИО РАН, в частности: М.В. Капустиной – за поддержку и ценные замечания, В.А. Кречикю — за помощь в сборе и описании гидрологических данных, А.В. Креку — за конструктивную критику и помощь в организации экспедиций, М.О. Ульяновой за всестороннюю поддержку, Е.В.

Крек за помощь в сборе натуральных данных и спутниковые снимки, В.Н. Лукашину — за сотрудничество и совместные публикации. Автор благодарит А. Битинаса и Г. Жалюдене за сотрудничество в освоении и использовании сканирующей электронной микроскопии, Е.В. Краснова, И.И. Волкову и Т.В. Шаплыгину за ценные замечания. За предоставленные материалы и организацию экспедиций автор особо благодарит ООО «ЛУКОЙЛ-КМН» и ООО «Морское венчурное бюро».

Глава 1. Геоэкологическое состояние вод Юго-Восточной Балтики

1.1. Физико-географическая характеристика

Балтийское море (Рисунок 1) — полужакрытый мелководный солоноватый водоем, крупнейший водоем такого рода в мире. Средняя глубина моря составляет 51 м, в то время как само море представляет собой систему нескольких глубоководных (относительно средней глубины моря) впадин, разделенных поднятиями дна (порогами) и банками [Гидрология и гидрохимия..., 1993].



Рисунок 1. Балтийское море из космоса, снимок MODIS Terra.

Связь Балтийского моря с Мировым океаном — с Северным морем, в частности, происходит исключительно через систему узких и мелководных проливов, которые делают процесс водообмена затруднительным. Североморские воды попадают в

Балтику, по большей части, во время зимних штормов, что означает импульсное поступление поверхностной воды. Однако, в силу высокой плотности, соленая вода Северного моря опускается и дальше распространяется уже на придонном слое, повышая солёность воды и содержание растворенного кислорода, препятствуя образованию анаэробных условий в глубинных слоях Балтики. Одновременно с этим в Балтику впадает множество рек, приносящих пресную воду: ежегодно с речным стоком поступает примерно одна сороковая часть общего объема воды в море [Bergström et al. 2001]. Действуя вместе, оба лидирующих источника воды формируют характерные для Балтийского моря перепады солёности: у входа в пролив Зунд солёность составляет 15–18 пс (практических единиц солёности), в юго-восточной Балтике 7–8 пс и до 2 пс в северо-восточных частях.

Юго-Восточная Балтика. Общий контур Калининградского морского побережья predetermined тектоническим развитием территории. Вислинский и Куршский заливы приурочены к унаследованным депрессиям земной коры, а выступ Самбийского полуострова приходится на относительно приподнятый блок земной коры. Калининградское морское побережье включает в себя берега Самбийского (Калининградского) полуострова, Куршской и Балтийской (Вислинской) кос, а также обширные пространства прибрежной суши, окаймляющие акватории Куршского и Калининградского (Вислинского) заливов. В пределах Калининградской области находится северная часть Вислинской косы длиной 25 км и южная часть Куршской косы протяженностью 49 км. На коренные берега Самбийского полуострова приходится 71 км. Общая протяженность морского берега составляет 146 км.

Основная форма рельефа Гданьского бассейна — чашеобразная котловина, вытянутая в субмеридиональном направлении, с юга и востока она окаймляется прибрежным мелководьем, узким в Гданьском заливе и значительно расширяющимся к северу от Самбийского полуострова. Внешний край прибрежного мелководья повсеместно выражен плавным перегибом, от которого оно плавно спускается ко дну Гданьской впадины. Внутренний край мелководья фактически совпадает с подводным береговым склоном с глубинами до 20-25 м.

Самбийско-Куршская (или Куршская) возвышенность, прилегающая к Куршской косе, осложнена более мелкими элементами рельефа. На вершинной части возвышенности (плато Рыбачий) прослеживаются уступы и террасовые площадки,

прибрежные валы и понижения, следы русел древних рек, реликты моренных массивов и гряд. Крутой ступенчатый склон Куршской возвышенности отделяет ее от Гданьской впадины (Рисунок 2).

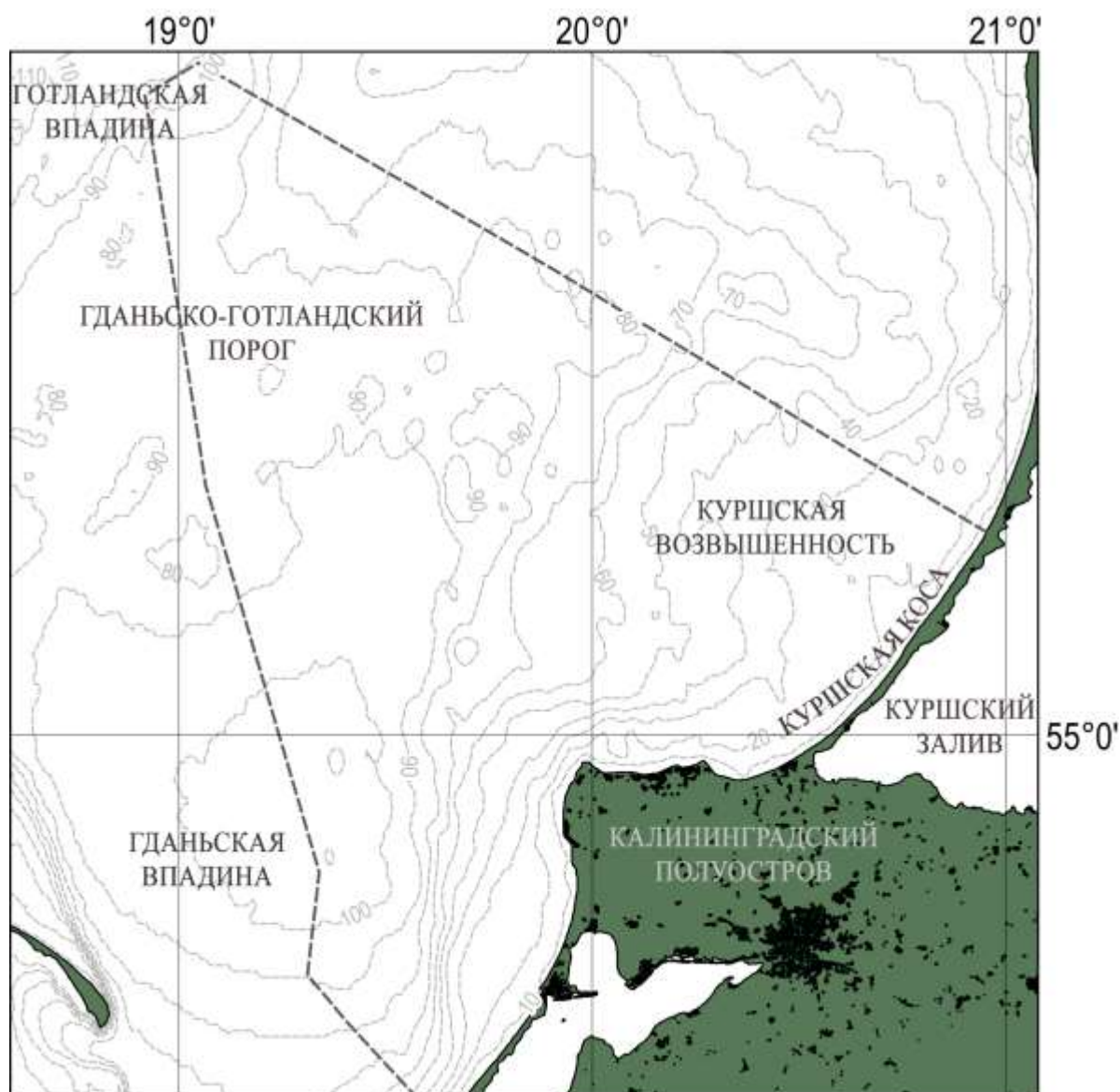


Рисунок 2. Юго-восточная часть Балтийского моря.

С востока к Гданьской впадине примыкает подводная ложбина пра-Немана, а с севера и северо-запада - пологий склон Лиепайско-Клайпедской возвышенности. Это — вытянутое с юго-запада на северо-восток банкообразное повышение, соответствующее порогу, разделяющему Готландскую и Гданьскую впадины (Гданьско-Готландский порог). Пологим восточным и северо-восточным субаквальным аккумулятивным склоном этот порог спускается в Гданьскую впадину, а ступенчатым, осложненным крутыми уступами западным склоном - в Готландскую впадину.

В Юго-Восточной Балтике наиболее крупными реками являются Висла, Неман и Преголя. Однако только Висла впадает в Балтийское море напрямую, минуя залив, и, как следствие, оказывает наибольшее воздействие на весь Гданьский бассейн. Две другие крупные реки впадают в Балтийское море не напрямую, а через полузакрытые лагуны — Куршский и Вислинский заливы. Оба этих залива являются своеобразными «ловушками» осадочного вещества и биогенных элементов (Рисунок 2).

Для рек Гданьского бассейна максимум стока приходится на апрель, минимум — на июль-сентябрь-октябрь. С наступлением положительных температур воздуха в весенний период происходит таяние снега и образование весеннего половодья, характер которого (время начала, интенсивность и продолжительность) зависят от снегозапаса и интенсивности снеготаяния. Так, половодье рек Неман и Висла наблюдается в марте-мае, на реках Вислинской лагуны — в декабре-мае [Гидрометеорологический режим..., 1971]. Летняя межень на р. Неман наступает в июле и длится до сентября, на р. Висле, как и суммарный сток, — в сентябре-октябре, на реках Вислинской лагуны — в июне-сентябре. Особенно бурно половодье проходит на р. Неман, где за три месяца протекает 42 % от величины годового стока; более спокойно — на р. Висле, где за четыре месяца стекает 46 % (Гидрометеорологические условия..., 1992).

Юго-Восточная Балтика (ЮВБ), как и море в целом, представлена двумя структурными зонами — поверхностной (деятельным слоем) и глубинной. Географическое положение Гданьского бассейна на юго-востоке Балтийского моря последовательно определяет: повышенные (в пределах Балтики) значения солнечной радиации, положительные минимальные температуры воды и благоприятную ледовую обстановку, не затрудняющую турбулентное перемешивание в зимний сезон.

Известно, что в Гданьском бассейне ход сезонов сдвинут относительно общепринятого: зима — январь-март, весна — апрель-июнь, лето — июль-сентябрь и осень — октябрь-декабрь [Берникова и др., 2007]. Годовой ход поверхностной температуры в Гданьском бассейне носит однотипный характер с максимумом в августе и минимумом в феврале у берега и — в марте в открытом море.

Годовой ход поверхностной солености не монотонный и довольно сложный: с максимумом в декабре-феврале, и вторичным максимумом — в июле-августе; с минимумом — в июне-июле, и вторичным минимумом — в сентябре. В поверхностных водах береговой зоны моря, в первую очередь, он определяется величиной осадков и

речного стока. Процессами льдообразования и ледотаяния на рассматриваемой акватории можно пренебречь. Распресненные акватории вблизи устьев рек и проливов, соединяющих лагуны с морем, оконтурены солёносными фронтами и подвержены сильной синоптической и мезомасштабной изменчивости [Чубаренко, 2001].

Глубже верхних 50–60 м в Гданьской впадине температура и солёность увеличиваются. Размах внутригодовых колебаний по температуре составляет здесь 2,0–2,2 °С, по солёности — 1,2–2,1 пес. Правильность годовой ритмики нарушается, что связано с процессами конвективного и турбулентного переноса тепла и солей в глубинных слоях моря [Гидрометеорологические условия..., 1992].

С началом осеннего охлаждения в результате конвективного перемешивания начинает формироваться верхний квазиоднородный слой (ВКС). Максимальной интенсивности конвекция достигает в январе или в феврале и продолжается до установления минимальных поверхностных температур (март). В результате на мелководье конвекция проникает до дна, формируя почти 50-метровый однородный по температуре (~1,5–1,8 °С) и солёности (~7,6–7,9 пес) слой. Отметим, что этот слой (ВКС) распространяется по всей открытой части Балтики [Гидрометеорологические условия..., 1992]. С началом весеннего прогрева процессы перемешивания в центральной части бассейна идут по-разному. У берега образуется термобар, существующий до тех пор, пока на всей акватории поверхностная температура не станет выше температуры наибольшей плотности θ° (апрель) и повсеместно начнет формироваться холодный промежуточный (на мелководье — придонный) слой (ХПС), толщина которого постепенно уменьшается к августу (до 10–15 м). От поверхностного слоя ХПС отделяется сезонным термоклином (пикноклином) [Суховей, 1986; Залогин, Косарев, 1999].

Увеличение глубины залегания термоклина (горизонты 20–30 м) и возрастание в нем вертикальных градиентов температуры происходит по мере летнего прогрева до достижения на поверхности температурного максимума (август). С началом осеннего охлаждения опускание термоклина продолжается, и в октябре-декабре он достигает глубины слоя 50–60 м, однако величина вертикальных градиентов температуры уменьшается. С января по март на всей акватории Гданьского бассейна устанавливается обратная стратификация (ХПС размыт).

Верхний и придонный слои разделяются совпадающими по расположению нижним (главным) термоклинном (существующим большую часть года), галоклинном и пикноклинном. Главный пикноклин обусловлен только вертикальными градиентами солености (0,092–0,147 пес/м), т.к. вертикальные градиенты температуры в этом слое положительны (0,021–0,131 °С/м) и работают на ослабление главного пикноклина.

Температура и соленость Гданьского бассейна подвержены значительным межгодовым колебаниям: в верхнем слое за счет изменения тепловых процессов в системе море-атмосфера или составляющих пресноводного баланса, а в придонном – за счет адвекции вод из Северного моря.

Гидрометеорологический режим. Гданьский бассейн, являясь частью морского шельфового водоема, расположен в умеренной гумидной климатической зоне (Лоция..., 1962). Юго-восточная Балтика находится под влиянием морского климата умеренных широт, для которого характерны сравнительно небольшие колебания температуры воздуха в течение всего года, большая влажность, облачность и значительное количество осадков. Основные черты климата района формируются под влиянием его географического положения и общей циркуляции атмосферы, обуславливающей перенос теплых и влажных воздушных масс с Атлантического океана. Кроме того, существенное влияние на климат оказывает Северо-Атлантическое течение, приносящее к берегам северо-западной Европы большие массы теплой воды.

Главным фактором, определяющим режим ветра в южной части Балтийского моря, является общий характер распределения атмосферного давления. Вблизи берегов значительную роль играют местные условия, под влиянием которых ветры могут претерпевать значительные изменения. В течение всего года преобладают юго-западные и западные ветры, на долю которых в отдельные месяцы приходится 50-70%. Повторяемость ветров других направлений примерно одинакова, но в отдельные сезоны замечается увеличение повторяемости (до 25-30%) ветров, которые не являются господствующими в данном районе (Лоция ..., 1962).

Вследствие сравнительно небольших размеров моря, малых глубин и относительно редкой повторяемости ветров силой 8 баллов и более волнение в средней части Балтийского моря большого развития не достигает и редко превышает 7–8 баллов; обычно же оно колеблется в пределах 0–5 баллов. Наибольшее волнение развивается обычно при северных и западных ветрах.

Основными типами колебаний уровня моря являются сейшевые, сезонные и сгонно-нагонные (ветровые). Сейшевые колебания вызываются изменениями атмосферного давления и сопровождаются ритмическими изменениями наклона уровенной поверхности в продолжение 24–26 часов. Эти колебания являются одной из самых характерных особенностей режима Балтийского моря. Величина сейшевых колебаний уровня в этом районе моря обычно не превышает 20–30 см.

Сезонные колебания уровня моря, связанные в основном с изменением величины материкового стока, невелики и примерно одинаковы на всем побережье. Минимальный уровень наблюдается весной (в марте-мае); он колеблется в это время от –20 до –28 см (относительно нуля Кронштадтского футштока), а своего максимума, равного 0–2 см, уровень достигает в августе–сентябре. Средняя разность между весенним минимумом и летне-осенним максимумом уровня незначительна и у побережья колеблется от 8 до 25 см. Колебания уровня, вызываемые ветрами, более существенны, хотя и кратковременны. Значительное влияние на колебания уровня, вызванные действием ветра, оказывает характер береговой черты, в результате чего эти колебания на отдельных участках побережья различны. При суммарном воздействии ветра и атмосферного давления изменения уровня могут достигать больших величин.

Режим течений обуславливается водообменом с Северным морем и стоком вод с суши (определяющими систему постоянных поверхностных течений), ветровой деятельностью (вызывающей дрейфовые течения), а также конфигурацией берегов и рельефом дна (оказывающими влияние на скорость и направление суммарных течений). Имеются сведения о периодически возникающих струйных течениях, распространяющихся вдоль восточного склона Гданьской впадины, которые обусловлены обусловленной затоками североморских вод. Постоянные течения весьма слабы и подвержены значительным изменениям в зависимости от времени года и главным образом от господствующих ветров. Под действием ветров они могут изменить свою скорость и направление. Скорость постоянных течений колеблется в среднем от 0,2 до 0,5 узла и лишь в отдельных случаях увеличивается до 0,7–0,9 узла. Дрейфовые течения в основном следуют направлению ветра. При перемене направления ветра сравнительно быстро меняется и направление течения. Вследствие этого режим дрейфовых течений характеризуется своей неустойчивостью. Зачастую дрейфовые течения определяются не местными ветрами, а предшествующим ветром или более

сильным ветром, дующим в соседних районах. Так, сильные северо-западные и западные ветры над Северным морем нагоняют в Балтийское море значительные массы воды через проливы и вызывают восточное течение в южной части моря. В проливах и закрытых бухтах дрейфовое течение, как правило, не согласуется с направлением ветра и может иметь даже обратное направление. Скорость дрейфового течения определяется силой вызвавшего его ветра и может достигать 2–4 узла и более.

1.2. Геоэкологические проблемы

Деятельность человека все глубже и глубже проникает в биосферу — сложную систему, включающую атмосферу, гидросферу и верхнюю часть литосферы заселенных чрезвычайно активной и ранимой живой материей, которые взаимосвязаны биогеохимическими циклами миграции вещества, энергии и информации [Медведева, 2011].

С древнейших времен и до наших дней Балтийское море и его берега используются человеком в качестве среды обитания, водного пути и источника природных ресурсов. Природно-ресурсная составляющая наряду с транспортно-промышленным (Рисунок 3) и промысловым использованием продолжает главенствовать в Балтийском регионе. Наряду с этим все возрастающее значение приобретают вопросы охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности.



Рисунок 3. Интенсивность судоходства в Балтийском море по данным [HELCOM, 2018]

В последние десятилетия проблема рационального использования природных ресурсов и охраны природы приобрела первостепенное значение. Эти вопросы становятся особенно острыми применительно к *береговой зоне морей*, т.к. значительная часть населения и промышленные производства концентрируются именно на морских побережьях. В результате усиливаются загрязнение прибрежных вод и наносов береговой зоны (по сравнению с другими природными комплексами).

Балтийское море считается одним из наиболее чувствительных к загрязнению, так как принимает бытовые и промышленные стоки густонаселенных районов Европы. Главным фактором, формирующим специфику и изменчивость придонных условий Балтики, являются периодические затoki соленых североморских вод. Небольшой объем воды в море и медленный водообмен через Датские проливы с Северным морем способствует концентрированию в Балтике загрязняющих веществ с высокой химической и биохимической устойчивостью. Солоноватые водные массы стратифицированы в течение всего года. Эти свойства в сочетании с некоторыми биологическими особенностями делают его весьма подверженным многим формам антропогенного воздействия [Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т.Ш..., 1994]. Согласно [HELCOM, 2018], основными экологическими проблемами Балтийского моря на 2018 год являются эвтрофикация, загрязнение (воды и затопленное химическое оружие), обеднение биоразнообразия, морской мусор, виды-вселенцы, перевылов рыбы и потеря донных ландшафтов.

Юго-Восточная Балтика активно используется человеком и является местом пересечения интересов рыбного промысла, морского транспорта, национальной обороны, добычи полезных ископаемых (нефть, янтарь) и рекреации. Пока не полностью нашли решения вопросы очистки бытовых отходов, сбрасываемых в море. В настоящее время, особенно в прибрежной зоне, отмечается устойчивая тенденция к увеличению различных видов антропогенной нагрузки на геоэкологическую среду.

Береговая зона Балтийского моря в пределах Калининградской области на всем своем протяжении является рекреационной зоной, кроме того, значительная ее часть относится к особо охраняемым природным территориям. В частности, при активном строительстве в береговой зоне особую опасность представляют процессы абразии

берегов. Основным динамическим процессом в пределах береговой зоны Самбийского полуострова является абразионный (Рисунок 4).



Рисунок 4. Типы берегов Балтийского моря.

Это ведет к отступанию берега на 0,5–0,7 м/год [Болдырев, Рябкова, 2001]. Во время экстремальных штормов (свыше 7–8 баллов) повторяемостью 5–7 лет, разрушение берегов значительно возрастает — до 4,0–6,0 м. На Куршской косе интенсивному размыву подвержен корневой участок косы протяженностью 10 км. Общий дефицит песчаных наносов в береговой зоне на участке от мыса Таран до Куршской косы достигает 40 млн. м³. На западном побережье дефицит песчаных наносов в береговой зоне отмечается на участке от м. Бакалинского до м. Таран. Здесь доминируют процессы размыва, а берег характеризуется наличием высокого активного клифа. На мысах, как на берегу, так и на подводном береговом склоне развиты валунные образования. Ежегодный объем разрушения указанного участка составляет около 70 тыс. м³

[Бобыкина, Болдырев, 2008]. В последние годы состояние Калининградского побережья резко ухудшилось. Увеличилось поступление в море глинистых частиц, увеличилась до критической крутизна абразионно-оползневых склонов, участились оползневые подвижки и обвальные процессы на склонах (Рисунок 5), значительно уменьшились запасы песка на дне и берегу, образовались аварийные участки берега с угрозой обрушения в море отдельных зданий в Пионерском, Светлогорске, Отрадном.



Рисунок 5. Абразионное разрушение берегового склона в пос. Донское. Участок представлен уникальным обнажением палеогеновых пород.

Следствием воздействия волн на береговой обрыв является формирование у его подножия свежего абразионного уступа различной высоты и крутизны. Размыв подножья берегового обрыва приводит к нарушению равновесия всего склона и провоцирует усиление оползневых и обвально-осыпных процессов, в результате которых образовавшийся уступ перекрывается оползнями и осыпными накоплениями, которые в свою очередь, подвергаются абразионному воздействию последующих штормов с образованием нового уступа. Далее цикл повторяется, в результате чего периодические разрушения подножия берегового обрыва по цепочке посредством оползневых и обвально-осыпных процессов распространяются до его бровки. Этому

способствуют и гидрогеологическое строение побережья: частое чередование песчаных и глинистых прослоев в породах, многочисленные выходы грунтовых вод и др.

Абразия берега оказывает заметное загрязняющее действие морские воды, способствуя высоким концентрациям взвешенного вещества. Песок, вымытый из обвалившегося грунта, вовлекается волнами и течениями в поперечные (на берег и с берега) и продольное (вдоль берега) перемещение наносов, особенно активные во время штормов. Эти песчаные наносы, постепенно перемещаясь, образуют, в конечном счете, такие аккумулятивные формы рельефа как пляжи, береговые и подводные валы, бары, косы. Тонкий илистый материал, который легко взмучивается и долго не оседает, уносится течениями в море и откладывается на больших глубинах, где в составе донных отложений начинают преобладать алеврито-пелитовые фракции. Вследствие этого, дефицит песчаного материала на подводном береговом склоне на участке м. Таран примерно до 20 км Куршской косы составил около 40 млн. м³.

Таким образом, стабильное состояние береговой зоны наблюдается лишь в местах массового сброса в море рыхлого материала. Интенсивное разрушение берегов Самбийского полуострова обусловлено дефицитом песка в береговой зоне и этим объясняется плохое развитие песчаных пляжей. Осуществляемые до настоящего времени традиционные методы берегозащиты не дали желаемого результата. Широкие же волногасящие пляжи являются основным элементом защиты берега, поэтому основной, кардинальной системой берегозащиты Калининградского побережья является искусственная подача больших объемов песчаного материала в береговую зону для восполнения и ликвидации в ней дефицита песка. Эффективность берегозащитных, широких волногасящих пляжей за счет массовых сбросов в море песчаного материала доказывается эволюцией западного побережья (>50 км) от м. Бакалинский до российско-польской границы на Вислинской косе.

Участки размывающихся аккумулятивных берегов также квалифицированы как опасные природные явления. Наиболее подвержены размыву берега Куршской косы, корневая часть со стороны моря, остальная - со стороны одноименной лагуны.

Морской берег Куршской косы также подвержен воздействию штормовых волнений западного, северо-западного и северного направления. Активной абразии подвергается 12-ти километровый прикорневой участок косы. Средняя скорость отступления берегов колеблется от 0,4 до 2,5 м/год. Максимальные скорости

зарегистрированы на участке, примыкающем к восточной окраине г. Зеленоградск, где с 1938 г. берег отступил на 110-115 м, в периоды сильного сгона воды можно увидеть остатки реликтовой береговой линии — пни возрастом более 300 лет (Рисунок 6). Портовые сооружения влияют и на размыв берега, обычно с подветренной стороны гавани.



Рисунок 6. Обнажение затопленной береговой линии в корневой части Куршской косы

При размыве берега и подводного берегового склона частицы перемещаются не только скачкообразно, методом сальтации, более тонкая фракция переходит во взвешенное состояние. *Таким образом, терригенная взвесь является индикатором активности береговой абразии.* Высокие концентрации взвешенных частиц отрицательно проявляются на донных биоценозах. Бентос в условиях повышенной мутности намного беднее в видовом отношении и ниже по численности, что связано с уменьшением трофности субстратов и с затруднением поиска пищи, с разрушением сложившихся пищевых цепей. В данном контексте взвешенное вещество можно рассматривать как *загрязнитель морской среды.*

Обычно загрязнением называют внесение или возникновение под воздействием различных факторов в той или иной экосистеме физических, химических, механических, информационных или биологических ингредиентов, в количествах, превышающих обычные концентрации или средний природный фон либо предельные естественные колебания в рассматриваемый период. С позиций экологии под загрязнением понимают не просто привнесение или возникновение в экосистемах новых не характерных ингредиентов, но и негативные последствия для экосистем, где ингредиенты выступают в роли экологических факторов. Простое присутствие или выход одного или нескольких из них за пределы толерантности организмов соответствующего биогеоценоза (отклонение от требований экологической ниши) тех или иных организмов и даже звеньев трофической цепи, инициирует физические или структурные изменения, прерывающие и нарушающие естественные потоки информации и энергии, процессы круговорота и обмена веществ, что снижает интенсивность ассимиляции продуцентов, а это ведет к снижению продуктивности биогеоценоза вплоть до массовой гибели организмов и всей экосистемы [Тищенко, 2017].

Иными словами, загрязнение — это сложный многообразный процесс появления в экологической системе (биогеоценозе) физических, химических или биологических компонентов, физических и структурных изменений, превышающих естественные среднепогодные уровни или нарушающих процессы круговорота и обмена веществ, потоков энергии и информации, ухудшающих качество природных объектов, снижающих санитарно-гигиеническую и технологическую ценность природных ресурсов, продуктивность выращиваемых культур и разрушающих экосистемы [Тищенко, 2017].

Среди различных загрязнений выделяют:

1) Естественные (природные) загрязнения — это поступление вследствие естественных (природных) процессов в окружающую среду вредных веществ, различных видов энергии или информации, прямо или косвенно изменяющих качество экосистем и приводящих к ухудшению функций среды по отношению к человеку, неорганической природе, растительному и животному миру или стать помехой в той или иной человеческой деятельности [Тищенко, 2017].

2) Антропогенные (искусственные) загрязнения — это результат прямого или косвенного воздействия первичных (остатки не использованных продуктов биосферы) и

вторичных (различного вида загрязнений, в т. ч. синтезированных человеком и не имеющих природных деструкторов) отходов функционирования элементов экономики, в ходе удовлетворения военных, рекреационных, культурных и других интересов человека, которые вызывают различные изменения в природной среде [Тищенко, 2017].

Береговая зона, включая лагуны, наиболее подверженная антропогенному влиянию часть моря. Общая черта действия загрязнений для большинства береговых зон густонаселенных территорий состоит в их комплексности и, следовательно, в возможности кумулятивного эффекта их действия на сообщества растений и животных, а также на самого человека [Сафьянов, 1978].

Прибрежные воды Калининградской области, а также реки, дренирующие территорию Самбийского полуострова, находятся под мощным воздействием человека, включая прямое загрязнение промышленностью и сельским хозяйством. Основу загрязнения составляют вещества, содержащиеся в бытовых стоках и сточных водах пищевой промышленности и сельского хозяйства. Немаловажная роль в общем загрязнении прибрежных морских вод отводится крупным портовым комплексам расположенных в городах Балтийск и Пионерский, а также горно-перерабатывающему предприятию «Янтарный комбинат».

В составе загрязнений, поступающих с калининградского побережья, преобладают коммунально-бытовые стоки [Технико-экономическое обоснование..., 1999]. В поверхностных водах отмечены умеренно-опасные уровни нефтяных углеводородов. Есть основания считать, что определенный вклад в загрязнение калининградского морского побережья вносят промышленные отходы зарубежных портов — Клайпеды, Гдыни и Гданьска, а также сток р. Вислы, дренирующий обширные промышленно развитые территории. В этом контексте представляет интерес исследование сорбционной емкости взвешенного вещества. Кроме того, «взвешенные вещества» входят в перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды (Распоряжение Правительства РФ от 8 июля 2015 г. N 1316-р).

Промышленная эксплуатация месторождения янтаря, несомненно, является заметным антропогенным фактором, влияющим на состояние морской и прибрежной экосистем. Объемы сбросов в море твердой породы из янтарных карьеров сопоставимы с выносами в море взвеси крупнейших рек южной Балтики, например, Вислы.

Очевидно, что сброс в море пульпы оказывает заметное влияние на качество прилегающей морской среды. Прежде всего, это — повышение мутности воды. Мутные “плюмы” в море прослеживаются из космоса на удалении в десятки километров от места сброса. Сбросы янтарного комбината представляют собой одну из важнейших статей баланса осадочного вещества в Гданьском бассейне Балтийского моря [Блажчишин, 1984; Стрюк, 1992].

Ранее было выявлено значительное влияние деятельности янтарного комбината на берега, особенно на ширину пляжей [Burnashov et al., 2010], и на концентрацию взвешенных веществ у уреза воды [Сивков, Чубаренко, 1997]. В 2015-2016 гг. выполнена количественная оценка загрязнения, поступающего в результате действия естественных процессов (абразия берегов, поступление дождевых, талых и ливневых вод с прилегающей территории), а также сброса сточных вод и пульпы предприятием [Krek et al., 2018].

Одной из важнейших экологических проблем как всего Балтийского моря, так и его юго-восточной части, является эвтрофикация [HELCOM, 2018]. Эвтрофикация или увеличение потока органического вещества в экосистему через обогащение питательными веществами вызывается чрезмерной доступностью азота и фосфора для первичных продуцентов (водоросли, цианобактерии и бентосные макрофиты). На ранних этапах повышается первичная продукция, которая выражается в повышении концентрации хлорофилла *a* в морской воде и/или росте бентосных водорослей, а также изменяется метаболизм организмов. Увеличение первичной продукции может привести к снижению прозрачности воды и увеличению осаждения органического материала, что в свою очередь увеличивает потребление кислорода в придонном слое и может привести к истощению запасов растворенного кислорода. Отсутствие растворенного кислорода и образование сероводорода (H_2S) приводят к гибели водных организмов. Отсутствие кислорода в придонных слоях моря вызывает активное поступление фосфора из донных отложений в воду и усиливает процесс эвтрофикации.

Девяносто семь процентов Балтики подвержено эвтрофикации, двенадцать из них оценивается как акватория с наивысшей степенью эвтрофикации (Рисунок 7).

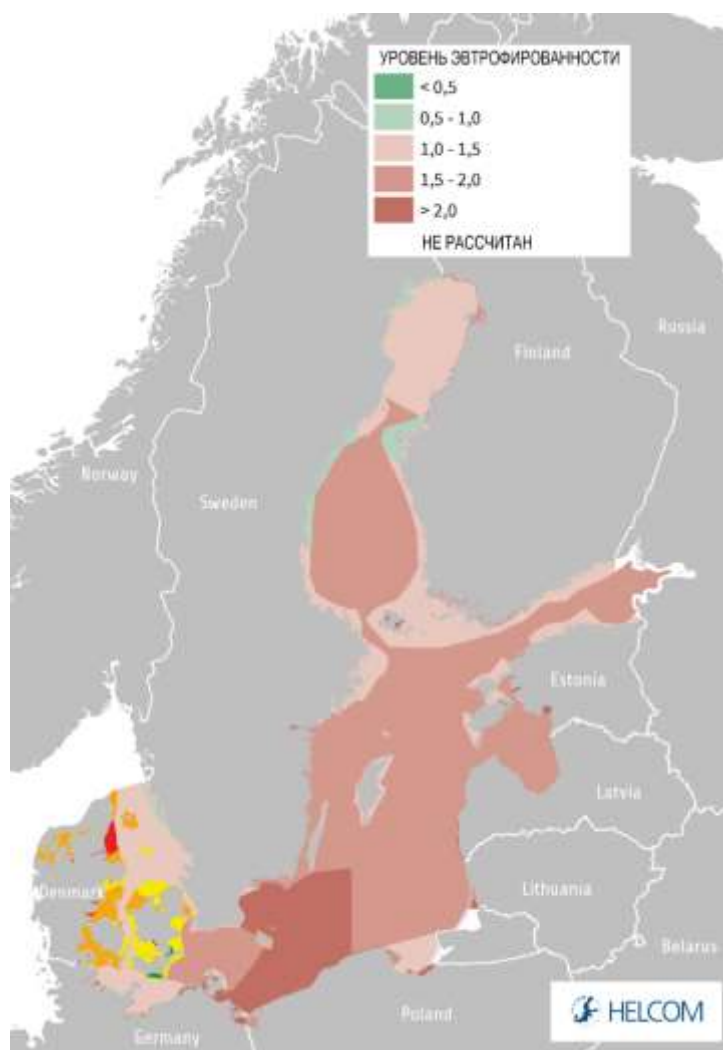


Рисунок 7. Интегральный индекс оценки уровня эвтрофированности разных районов Балтийского моря [HELCOM, 2018]

С 1980-х годов поступление питательных веществ в Балтийское море уменьшилось, в некоторых суббассейнах — значительно. Например, эвтрофикация Финского залива определяется поступлением азота и фосфора непосредственно с водосбора залива, водообменом с Балтийским морем, транспортом вещества между различными районами залива и внутренними химическими процессами [Владимирова и др., 2018]. Сброс разных форм азота в Балтийское море в настоящее время находится на уровне 1960-х годов, а поступление фосфора на уровне 1950-х годов [HELCOM, 2018]. Текущий годовой сброс питательных веществ в Балтийское море содержит около 826 000 тонн азота и 30 900 тонн фосфора [HELCOM 2018]. Большая часть сброса приходится на речной сток как для азота, так и для фосфора. Тем не менее, несмотря на

сокращающиеся объемы сброса питательных веществ в Балтику, процесс эвтрофикации поддерживает сам себя по нескольким причинам.

Во-первых, основной вклад в эвтрофированность Балтийского моря стали вносить сине-зеленые водоросли, которые являются азотфиксирующими (Рисунок 8). Таким образом, им необходим всего один дополнительный биогенный элемент — фосфор. Который, в свою очередь, имеет потенциал к выделению из донных осадков при бескислородных условиях. Во-вторых, лимитирующим фактором развития цианобактерий является температура, в то время как в Юго-Восточной Балтике присутствует тренд на ее повышение. В зарубежной литературе существует мнение, что взвешенное вещество способствует увеличению температуры воды, потому что взвешенные частицы способны впитывать больше тепла, чем вода и впоследствии дополнительно прогревать воду [F.R. Spellman, 2014]. Очевидно, таким образом, что концентрация водной взвеси, с одной стороны служит индикатором эвтрофированности Балтики, а с другой стороны, может влиять на развитие этого процесса.



Рисунок 8. Цветение водорослей, июль 2018 года, Юго-Восточная Балтика.

Усиление эвтрофированности юго-восточной части Балтийского моря [HELCOM, 2018] ведет к дополнительным экологическим рискам для глубоководных впадин.

Избыточный рост первичной продукции не сопровождается соответствующим ростом вторичной продукции, что приводит к седиментации большого количества, образованного взвешенного органического вещества на дно, что приводит к увеличению содержания органических соединений в донных осадках, увеличению биохимического потребления кислорода и возникновению гипоксии в придонном слое впадин [Исследование экосистемы Балтийского моря..., 1985, Mohrholz, 2018].

Наибольшие концентрации икры и личинок шпрота, ведущего объекта рыбного промысла, приурочены здесь к изобатам 70–110 м [Гидрометеорология и гидрохимия..., 1994]. Места нереста трески также располагаются в придонных слоях Гданьской впадины. Минимальные значения содержания кислорода в придонных водах часто опускаются здесь до 1–2 мл/л, а в отдельные годы наблюдается гипоксия (глубже 90 м) (Рисунок 9), что создает напряженность для биоты, включая промысловые виды рыб, и сокращение нерестовых площадей. [Гидрометеорология и гидрохимия..., 1994].

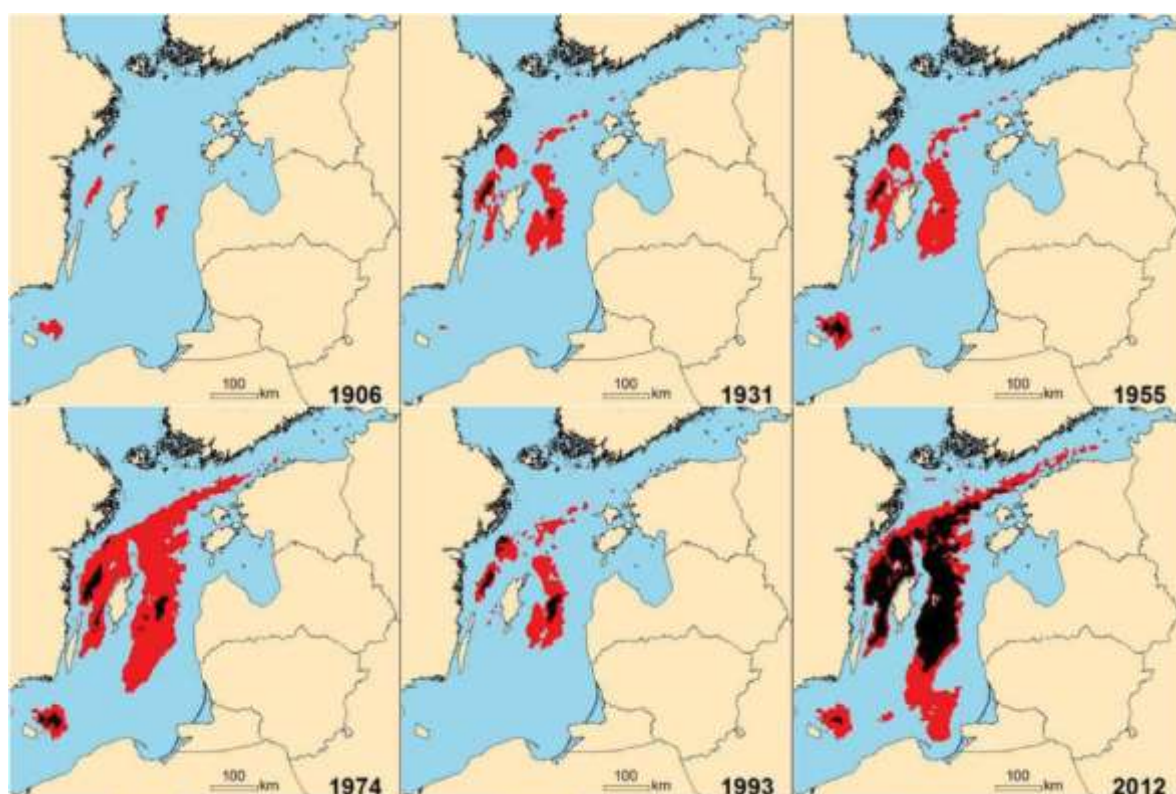


Рисунок 9. Распространение зон гипоксии (содержание растворенного кислорода <math><2,0</math> мл/л, обозначены красным) и распространения сероводорода (обозначены черным) с 1906 по 2012 год [Carstensen et al., 2014].

В общем виде роль взвешенного вещества в геоэкологическом состоянии Юго-Восточной Балтики и практическую значимость этого можно выразить с помощью схемы (Рисунок 10).



Рисунок 10. Роли взвешенного вещества в геоэкологическом состоянии юго-восточной части Балтийского моря и связанные с ними типы хозяйственной активности.

Изменчивость распределения и состава взвешенного вещества соответствует изменчивости геоэкологического состояния юго-восточной части Балтийского моря, поскольку взвесь играет роль в процессах эвтрофикации и загрязнения региона. Таким образом, предметом исследования является изменчивость распределения и состава взвешенного вещества, которые являются индикатором геоэкологического состояния морской среды.

1.3 Водная взвесь как геоэкологический фактор

В данной работе морская среда рассматривается как единая геосистема взаимообусловленных природных компонентов, пространственно связанных между собой. К ее компонентам относятся вода, донные осадки, биота, взвешенное вещество, а также рельеф дна и берегов [Опекунов, 2005].

Водная взвесь представляет собой частицы, которые находятся в воде во взвешенном состоянии. Согласно [Лисицын, 1974, 1975; Романкевич, 1978], взвесью

можно называть различные природные частицы, чей размер находится в промежутке от 0,1 мкм до 1 мм [Лисицын, 1975]. Частицы могут иметь разный генезис, в частности, терригенный (обломочные и глинистые минералы), биогенный (карбонатные и кремнистые частицы планктона, детрит, бактерии и продукты жизнедеятельности организмов), аутигенный (гидроксиды железа и марганца) или даже вулканогенный (вулканическая пыль) [Клювиткин, 2011]. Считается [Лисицын, 1966; Страхов, 1979; Емельянов, 1982], что химический состав взвеси и донных осадков в значительной мере связан с их гранулометрическим составом. Крупность частиц предопределяет распределение вещества в динамической системе моря, в том числе и загрязнений. Площадь поверхности взвешенных частиц, находящихся под 1 м² океана, составляет 40 тыс. м², а с учетом коллоидной части — сотни тысяч квадратных метров [Лисицын, 1978]. По [McCave, 1975], коллоидная фракция составляет т.н. дисперсный фон океана, так как практически не оседает, но доминирует по массе и объему, легко транспортируется течениями.

Взвешенное вещество является тем материалом, из которого образуются донные осадки [Лисицын, 1978, 2008]. Кроме непосредственного формирования осадков, взвешенное вещество выполняет в морской среде еще одну функцию — перенос загрязняющих веществ, которые адсорбируются на поверхности зерен. Так, множеством работ был доказан перенос биогенных элементов (азот и фосфор) взвешенным осадочным веществом [Meyer and Wania, 2008; Meyer et al., 2011; Schwarz et al., 2011; Rügner et al., 2014; Quesada et al., 2014; Spackman Jones et al., 2011; Hornsburgh et al., 2010; Slaets et al., 2014]. В работах [Ruegner et al. 2013, 2014; Schwientek et al. 2013] наблюдали транспорт углеводов, в [Kirchner et al., 2011] — ртути, а в [Chebbo and Gromaire, 2004] — свинца, цинка и меди.

1.3.1 Балтийское море.

Основные характеристики количественного распределения взвешенного вещества в Балтийском море были определены еще в 1970-х годах [Е.М. Емельянов, 1968; Пустельников, 1969, 1975; Емельянов и Пустельников, 1975, 1976; Bostrom et al, 1981]. При этом фильтры из трековой мембраны с диаметром ячейки 0,4 мкм начали использовать только в начале 1980-х, поэтому все оценки, полученные до этого исторического рубежа, могут показывать только примерные закономерности. Исследования, которые по точности могут быть сравнимы с современными были

проведены в большом количестве [Brugman, 1986; Bernard et al., 1989; Емельянов, Стрюк, 1987; Стрюк и др., 1990; Емельянов, 1986; Сивков, 1994].

В [Емельянов, 1984] впервые была сформулирована целесообразность изучения взвешенного вещества с точки зрения концепции геохимических барьерных зон (ГБЗ). Он же сформулировал основные закономерности его распределения и сезонной изменчивости для юго-восточной части Балтийского моря. Было выделено несколько характерных для Балтики ГБЗ: река-море, берег-море, вода-дно, вода-атмосфера, пикноклин и оксиклин. При этом две первых фронтальных зоны представляют собой вертикальный градиент, остальные — горизонтальный [Емельянов, 1982, 1984, 1986; Лисицын, 1984]. Определение геохимического барьера было предложено еще в [Перельман 1961], чтобы обозначить зоны гипергенеза, где на коротком расстоянии происходит резкое снижение интенсивности миграции химических элементов и, как следствие, их накопление. Барьерные зоны в океане по [Емельянов, 1998] представляют собой участки, где происходит резкое изменение интенсивности природных процессов, которые по обе стороны от таких границ сильно различаются. Участки Мирового океана вне таких барьерных зон обычно безградиентны, химически инертны и биологически малоактивны.

Балтийское море подвержено сезонным колебаниям количественного и вещественного распределения взвешенного вещества. Для условно летнего периода (с мая по октябрь) концентрации взвеси значительно выше, чем для зимнего, что вызвано жизнедеятельностью планктонных организмов [Стрюк, 1994]. Размеры слоя фотосинтеза в Балтике определяют в 20–30 м [Савчук, Балоде, 1983] и 25 м [Пустельников, 1975], однако они тоже имеют свойство колебаться. Слой фотосинтеза является мощнейшим биогеохимическим фильтром, изменяющим форму миграции элементов и ускоряющим их осаждение на дно (Емельянов, 1986). Биогенная взвесь не играет ведущей роли в балансе донных осадков Балтийского моря, но она часто доминирует в вещественном составе взвеси, а биопродуцирование является важнейшим процессом, определяющим скорость седиментации осадочных частиц (биоседиментация). Основным поставщиком биогенной взвеси (детрита) являются планктонные микроорганизмы. Принадлежность Балтийского моря к умеренному климатическому поясу обуславливает значительную сезонную изменчивость планктонного сообщества. Распределение зоопланктона зависит

также от физиологического состояния, возрастной структуры популяций [Очерки биологической продуктивности..., 1984].

Дисперсность взвешенного вещества обычно описывается гиперболической функцией Юнге [McCave, 1983], когда процессы агрегирования уравновешены процессами диспергирования. При нарушении этого равновесия гиперболический закон нарушается появлением дополнительной моды на графике распределения – увеличением количества частиц какой-либо размерности. Это может быть вызвано, например, поступлением взвеси из одного определенного источника. По типу осаждения частицы можно разделить на крупные (те, что оседают) и мелкие (т.н. фон) [McCave, 1975]. При этом мелкие частицы практически не оседают самостоятельно, а только вслед за крупными частицами, вносящими решающий вклад в сумму гравитационного потока частиц. Мелкие же создают дисперсный «фон» океана, который легко переносится морскими течениями, усиливая горизонтальный перенос осадочного материала. Более 90% взвеси, как правило, составляет пелитовый материал (<0,01 мм). Лишь в редких случаях содержание этой фракции снижается до 70% [Лисицын, 1978а, б]. Области высокого содержания алевритового материала во взвеси это чаще всего области обогащения взвеси биогенным материалом.

Поступающий в море терригенный материал теряет наиболее грубую часть в прибрежной полосе. По мере удаления от берега происходит механическая дифференциация частиц взвеси. При седиментации в открытом море трансформация исходного гранулометрического состава связана, главным образом, с процессами растворения и механического распада частиц. Все биогенные частицы нестойки в морской воде, а с уменьшением их размера увеличивается их активная поверхность и увеличивается скорость их разложения. Для седиментации мелких (пелитовых и коллоидных) частиц существенное значение приобретают процессы агрегирования за счет коагуляции и биофильтрации.

Терригенное минеральное вещество поступает в Балтийское море преимущественно с речным стоком, в результате абразии берегов и через атмосферу, как и во все моря умеренной гумидной зоны. Биогенное вещество в основном продуцируется непосредственно в море, а частично поступает также с речной взвесью. Гидрогенные компоненты взвеси (оксигидроксиды Fe и Mn) приносятся частично с речным стоком, а также образуются непосредственно в водной толще в результате

физико-химических процессов (коагуляция и флокуляция коллоидов, образование оксигидроксидов при смешении речных и морских вод, а также при диффузии элементов из восстановительной среды в окислительную во впадинах) [Лукашин и др., 2018].

Большой фактический материал, собранный в нескольких экспедициях, проводившихся в разные сезоны, позволил выявить количественное распределение взвеси на различных горизонтах, проследить ее преобразования на геохимических барьерах, изучить суточную и сезонную изменчивость [Емельянов, 1968; Емельянов, Пустельников, 1976; Емельянов и др., 1986; Емельянов и др., 1987; Прандке и др., 1987]. Однако необходимо учитывать, что в конце 70-х годов для сбора взвеси стали использовать новый тип фильтров — ядерные фильтры [Тамбиев, Демина, 1982]. Концентрации взвеси, измеренные с их помощью, оказались ниже, чем на нитроцеллюлозных, применявшихся ранее [Тамбиев, Демина, 1982; Емельянов и др., 1986]. Были получены первые интервальные оценки распределения концентрации взвеси по глубине моря. Максимум в поверхностных водах (до термоклина) — 0,4–22,4 мг/л, промежуточный минимум (от термоклина до галоклина) — 0,2–2,8 мг/л и глубинный максимум (от галоклина до дна) — 0,3–11,4 мг/л [Емельянов и др., 1986]. Отмечалось, что повышенные концентрации взвеси в придонном слое Гданьской впадины могут быть связаны также с химическими процессами на окислительно-восстановительном барьере в слое сосуществования кислорода и сероводорода [Емельянов и др., 1987].

Численная и объемная концентрации, а также распределение по размерам частиц <40 мкм изучались в 70-х годах кондуктометрическим методом на счетчике Коултера [Jonasz, Zalewski, 1978; Jonasz, 1982]. Применение набора сменных ампул, различающихся диаметром микроотверстия, даёт возможность проводить на приборе дисперсионный анализ частиц размерами от 0,3 до 1 600 мкм. Наиболее эффективная параметризация полученных распределений достигалась при совместном использовании гиперболического закона (закон Юнге) и некоторого набора нормальных (гауссовых) распределений. Было показано, что гиперболическая компонента распределения частиц взвеси по размерам имеет относительно постоянные значения параметров в сезоны различной биологической активности. Это позволило предположить, что гипербола описывает распределение по размерам минеральных частиц и детрита, находящихся под

влиянием стационарных физических и химических процессов. Гауссовы же компоненты возникают во время сезонов высокой биологической активности, что связано, по-видимому, с сезонными пиками фитопланктона различных видов.

Зимой, при двуслойной гидрологической структуре, наиболее стабильные распределения частиц (> 2 мкм) по размерам и очень низкие их концентрации (до 2 млн. шт./л) наблюдались в верхнем квазиоднородном слое (ВКС) (до 60–70 м), особенно в конце зимы. Оба эти факта объясняются зимними минимумами биологической активности и поступления терригенного вещества с суши. Придонный слой (от галоклина до дна) характеризовался резким возрастанием концентрации частиц с глубиной — до 10 млн. шт./л. При этом концентрация относительно крупных частиц (>10 мкм) была сравнима с их концентрацией в ВКС.

Летом, при трехслойной гидрологической структуре, в ВКС (0–30 м) концентрации частиц росла от поверхности (6 млн/л) до максимума в термоклине (>10 млн/л — в июне и до 35 млн/л — в августе). Более высокие концентрации отмечались только в береговой зоне. Абсолютный максимум для поверхностных вод был зафиксирован у побережья Гданьском залива — 160 млн/л. В конце лета максимум концентрации поднимался от термоклина к поверхности. Распределения частиц по размерам, полученные в июне, имели выраженную моду 6 мкм, которая не проявлялась в конце лета. Ее происхождение было вызвано, по-видимому, биологическими причинами. Промежуточный слой (между термоклином и галоклином) представлял собой наиболее «чистую» воду. Концентрация взвеси в ней была даже ниже, чем зимой — не более 1,0–1,5 млн. шт./л. Это объяснялось продолжающейся седиментацией частиц из промежуточного слоя и ослаблением поверхностного источника термоклином. В придонном слое (ниже галоклина) ни распределение частиц по размерам, ни вертикальный профиль концентрации частиц не проявили сезонных отличий.

Во второй половине 80-х годов прошлого века исследования взвеси стали переходить на новый уровень в связи с появлением поликарбонатных ядерных фильтров для фильтрации морской воды, зондов-нефелометров и многоканальных гидрофизических зондов, совмещенных с пробоотборниками воды револьверного типа (комплексы «розетта»). Нефелометры в режиме зондирования регистрируют относительные значения показателя рассеяния света в воде, которое обусловлено, главным образом, частицами коллоидной и пелитовой размерности. Гидрофизические

зонды позволили получать непрерывные вертикальные профили распределения температуры, солености, растворенного кислорода и других гидрохимических показателей. Внедрение в исследования ADCP (акустический доплеровский измеритель течений) позволило наряду с данными о скорости течений получать данные по звукорассеянию. Интенсивность звукорассеяния связана с концентрацией взвеси, является достаточно устойчивой характеристикой, приблизительно в такой же степени, как и рассеяние света. Таким образом, появилась возможность резко повысить детальность исследований взвеси и выявлять мезомасштабные эффекты, а главное — изучать взвешенное вещество на синхронном гидролого-гидрохимическом фоне. Стало возможным исследовать тонкую структуру вертикального распределения взвеси в сочетании с ее размером.

Получить картину распределения взвеси в Борнхольмской впадине *в условиях серии затоков* удалось в начале января 2000 года (44-й рейс НИС «Профессор Штокман»). Отличия зимних гидрологических условий в Арконской и Борнхольмской впадинах с предшествующими условиями конца сентября 1999 года (43-й рейс НИС «Профессор Штокман») свидетельствуют о произошедших затоках. Первый заток произошёл по галоклину, по-видимому, в *октябре-ноябре* 1999 года, и проявился во время наших зимних наблюдений в виде теплой интрузии (до 11 °С), совпадающей с галоклином. Этот заток можно объяснить большим сезонным понижением уровня Балтики вследствие сокращения речного стока и осадков. Именно это понижение обусловило необычную для самого спокойного сезона возможность весьма энергичного продвижения в Балтику соленых, но теплых вод из Арконской впадины. Второй заток, вероятно, был вызван *декабрьскими* штормами над Датскими проливами и южной Балтикой. Он был менее теплым (8 °С) и заполнил глубинную часть впадины. Единая затоковая струя из Арконской впадины, попадая в Борнхольмскую впадину, распалась на несколько «рукавов», образуя своего рода подводную дельту.

В мелководной *Арконской впадине* 29 декабря галоклин располагался на глубине 36–43 м, над придонным перемешанным слоем (температура 6,5 °С, солёность 18,5 ‰), мощностью 3 м, совпадающим с придонным нефелоидным слоем (Рисунок 11а). Концентрация взвеси увеличивалась в нем ко дну от 0,8 до 1,3 мг/л, а концентрация растворённого кислорода несколько понижалась с глубиной и составляла у дна 10 чм.

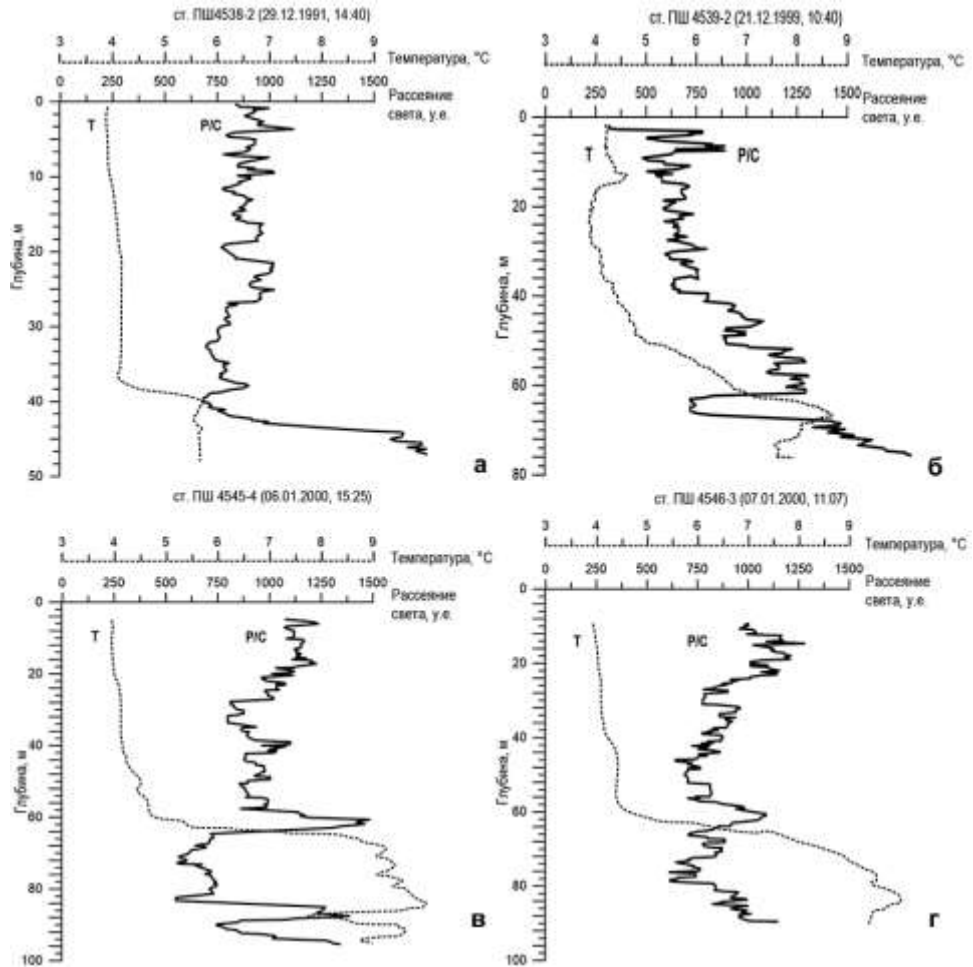


Рисунок 11. Распределение показателя рассеяния света (тонкодисперсной взвеси) на фоне температуры воды по пути затока из Арконской в Борнхольмскую впадину: а) Арконская впадина; б) западный склон Борнхольмской впадины; в) и г) соответственно, центральная и восточная части Борнхольмской впадины (пояснения см. в тексте).

Примерно через 40 часов, 31 декабря, на склоне, соединяющем Арконскую и Борнхольмскую впадины, был отмечен тонкий (всего 1 м!) слой придонной воды с характеристиками несколько трансформированной придонной воды Арконской впадины (16 пес, 8–8,5°C, 6–7 чнм). У дна сохранился резко выраженный нефелоидный слой мощностью 4–5 м (Рисунок 11б). Наметившаяся придонная интрузия подстилала отсутствовавший в Арконской впадине слой относительно теплых вод (до 9,5 °C) с пониженной концентрацией кислорода (4–5 чнм), сформировавшийся, по-видимому, во время осеннего затока. Этот теплый слой находился в градиентной зоне галоклина (10–16 пес) на глубинах 60–72 м. Выше него, на глубине 40–60 м наметилась еще одна

интрузия мутных вод с температурой 5–7 °С, оторвавшихся со склона и распространяющаяся над галоклином.

В центре Борнхольмской впадины 6 января обе наметившиеся интрузии проявились в виде двух промежуточных нефелоидных слоев (Рисунок 11в). Верхняя (5–7 °С) — по-прежнему над галоклином, на глубине 40–60 м, а нижняя (7,5–8,5 °С), несколько трансформированная придонная арконская вода — опустилась с 70 на 90 м. Сохранился и придонный нефелоидный слой с гидрологическими свойствами, близкими к нижней промежуточной интрузии. В восточной части Борнхольмской впадины (7 января) на фоне менее резкого галоклина и отсутствия «холодных» (8 °С) вод у дна нефелоидные слои были значительно менее выражены (Рисунок 11г).

Представление о гранулометрическом составе взвеси дают двумерные графики, показывающие изменение значений функции распределения по размерам объемной концентрации взвеси в зависимости от глубины моря (Рисунок 12). Видно, особенно в мелководной Арконской впадине, что определяющий вклад в объемную концентрацию взвеси дают самые мелкие частицы (2–3 мкм). Хорошо выражен придонный нефелоидный слой, где существенным становится вклад более крупных частиц (7–13 мкм). Особенно это проявляется на склоне между Арконской и Борнхольмской впадинами, где нисходящие при затоках течения имеют наибольшие скорости — достаточные для интенсивного взмучивания осадков. Здесь же заметно укрупнение частиц в промежуточной интрузии, распространяющейся над галоклином на глубине 40–60 м, а также отсутствие приповерхностного максимума взвеси. Это отклонение от обычной картины является дополнительным свидетельством заглужения вод, поступающих по узкому проливу из Арконской в Борнхольмскую впадины. Скопления взвеси у поверхности моря не подверглись искажению на «спокойных» станциях (ПШ-4538 и ПШ-4546), расположенных на достаточном удалении от пролива.

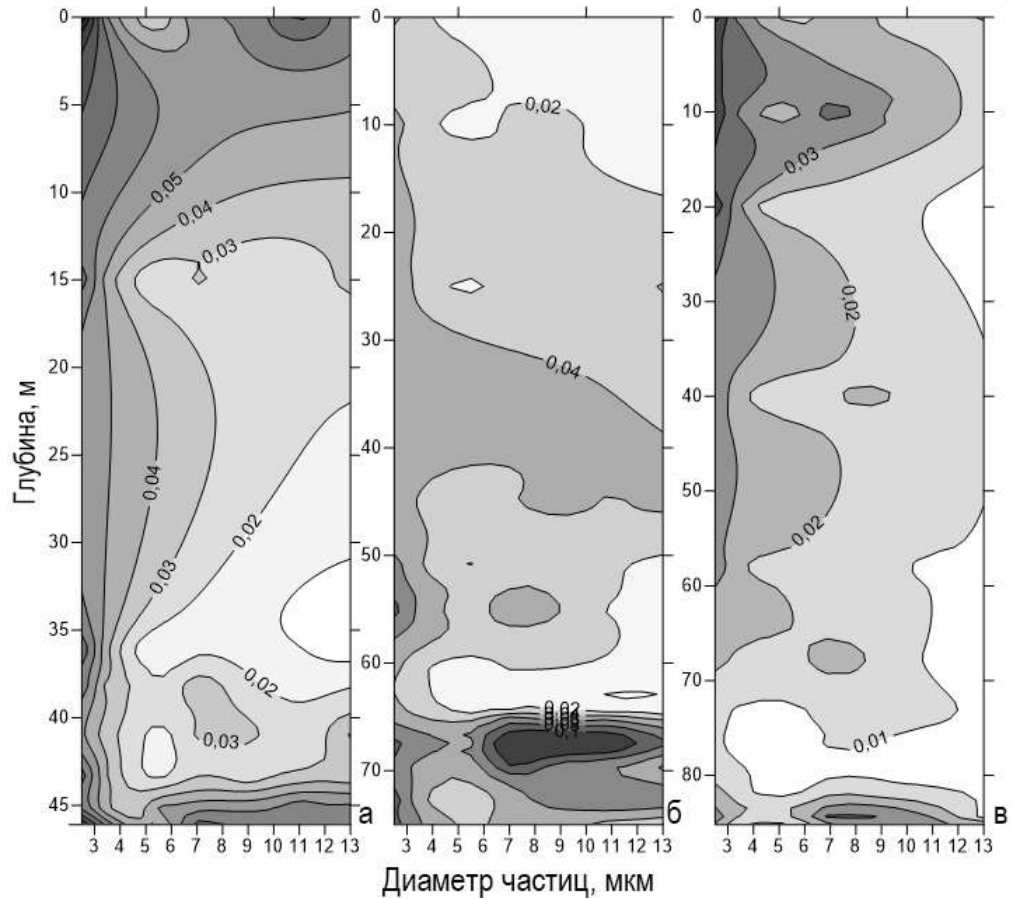


Рисунок 12. Значения функции распределения по размерам объемной концентрации взвеси в зависимости от глубины моря: а) Арконская впадина (ПШ-4538), б) западный склон Борнхольмской впадины (ПШ-4539), в) восточная часть Борнхольмской впадины (ПШ-4546). Данные по объемной концентрации взвеси получены с помощью счетчика Коултера.

В целом, весовая концентрация взвеси в придонном слое под влиянием зимнего залива составляла 0,8–4,6 мг/л, тогда как в «спокойных» условиях она не превышала 0,3–0,7 мг/л. Над галоклином, как правило, наблюдалось скопление взвеси — до 0,6–1,3 мг/л. Теплая осенняя интрузия по концентрации взвеси была неоднородной — от 0,4 до 1,3 мг/л.

В 1987 году (13А рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш») на широтном разрезе через Восточно-Готландскую впадину зондом-нефелометром был зафиксированы промежуточные максимумы светорассеяния [Сивков, Журов, 1991]. При максимальной глубине разреза 240 м они находились в слое 125–150 м, т. е. вне градиентных слоев (галоклина и термоклина), и имели тонкослоистую структуру. Максимумам светорассеяния в целом соответствовали более высокие концентрации взвеси. Частицы

взвеси имели пелитовую размерность (<10 мкм) с хорошо выраженной модой 4 мкм, что свидетельствует о непродолжительном нахождении взвеси в воде ("молодая" взвесь, по McCave, 1984). Выше и ниже обнаруженного нефелоидного слоя эти моды были сглажены, либо отсутствовали («старая» взвесь). Выявленный эффект был связан с существованием окислительно-восстановительного барьера "кислород-сероводород" [по Емельянову, 1982]. Известно [Brewer, Spenser, 1974], что в бескислородной среде, которая была характерна для глубинных вод Готландской впадины с 1979 по 1993 гг., накапливаются растворенные формы Mn, Fe и других элементов. Попадая за счет диффузии в вышележащий слой воды, содержащий кислород, они окисляются и переходят во взвешенную форму — выпадают в виде гелей гидроокислов. Мельчайшие частицы гелей скапливаются в сравнительно узком слое, так как их миграция вверх сдерживается силой тяжести, а оседание в слой сероводородного заражения приводит к их растворению.

Повторить нефелометрические измерения в Восточно-Готландской впадине удалось летом 1994 года, после большого затока североморских вод 1993 года, во время экспедиции на немецком исследовательском судне «Александр фон Гумбольдт» (программа GOBEX). Вертикальное распределение температуры воды было традиционным для летнего сезона — с термоклинном на глубине 20–30 м и холодным промежуточным слоем (ХПС) на глубине 30–70 м.

Общей особенностью вертикального распределения показателя светорассеяния на разрезе было наличие приповерхностного и придонного нефелоидных слоев. Первый из них был выражен тонким слоем в термоклине на глубине около 20 м, а второй в центре впадины поднимался от дна на 30 м. Промежуточное тонкослоистое скопление взвеси, регистрировавшееся в 1987 году [Сивков, Журов, 1991], на этот раз было выражено фрагментарно с тенденцией выклинивания к западу. Вместе с тем, в отличие от съемки 1987 года в восточной части впадины отмечались тонкие (0,5 м и менее) прослой рекордно экстремальных значений показателя светорассеяния (тонкой взвеси) (Рисунок 13).

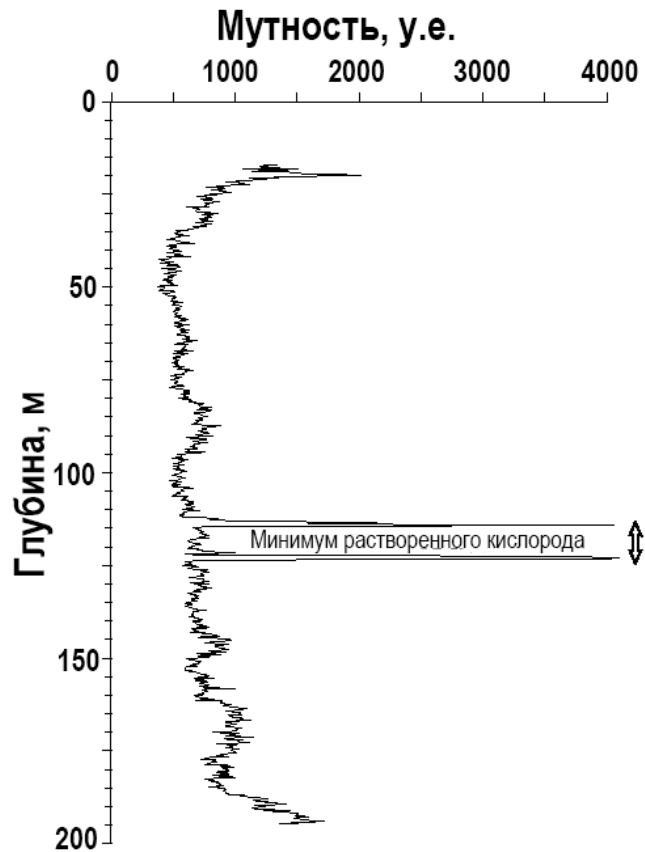


Рисунок 13. Вертикальный профиль показателя рассеяния света в Готландской впадине (экспедиция на немецком исследовательском судне «Александр фон Гумбольдт» по программе GOBEX, 1994 г.).

Отмеченные особенности были обусловлены затоком в Балтику относительно холодных североморских вод с повышенным содержанием кислорода (1993 год). Минимум концентрации O_2 в центральной части впадины находился на глубине 120 м (1 мл/л), у дна (230 м) концентрация O_2 возрастала до 3 мл/л [Sivkov et al., 1997]. Глубинный температурный минимум (4,0 °C), ассоциирующийся с ядром затока, располагался у восточного склона впадины на глубине около 200 м. По температуре придонного слоя его влияние прослеживалось от оси впадины (230 м) по склону до горизонта 120 м. Он также проявился в увеличении высоты (относительно оси впадины) придонного нефелоидного слоя — до 40–60 м и в повышенной концентрации O_2 (2,2 мг/л).

Такая ситуация объясняет возникновение локальных экстремальных скоплений взвеси в слое кислородного минимума. Прилегающий снизу к слою кислородного минимума более насыщенный кислородом глубинный слой уже в силу своего

положения способствует процессу выпадения и накопления гелей железа и марганца на окислительно-восстановительном барьере. Образовавшаяся на нем твердая частица в результате седиментации не будет возвращаться в восстановительные условия, как это происходит в беззатокковой ситуации, когда кислородный слой находится сверху. Когда же окислин обостряется за счет повышенной концентрации O_2 глубинных вод, как в рассматриваемом случае, то возникают предпосылки для образования тонких прослоев, экстремально насыщенных хемогенной взвесью. При этом нельзя забывать о роли бактерий, поскольку концентрация O_2 1,0 мг/л допускает присутствие сероводорода, как было показано выше. Бактерии, по-видимому, используют активную поверхность образовавшихся частиц в качестве субстрата, тем самым еще более повышая значения показателя светорассеяния.

По [Stryuk, 1992] средняя концентрация взвеси в Балтийском море — 0,8 мг/л, пределы же ее содержания составляют 0,1–18,4 мг/л. Для Балтики характерно несколько источников поступления осадочного вещества [Емельянов, Пустельников, 1976; Пустельников, Емельянов, 1983, Стрюк, 1994], *однако вклад биогенного вещества является подавляющим (95 млн т)*, на втором месте — материал абразии берегов и эрозии дна (28,6 млн т) при общем объеме в 132,3 млн т.

Средняя концентрация взвешенного вещества после 2000г. была определена для многих районов Балтийского моря (табл. 1).

Таблица 1. Концентрация взвеси в разных бассейнах Балтийского моря

Район	Концентрация взвеси, мг/л	Статьи
Арконский бассейн	0,7–9,0	Ohrde et al., 2007 Fleming-Lehtinen and Laamanen, 2012
Борнхольмский бассейн	0,4–5,0	Ohde et al., 2007
Готландский бассейн	3,0–6,0	Ohde et al., 2007
Померанский залив	0,5–20,0	Kowalczyk et al., 2005 Ohde et al., 2007
Гданьский залив	0,4–15,7	Wasmund et al., 2001 Kowalczyk et al., 2005 Wozniak et al., 2011
Юго-Восточная Балтика, Литовское побережье	1,1–32,0	Wasmund et al., 2001 Vaičiute et al., 2012
Пярнуский залив	0,5–24,3	Alikas et al., 2015
Рижский залив	10,0–24,0	Toming et al., 2009

		Fleming-Lehtinen and Laamanen, 2012 Raag et al., 2014
Финский залив	0,8–20,0	Koponen et al., 2007 Vazyulya et al., 2014
Северо-Западная Балтика	0,5–21,7	Harvey., 2015
Ботнический залив	0,2–20,9	Harvey, 2015

1.3.2. Юго-восточная часть Балтийского моря.

Осадочный материал, мобилизующийся ежегодно за счет абразии берегов и эрозии дна в российской части Гданьского бассейна, составляет примерно 1,8 млн. т (подсчитано по Блажчишин, 1984). На западном побережье Самбийского полуострова расположен крупный антропогенный источник осадочного материала — Калининградский янтарный комбинат. В конце прошлого века ежегодно из его карьеров в море поступало в среднем более 2 млн. т отработанной породы. Затем сбросы уменьшились почти на порядок, а с 2007 г. вновь увеличились до 0,6–0,9 млн. т в год. На водосборе юго-восточной части Балтийского моря активно протекают химические и механические процессы выветривания, осадочный материал в море поступает в основном за счет абразии берегов, эрозии дна и в виде речных выносов. В балансе осадочного вещества доминирует терригенный материал.

Из крупных рек непосредственно в Гданьский бассейн впадает только р. Висла. По различным данным среднегодовой взвешенный сток р. Вислы составляет от 0,66 до 2,23 млн. т. (Блажчишин, 1976, 1984; Емельянов и др., 1986; Cyberski, 1982). Весной, во время половодья вислинские воды охватывают почти весь Гданьский залив, а при максимальном расходе реки (более 4000 м³/с) зона перемешивания речного стока выходит за пределы залива (Cyberska, Krzyminski, 1988). Направление, дальность распространения, глубина проникновения распресненных вислинских вод зависят, в основном, от объема стока и анемобарических условий. Ветра западных румбов (запад, запад-северо-запад и запад-юго-запад) вызывают отклонение речной струи в восточном направлении, в результате вдоль побережья Калининградской области в Гданьском заливе регистрируется повышенное содержание *взвешенных веществ и сопутствующих загрязнений*. Зона перемешивания речных и морских вод имеет правостороннюю асимметрию по отношению к устью Вислы, что связывают с силой Кориолиса и преобладанием западных ветров (Прандке и др., 1987; Тшосиньская и др., 1987).

Остальные реки впадают в Куршский и Вислинский заливы, где и депонируют большую часть взвешенного материала. В результате через Клайпедский пролив (сток р. Неман) в море поступает всего лишь 0,23 млн. т осадочного вещества в год, а через Балтийский пролив (сток р. Преголя) – 0,01 млн. т (Блажчишин, 1984).

Ежегодный дампинг в юго-восточной части Гданьского бассейна с учетом польских портов Гданьск и Гдыня может давать вклад в поставку осадочного вещества, сопоставимый по величине с вкладами абразии и рек (Блажчишин, 1998б; Uscinowicz, 1997). Вклад атмосферных выпадений в поставку осадочного материала невелик и находится в пределах погрешности оценок основных источников.

В Гданьском бассейне за год продуцируется около 6 млн. т биогенного вещества (Блажчишин, 1984), но в основном это вещество, потребляясь в пищевых цепях, вновь возвращается в биологический круговорот. Это обуславливает накопление в Гданьском бассейне всего лишь одной генетической группы осадков — терригенной (Емельянов, 1987). Суммируя вклады всех основных источников, получим, что ежегодно на дно российской части Гданьского бассейна поступает примерно 4-5 млн. т осадочного вещества.

Исследования 80-х годов показали, что сильная изменчивость концентрации взвеси, как в поверхностном, так и глубинном (придонном) слоях моря обусловлена влиянием источников осадочного вещества. К примеру, в юго-восточной Балтике значительное влияние на концентрацию взвеси оказывает сток р. Вислы. Направление, дальность распространения, глубина проникновения мутных и распресненных вислинских вод зависят, в основном, от объема стока и анемобарических условий. Весной, во время половодья воды р. Висла охватывают почти весь Гданьский залив и могут выходить за его пределы в центральную Балтику [Cyberska, Krzyminski, 1988], где мощность поверхностного слоя вод, подверженного влиянию вислинского стока, не превосходит нескольких метров. Зона перемешивания речных вод имеет правостороннюю асимметрию по отношению к устью р. Вислы, что обусловлено силой Кориолиса и преобладанием западных ветров [Прандке и др., 1987; Тшосиньская и др., 1987], т. е. в сторону западного побережья Калининградской области. В придонном слое приустьевой области р. Вислы также отмечалась высокая концентрация взвеси (до 6,6 мг/л), и было высказано предположение о возможности распространения этого

придонного нефелоидного слоя в Гданьскую впадину, на глубину более 100 м [Емельянов и др., 1987].

Исследования, проводившиеся в 90-х годах, показали влияние на концентрацию взвеси в Гданьском бассейне р. Неман. Его сток в Балтийское море опосредован мелководной лагуной — Куршским заливом. Мутные лагунные воды прослеживаются в поверхностном слое моря на расстоянии до 30-35 км от Клайпедского пролива, а в придонном слое — до 5 км [Galkus, 1996]. По данным оптических спутниковых наблюдений при определенных условиях это удаление может достигать 70 км [Викторов и др., 1999], а такой же фронт стоковых вод Вислинского залива образует значительно меньший шлейф мутных вод — протяженностью около 5 км при ширине менее 1 км.

Береговая зона моря определяется как зона активного воздействия на дно волн и волновых течений [Лонгинов, Пыхов, 1981]. Она простирается от участка подводного склона, где начинается однозначный перенос донных осадков под действием волнения, до бровки берегового клифа или внешнего края аккумулятивной надводной террасы. В условиях морского побережья Калининградской области за мористую границу вдольберегового потока наносов можно принять 20-метровую изобату. Активный же перенос осадков, судя по скоростям придонных течений, происходит в пределах до 10-метровой изобаты. [Бабаков, 1998]. Распространение взвешенных наносов, а также растворенных в воде загрязнителей полностью определяется закономерностями гидродинамики береговой зоны [Сафьянов, 1978].

Береговая зона, располагаясь на границе литосферы, гидросферы и атмосферы, подвержена влиянию и воздействию разнообразных природно-техногенных факторов и процессов. Наиболее масштабные проявления антропогенного фактора в пределах береговой зоны связаны с подводными конусами выноса пульпового материала. Вблизи места сброса пульпы Калининградского янтарного комбината формируется сплошная литоральная полоса не сортированных алевро-глинистых песков, в значительной степени имеющая техногенный характер. Присутствие пульпового материала в донных осадках прибрежной полосы, фиксируемое по минеральным частицам, идентифицируемым по своим морфометрическим характеристикам, отмечаются в потоках вдольбереговых наносов от п. Янтарный до границы с Польшей.

Участки гравийно-галечных накоплений и валунно-глыбовой отмостки в береговой зоне обычно наблюдаются напротив мысов и чаще всего «насажены» на

выступы моренного рельефа. Вместе с тем обширные поля валунов с галькой и щебнем распространены и в пределах относительно ровного дна. Здесь они накопились при размыве покровных четвертичных отложений ледникового и водно-ледникового генезиса. Валунно-глыбовая отмостка в береговой зоне иногда покрывает и выходы коренных пород.

Морское дно в пределах прибрежного мелководья менее динамичная среда, чем в береговой зоне. Однако гидродинамические факторы и процессы, действующие в расположенной над ним водной толще, оказывают заметное влияние на динамику слагающих дно наносов. Это зона замедленного и неустойчивого осадконакопления. Она является преимущественно транзитной для дисперсного материала, поступающего со стороны берега и отлагающегося в глубоководной части Гданьского бассейна. Участки донной эрозии находятся, главным образом, в районе, примыкающем к мысу Таран, и характеризуются большой мозаичностью.

Принято считать, что галоклин является литодинамическим (седиментационным) барьером и, как правило, контролирует положение границы глубоководной седиментационной области. Галоклин отличается высокими значениями гидростатической устойчивости, эффективно препятствующей седиментации и турбулентному обмену физическими, химическими и биологическими свойствами вод между верхним и нижним слоями. Он «пробивается» илистым материалом только вблизи мощных источников осадочного вещества (р. Висла) [Uscinowicz, 1997]. Противоположный эффект, когда верхняя граница илов располагается заметно ниже галоклина, связан, напротив, с достаточно большим дефицитом осадочного вещества. Ниже галоклина (свыше 80 м) расположена зона придонных вод североморского происхождения. В целом, она довольно однообразна – это зона преобладания аккумуляции осадочного вещества. Она соответствует нефелоидной седиментационной обстановке, где осадконакопление происходит за счет гравитационного осаждения взвешенных частиц, частично биогенного происхождения, частично терригенного. Преобладание глинистых частиц и значительные содержания органики определяют высокие сорбирующие свойства донных осадков [Сивков и др., 2017].

Таким образом, общая схема динамики осадков в Гданьском бассейне выглядит следующим образом. Береговая зона моря является ареной активного современного волнового воздействия. В волноприбойной зоне (зоне волновой переработки)

происходит интенсивная механическая сепарация осадочного вещества. В результате на малых глубинах – в прибрежной зоне седиментации – накапливаются полевошпатово-кварцевые пески, мористее – крупные алевриты. Отсепарированный от крупных фракций алевритово-пелитовый осадочный материал практически не откладывается на *прибрежном мелководье*, проходя его транзитом в направлении Гданьской впадины. Условия для аккумуляции илов возникают только в гидродинамически пассивной глубинной части Гданьской впадины, а именно ниже пикноклина (галоклина) – скачка плотности (солености) морских вод.

Результаты мониторинга ЛУКОЙЛ-КМН. Сильная сезонная, синоптическая и суточная изменчивость концентрации взвеси при отсутствии регулярно повторяющихся синхронных съемок препятствует созданию обеспеченных фактическим материалом карт распределения. Эта проблема в известной степени была преодолена для восточной части Гданьского бассейна, где с 2003 года ведется экологический мониторинг морской нефтедобычи, и одним из наблюдаемых параметров мониторинга является весовая концентрация взвеси. Полученные в ходе мониторинга средние многолетние данные для фиксированных точек позволили подойти к картированию ее средних многолетних значений [Дубравин и др., 2012].

Вертикальное распределение средних межгодовых значений концентрации взвеси имело два максимума — в поверхностном (0,6–3,2 мг/л) и придонном слоях (0,4–3,1 мг/л) и минимум в промежуточном слое (от термоклина до галоклина). Поэтому карты-схемы были составлены для поверхностного и придонного горизонтов.

По данным мониторинга за пределами береговой зоны (ширина 5–25 км, глубина до 30 м) средняя концентрация взвеси в придонном слое не превышает 1,0 мг/л (Рисунок 14а).

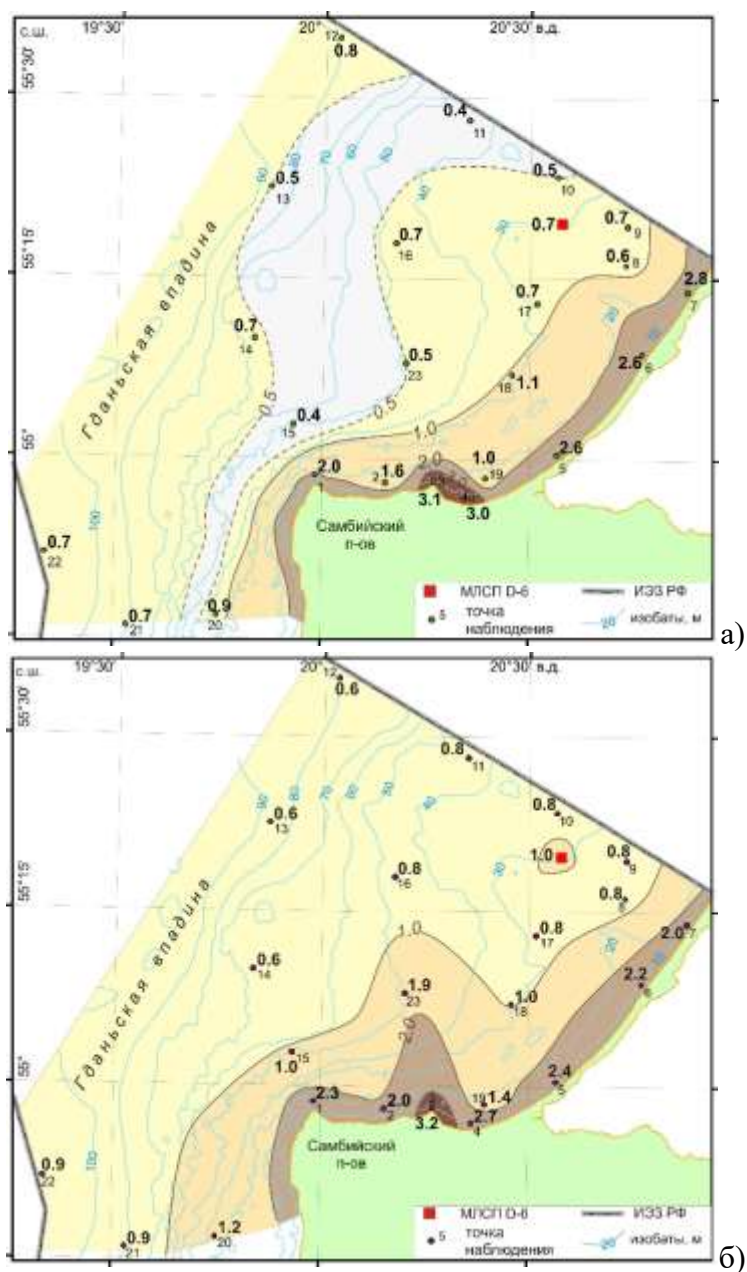


Рисунок 14. Средняя за период наблюдений (2003-2011 гг.) концентрация взвеси (мг/л): а) в придонном (1-2 м от дна); б) в поверхностном (0-1 м) слоях. Пунктиром обозначен разрез из нескольких точек мониторинга

В поверхностном слое прибрежная полоса высокой концентрации взвеси (1,0 мг/л) несколько шире придонной — 10–30 км (Рисунок 14б). Влияние стока р. Вислы и р. Неман (Куршского залива) на средние значения концентрации взвеси не очевидно. За пределами береговой зоны выявлено локальное повышение концентрации взвеси у

нефтяной платформы. Оно обусловлено, по-видимому, «островным эффектом» платформы, способствующим активизации биопродукционных процессов.

Максимальные значения концентрации взвеси, как в придонном, так и в поверхностном слое локализуются у северного побережья Самбийского полуострова. Это позволяет считать прилегающий участок берега и подводного берегового склона основным источником взвеси для восточной части Гданьского бассейна.

Основные особенности пространственного распределения взвеси в многолетнем временном масштабе хорошо видны на разрезе вдоль российско-литовской границы (пунктиром на Рисунок 14, Рисунок 15).

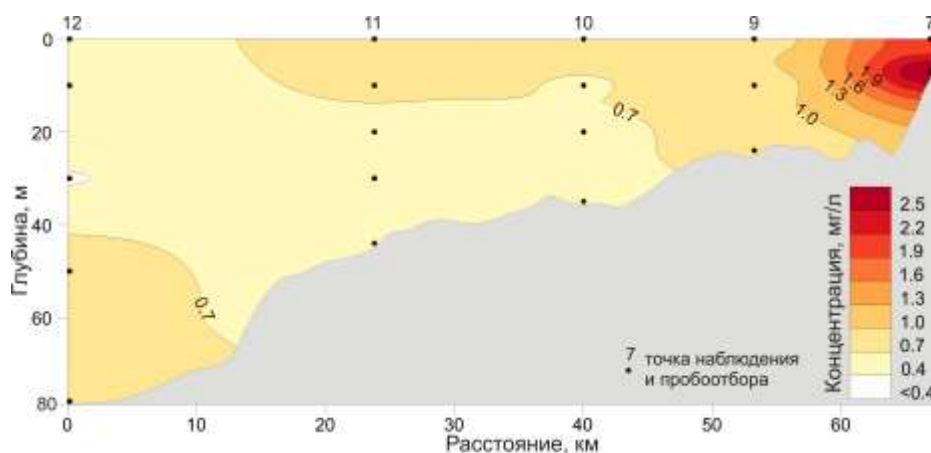


Рисунок 15. Распределение средних межгодовых значений концентрации взвеси на разрезе вдоль северной границы района мониторинга (цифры сверху рисунка — номера точек мониторинга).

Прибрежный максимум концентрации (до глубины 30 м) мористее трансформируется в приповерхностный «шлейф» мощностью 10-15 м, который заметен на расстоянии до 50 км от берега. Промежуточный минимум концентрации проецируется на дно на глубинах 30-60 м. Здесь придонный максимум не выражен. Он формируется ближе к центру Гданьской впадины, начиная с глубины 50 м, а на периферии впадины несколько заглубляется – примерно до 60 м.

В прибрежных областях Балтийского моря высокие скорости осадконакопления [Nakanson, 1999; Persson and Jonsson, 2000] по нескольким причинам. Существование сильных течений, чье направление подвержено воздействию силы Кориолиса, подразумевает, что меньшее количество материала транспортируется в открытые части

моря, поскольку эти течения перемещают взвесь вдоль берегов. Это также означает, что аллохтонные осадки из крупных рек, впадающих в Балтийское море, аллохтонное вещество из прибрежных районов и продукты ресуспензии вместе с доминирующими прибрежными течениями создают среду для высоких скоростей осадконакопления именно в прибрежной зоне. Максимальные значения, полученные с использованием динамической модели для взвешенного вещества в небольших прибрежных акваториях в [Nakanson, 1999], составили 9,2 см/год. Средняя скорость осадконакопления для этих прибрежных районов Балтийского моря составляла 2,75 см/год, что почти в 10 раз больше, чем соответствующее значение для озер — 0,4 см/год по [Nakanson and Peters, 1995].

Измерения зондом-нефелометром в Гданьской впадине в (13А рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш», лето 1987 года) показали, что придонный нефелоидный слой совпадает по глубине с галоклином, достигающим дна (70-100 м) и представляет собой чередование выраженных максимумов (пиков) и фоновых значений светорассеяния (Рисунок 16, [Сивков, Журов, 1991]). Значительно менее выраженный приповерхностный нефелоидный слой находился в поверхностном слое моря, где скапливаются биогенные частицы, с максимумом на верхней границе термоклина (глубина 20 м).

Так же, как и светорассеяние, объемная концентрация взвеси (по счетчику Коултера) возрастала на горизонтах максимальных градиентов плотности, в термоклине и, особенно, в галоклине. Эта особенность Гданьской впадины отмечалась ранее по распределению весовых концентраций взвеси [Емельянов, 1968; Емельянов и др., 1987; Прандке и др., 1981].

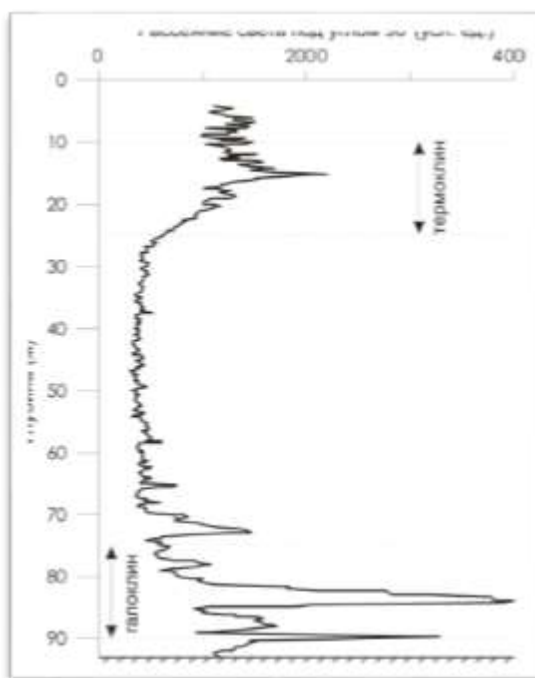


Рисунок 16. Пример вертикального распределения тонкодисперсной взвеси (показателя рассеяния света под углом 90°) в Гданьской впадине: станция АМК-1732, август 1987 г., по [Сивков, Журов, 1991].

Функция распределения частиц взвеси по размерам в поверхностном и придонном градиентных слоях, характеризовалась хорошо выраженной модой 4 мкм. В холодном промежуточном слое (ХПС) эта мода была сглажена. Как известно, существование подобных мод в интервале 2-8 мкм обусловлено броуновской коагуляцией субмикронных частиц [McCave, 1983,1984]. Поскольку скорость броуновской коагуляции значительно выше скоростей других процессов трансформации размера частиц, то выраженная мода 4 мкм свидетельствует о «молодости» взвеси, т.е. об относительно коротком времени ее пребывания в водной среде. В ходе седиментации, разложения и растворения нестойких компонентов взвеси эти моды постепенно сглаживаются, т.е. взвесь «старее». Таким образом, в термоклине и галоклине присутствовала самая «молодая» взвесь, что свидетельствует о близости источников поступления. В термоклине – это скопление детрита, образующегося в слое фотосинтеза, непосредственно над термоклином. Самая «молодая» взвесь галоклина была обнаружена в его верхней части. Следовательно, ее источник находился не на дне Гданьской впадины (глубина 100 м), а на нижней части ее склона (глубина 85 м), а глубинное скопление взвеси имеет адвективную природу. Придонные течения (15-20

см/с), способные взмучивать мелкоалевритовые и пелитовые илы, неоднократно отмечались на этих глубинах (Емельянов, Гриценко, 2004), а для поддержания тонкодисперсных частиц во взвешенном состоянии достаточно самых малых скоростей (1-5 см/с). Сильная плотностная стратификация галоклина препятствует их седиментации и способствует изопикническому, т.е. практически горизонтальному, распространению.

Концентрация взвеси в прибрежных водах заметно выше, чем в открытом море, а у устьев рек или у абразионных берегов выше, чем у аккумулятивных берегов. Наибольшее количество взвешенных частиц, наряду с повышением биомассами зоопланктона, наблюдается в зоне смешения речных вод с морскими, т.е. в устьях рек и районах выхода в море опресненных вод из мелководных заливов (эффект маргинального фильтра). В береговой зоне моря решающую роль играют гидрометеорологические условия. Интенсивное выпадение атмосферных осадков, шторм или весеннее таяние снегов могут способствовать увеличению концентрации взвеси на порядок величин. Нижнюю береговую зоны ограничивают изобатой 20 м, здесь из воды выпадет основная часть грубой, крупнее 0,05 мм взвеси, а тонкий (менее 0,01 мм) осадочный материал переносится в открытую часть моря.

Осредненные за осенне-зимний период 1987-88 гг. значения концентрации взвеси, полученные у абразионного северного побережья Калининградской области [Кожухметов, Лашенков, 1989], позволили выявить их количественную связь с волнением моря (Рисунок 17).

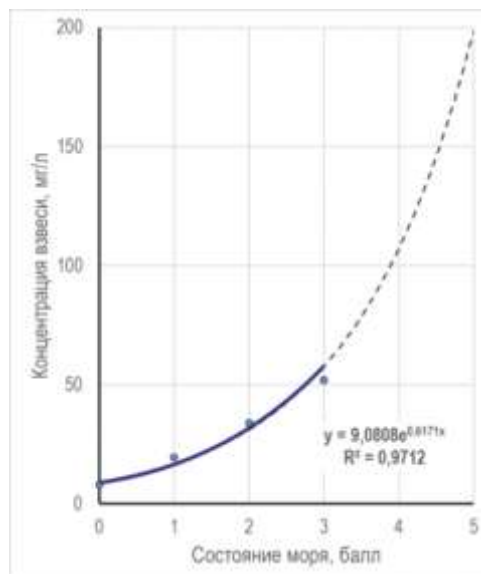


Рисунок 17. Зависимость прибрежной концентрации взвеси от волнения в диапазоне глубин от 0 до 8–10 м, по [Кожухметов, Лащенко, 1989]

Сравнительно полные представления о распределении взвеси на береговом подводном склоне были получены на северном побережье Калининградской области (август-сентябрь 1991 г.) [Блажчишин и др., 1998, Бабаков, 2003]. Сбор взвеси производился с помощью наносонакопителей длительного действия вдоль стационарных створов в диапазоне глубин от 5 до 15-19 м на 5 горизонтах (20, 40, 60, 100 и 150 см от дна). Расчет концентрации взвеси усреднялся за период экспозиции наносонакопителей по методике, разработанной в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН [Анцыферов, Косьян, 1977; Анцыферов, 1987].

Было зафиксировано преобладание концентрации взвешенных частиц в придонном слое (0,4–0,6 м) (Рисунок 18). На мелководье, в зоне обрушения волн (глубина 5–6 м), оно было выражено наиболее четко. С удалением от берега концентрация взвеси постепенно приобретала более равномерное распределение по вертикали. Среднемесячная концентрация придонной взвеси достигала 15 мг/л в зоне обрушения волн и уменьшалась до 0,5–4,5 мг/л на глубинах 13-15 м [Блажчишин и др., 1998, Бабаков, 2003].

На глубине 5–6 м во взвеси преобладала мелкозернистая песчаная фракция с медианным диаметром 0,15–0,18 мм. Ниже по склону она постепенно замещалась крупным алевритом (0,05–0,1 мм), сначала на верхних горизонтах (0,6–1,5 м), а за пределами изобаты 10 м — и в придонном слое. Именно глубже 8–10 м становится заметным эффект механической дифференциации взвеси — уменьшение крупности и концентрации. Это связано с ослаблением волнового воздействия на дно моря.

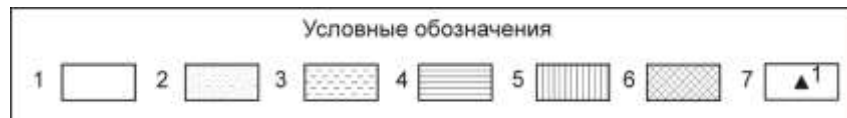
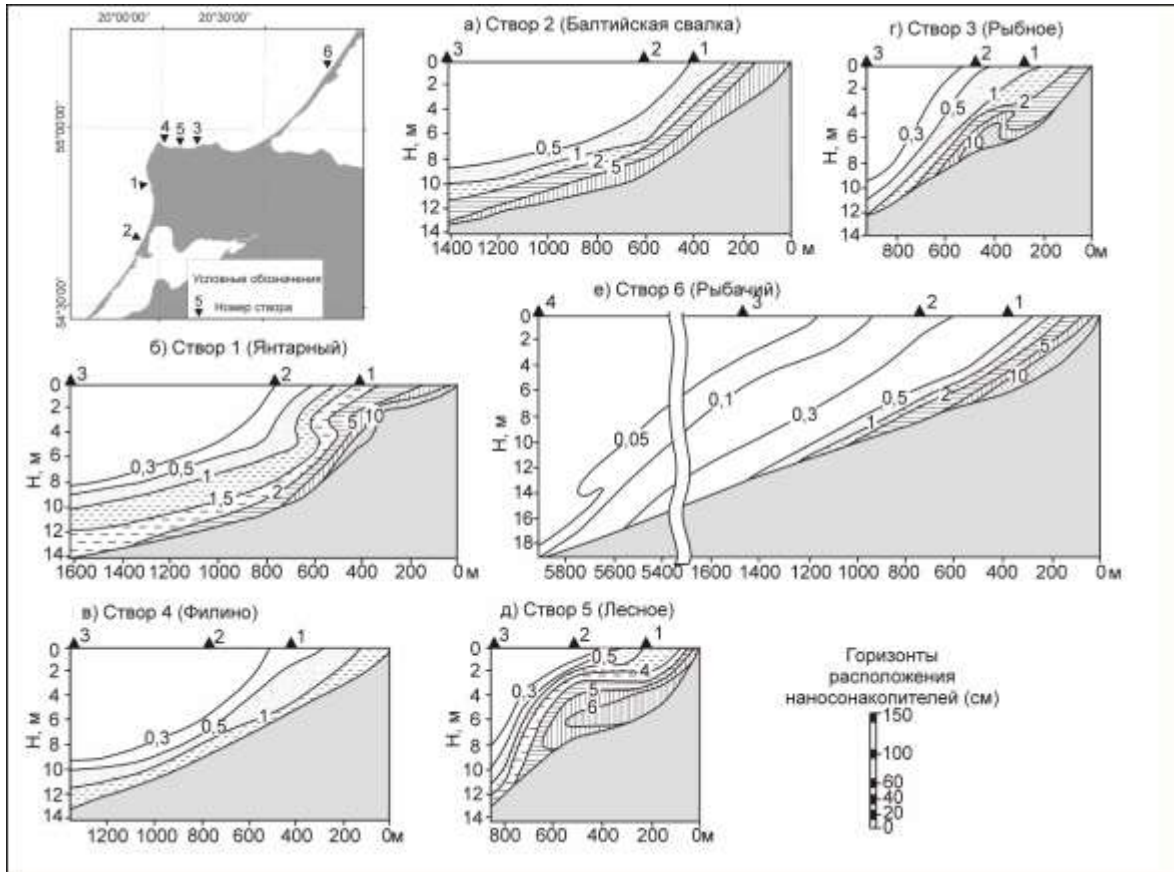


Рисунок 18. Концентрация взвешенных наносов (мг/л) в придонном слое береговой зоны калининградского побережья Балтики (август-сентябрь 1991 г.): 1 — менее 0,5, 2 — 0,5–1, 3 — 1–2, 4 — 2–5, 5 — 5–10, 6 — более 10; 7 — номер точки наблюдения в створе; на врезке - расположение створов [по Блажчишин и др., 1998].

К северо-западу от Калининградской области (Самбийского полуострова) были обнаружены области высоких концентраций взвеси, которые связывались с поступлением в море большого количества материала из карьеров янтарного комбината [Емельянов, 1968; Емельянов и др., 1986; 1987].

Позднее, на примере сбросов пульпы вскрышной породы из янтарного карьера (пос. Янтарный) с помощью зонда-нефелометра были детализированы представления о распространении в море осадочного вещества из берегового источника [Сивков, 2012]. Было замечено, что от берега протягиваются два шлейфа мутных вод – поверхностный и придонный (Рисунок 19).

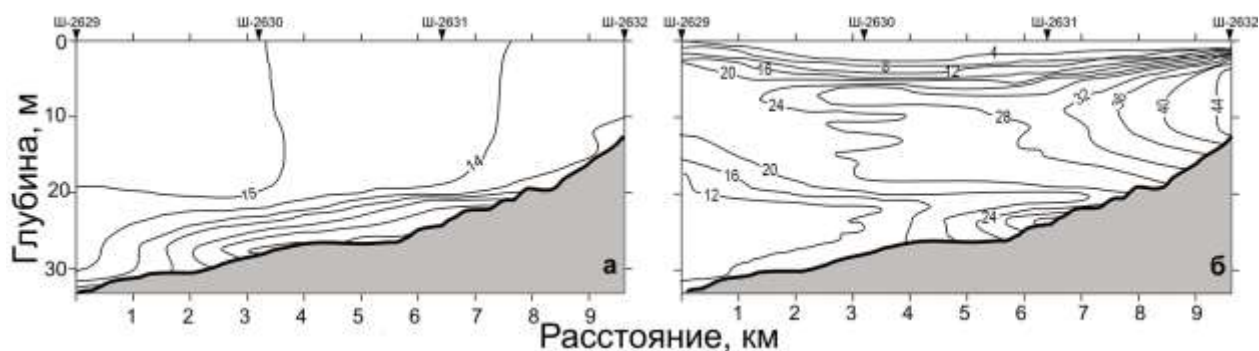


Рисунок 19. Пример распространения взвеси от берега в районе сбросов пульпы из янтарного карьера (октябрь 1992 г.): а) распределение концентрации взвеси (в условных единицах показателя светорассеяния под углом 90°), б) температура воды ($^\circ\text{C}$), по [Сивков, 2012].

Насыщенный у берега взвесью поверхностный шлейф на самом деле является подповерхностным, поскольку его верхняя граница ближе к берегу находится на глубине 2–3 м. Она выходит на поверхность моря только на некотором удалении от берега, вероятно, в связи с уменьшением плотности шлейфа из-за седиментации большей части взвеси. Распространению придонного шлейфа на глубину способствует апвеллинг.

Долгое время считалось [Кнапс, 1956; Бойнагрян, 1966], что у берегов Юго-Восточной Балтики существует единый вдольбереговой поток наносов, направленный в северном и северо-восточном направлениях. Более поздние исследования утверждали, что поток состоит из нескольких литодинамических звеньев и циркуляционных ячеек [Филимонов, 1966; Пискарьева, 1988; Бабаков, 1989; Жиндарев, Хабидов, Тризно, 1998]. В последние двадцать лет многие исследователи придерживаются концепции циркуляционных ячеек [Бабаков, 2003; Корзинин, 2012]. Согласно [Бабаков, 2003] на побережье Юго-Восточной Балтики расположено 6 крупных ячеек, внутри большинства которых формируется система встречных потоков наносов, сходящихся в центре береговых дуг. Крупные ячейки могут содержать ячейки меньшего размера, аналогично разделенные мысами.

Однако, самые последние исследования прибрежной литодинамики [Krek et al., 2016] подтверждают наличие единой литодинамической системы на северном побережье Калининградской области. Непрерывный поток наносов от м. Таран до

северной части Куршской косы по данным [Сивков и др., 2015] время от времени нарушается в месте сочленения Калининградского полуострова и Куршской косы, где находится резкий изгиб береговой линии. При ветрах северо-западных и северо-северо-западных румбов в этой области формируется зона конвергенции встречных вдольбереговых течений с образованием компенсационного взвесенесущего течения, направленного от берега в море. Именно в зонах конвергенции взвешенное вещество из береговой зоны выносятся на большие глубины.

За время изучения поведения осадочного материала у берегов Калининградской области было произведено несколько количественных оценок объема потока наносов вдоль побережья – у разных исследователей [Бойнагрян, 1966; Болдырев и др., 1979; Рябкова, 1987; Бабаков, 2003] он составлял от 150 до 250 тыс. м³/год. Кроме того, производились оценки перемещения наносов внутри ячеек — например, объем деформации внутри Светлогорской бухты ставил 2,5–3 млн. м³/год [Бабаков, 2003], что подтвердило ограниченное перемещение осадков между ячейками. Как можно заметить, количественные оценки локальны, сильно различаются и редко опираются на современные расчетные методы (Свиридова и др., 2010). Основным методом расчета вдольбереговых потоков наносов становится математическое моделирование транспорта осадков [Леонтьев, 2015].

Известно, что в береговой зоне несцепленные частицы переносятся двумя способами: во взвешенной форме, скачкообразно (путем сальтации) или перекачиванием [Bagnold, 1963, 1966, 1973, 1979]. Автор придерживается мнения, что сальтация зерен продолжает существовать при любой стадии транспорта наносов, в том числе при условиях развитой взвеси. При этом решающую роль в количестве частиц, находящихся во взвешенном состоянии, играет интенсивность волнения. [Леонтьев, 1989] в соответствии с [Bagnold, 1963, 1966, 1973, 1979] указывает, что максимальные объемные концентрации взвеси песка, регистрируемые в прибойной зоне во время шторма, не превышают 10^{-2} , в то время как средняя концентрация сальтирующих зерен, по оценке Бэгнольда, составляет 10^{-1} .

Проведенный обзор предшествующих исследований взвеси в Балтийском море в контексте современных изменений климата, растущей эвтрофикации и антропогенной нагрузки позволил выбрать направление диссертационного исследования и сформулировать его цель и задачи.

Цель диссертационной работы — оценка взвешенного вещества как индикатора геоэкологического состояния российского сектора юго-восточной части Балтийского моря.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Выявление пространственной неоднородности циркумконтинентальной и вертикальной зональности распределения взвеси по данным геоэкологического мониторинга.
2. Оценка влияния изменчивости гидролого-гидрохимических условий открытого моря на вертикальное распределение взвешенного вещества.
3. Выявление особенностей вещественного состава взвеси на характерных участках района исследований методом электронной сканирующей микроскопии.
4. Анализ трендов изменения концентрации взвеси в береговой зоне моря.

Глава 2. Материалы и методы исследования

В процессе работы над диссертационным исследованием основным источником данных служили результаты геоэкологического мониторинга юго-восточной части Балтийского моря. При сборе натуральных данных были использованы следующие методики: принудительная фильтрация морской воды, геофизическое зондирование водной толщи, метод Винклера и сканирующая электронная микроскопия. Пост-обработка полученных данных велась статистическими методами в ПО STATISTICA и картографическими методами в QGIS, ArcGis и OceanData View [Schlitzer, 2018].

Геоэкологический мониторинг Балтийского моря и его юго-восточной части. В Балтийском море самым заметным и длительным мониторингом состояния окружающей среды является мониторинг HELCOM. Мониторинг Балтийского моря проводится Хельсинкской комиссией с 1979 года по физическим, химическим и биологическим параметрам открытой части моря. По результатам мониторинга регулярно с 1980-х публикуются отчеты о состоянии окружающей среды, последний вышел в 2018 года [HELCOM, 2018] и был основан на материалах, полученных за 2006–2017 гг. План действий по Балтийскому морю, принятый в 2007 году, еще раз подчеркивает необходимость мониторинга, оценки изменений морской среды и прогнозирования возможных путей развития. Стратегия мониторинга и оценки ХЕЛКОМ была пересмотрена в 2013 году с целью поддержки мониторинга, который фокусируется на ключевых индикаторах. Результаты оценки HELCOM являются основой для принятия обоснованных решений по восстановлению экосистемы Балтийского моря, поддержки реализации мероприятий комиссии и выявления возникающих экологических проблем. Скоординированные региональные программы мониторинга в разных частях Балтийского моря являются для этого необходимыми. Мониторинг ХЕЛКОМ предоставляет необходимые данные для регулярной оценки состояния Балтийского моря, уровня воздействия человека и его последствий, влияющих на морскую среду. Это также позволяет оценить степень эффективности мер противодействия нерациональному использованию моря.

Мониторинг ХЕЛКОМ включает наблюдения за следующими компонентами: биологическое разнообразие, виды-вселенцы, рыбохозяйственные ресурсы, морские пищевые сети, эвтрофикация, целостность морского дна, загрязняющие вещества, морской мусор, подводный шум.

Основные мониторинговые точки HELCOM носят название станций ВУ и расположены вдоль центрального профиля Балтийского моря (Рисунок 20). В российском секторе Юго-Восточной Балтики нет мониторинговых точек, входящих в систему HELCOM, поэтому по многим параметрам эта акватория остается «белым пятном» для международного сообщества.

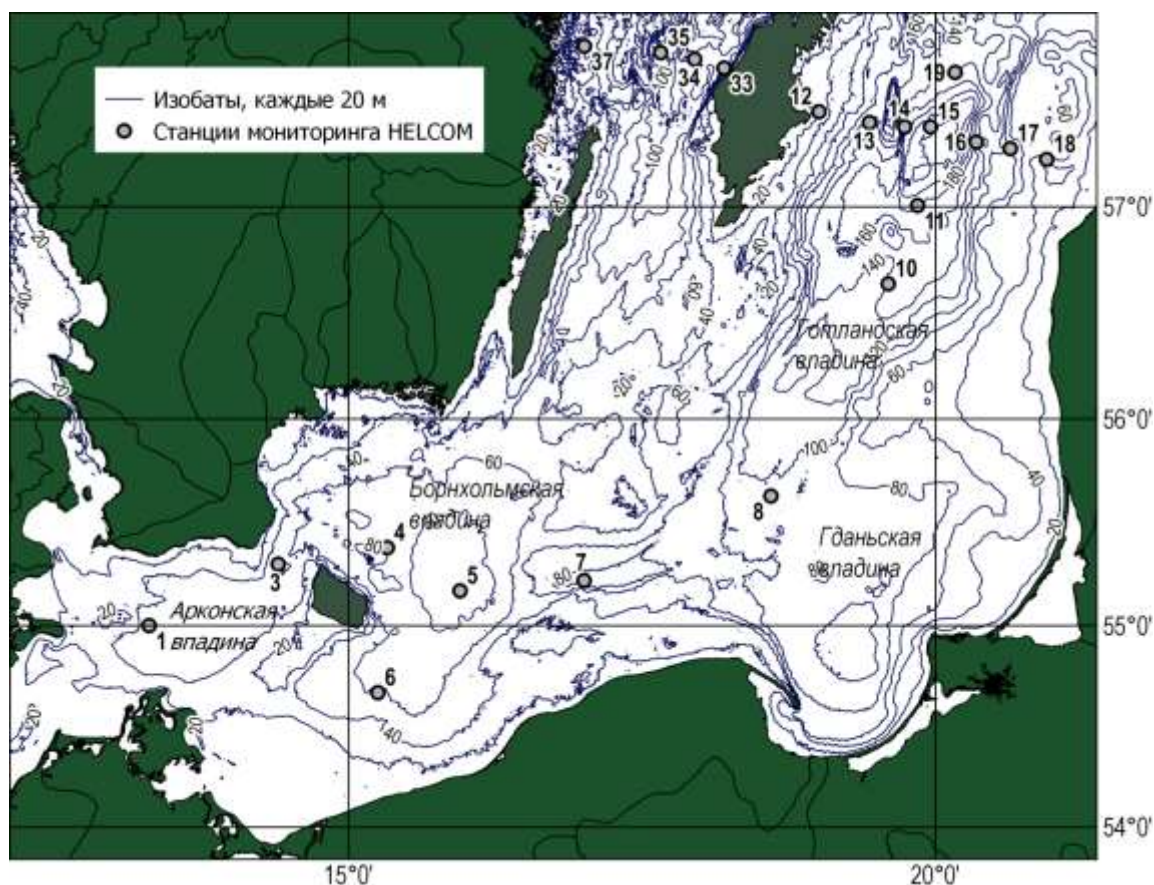


Рисунок 20. Мониторинговые точки HELCOM.

В 2003 г. была разработана и согласована с природоохранными органами «Программа производственного экологического мониторинга ООО «ЛУКОЙЛ-КМН» при обустройстве и эксплуатации нефтяного месторождения Кравцовское (D-6) в Балтийском море» (далее программа мониторинга) (Программа..., 2003). В правовом отношении она опирается на действующие законодательные и нормативные акты и международные соглашения Российской Федерации. Особое внимание уделено требованиям Конвенции по охране морской среды Балтийского моря (Хельсинки, 1992 г.) в части организации мониторинга в районах разработки нефтяных месторождений на

континентальном шельфе. Конвенция и рекомендации 18/2 Хельсинской комиссии (ХЕЛКОМ) предполагают в ходе деятельности на шельфе проведение мониторинга окружающей среды по ряду параметров, начиная со стадии проектирования. В теоретическом плане программа мониторинга опирается на характерные особенности и тенденции современных национальных и международных программ морского мониторинга, обобщенные С.А. Патиным (2001), а в методическом плане — по ряду направлений — на аналогичную программу ОАО НК «ЛУКОЙЛ» на Северном Каспии (Программа..., 2002).

В основу диссертационного исследования легли результаты производственного мониторинга ООО «ЛУКОЙЛ-КМН» за 2003–2018 гг. (Рисунок 21). Собраны данные концентрации взвеси по 2895 пробам, 620 из которых собраны автором работы. Географически точки измерений тяготеют к северному побережью Калининградского полуострова и Куршской косы, поскольку именно здесь расположена МЛСП Д6.

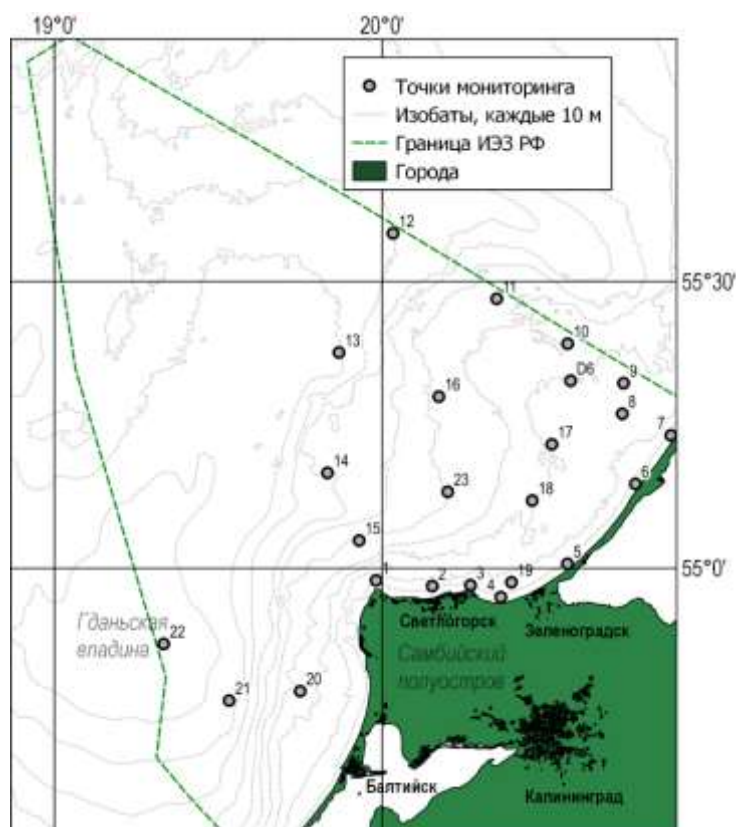


Рисунок 21. Расположение точек наблюдений производственного мониторинга ООО «ЛУКОЙЛ-КМН» за 2003–2018 год.

Таким образом, существует острая нехватка точек мониторинга в открытой части российского сектора Юго-Восточной Балтики, в особенности, к западу от

Калининградского полуострова. Такие точки позволили бы контролировать изменения среды по гораздо большей площади, что становится особенно важным, поскольку акватория отличается высоким уровнем эвтрофированности и хозяйственного использования, и, в то же время, находится вне сети мониторинга HELCOM.

Нехватка точек в открытой части моря была дополнена комплексными исследованиями Юго-Восточной Балтики, проводившиеся с 2015 по 2018 год Атлантическим отделением Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Комплексный мониторинг экологических условий в юго-восточной часть Балтийского моря, включающий в себя изучение взвешенного вещества, осуществляет Атлантическое отделение Института океанологии согласно своему Государственному заданию. Сбор натуральных данных не всегда осуществляется по регулярной сетке координат, но охватывает большую площадь акватории. Были использованы данные экспедиций ИО РАН за период с 2015 по 2018 гг. (табл. 2).

Таблица 2. Данные о судовых съемках в юго-восточной части Балтийского моря

Дата	Судно, номер рейса	Количество проб всего	Количество проб СЭМ
24–25.04.2015	Норд-3, б/н	25	-
07.08.2015	Норд-3, б/н	23	-
29–30.10.2015	НИС «Академик Мстислав Келдыш», 64	25	
31.03–01.04.2016	НИС «Профессор Штокман», 131	29	
12.06–13.06.2016	НИС «Профессор Штокман», 132	18	
22.07.2016	НИС «Профессор Штокман», 133	22	
27.10–28.10.2016	НИС «Профессор Штокман», 134	7	
25.12.2016	НИС «Академик Николай Страхов», 33	18	1
04.04–05.04.2017	НИС «Профессор Штокман», 135	28	1
27–28.07.2017	НИС «Академик Николай Страхов», 35	21	12
25.10.2017	НИС «Академик Николай Страхов», 37	22	1
09.08–10.08.2018	НИС «Академик Борис Петров», 43	34	5
27.10.2018	НИС «Академик Борис Петров», 44	12	5

Основной целью мониторинга ИО РАН являлось изучение вертикального распределения взвешенного вещества на опорном разрезе, расположенном между центром Гданьской впадины и южным склоном Готландской впадины, проходя, таким образом, над Гданьско-Готландским порогом (Рисунок 22). Его протяженность составляла 122 км, такое расположение разреза позволяет контролировать обе ветви залива североморских вод после его разделения на выходе из Слупского желоба. Все судовые работы проводились на фоне гидрологических измерений, в связи с чем, можно утверждать, что нам удалось зафиксировать непосредственное распределение взвешенного вещества на гидрологическом фоне.

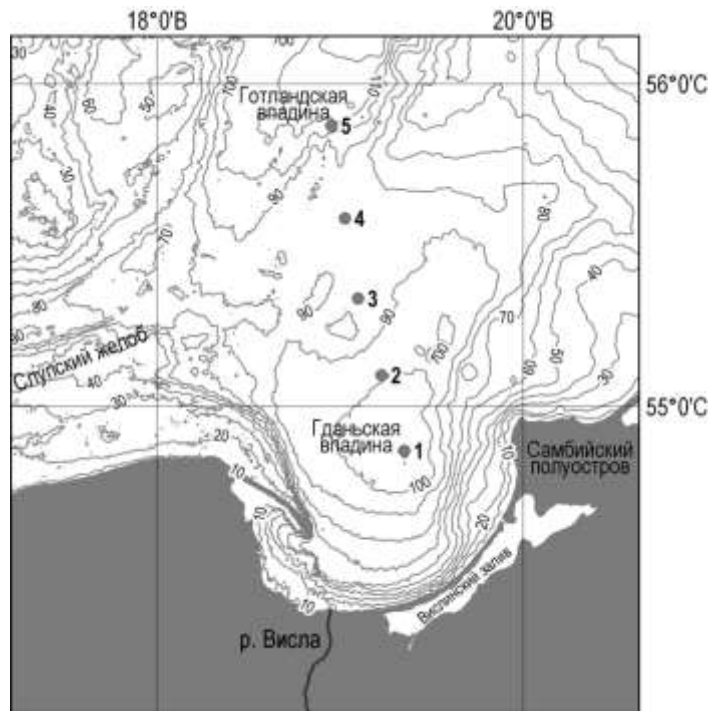


Рисунок 22. Точки мониторинга, входящие в опорный разрез в Юго-Восточной Балтике

Точка мониторинга ИО РАН №1 совпадает с точкой мониторинга «ЛУКОЙЛ-КМН», являясь своеобразной референсной точкой наблюдений. Она расположена на северной границе Гданьского залива и одновременно в центре Гданьской впадины (104 м), дно которой покрыто черным гомогенным пелитово-алевритовым илом с запахом сероводорода (здесь и далее тип осадка приведен согласно рейсовому отчету ПШ131). Такие же осадки находятся на поверхности дна в районе точки мониторинга 2 (глубина

97 м), расположенной над северным склоном Гданьской впадины. Точка мониторинга 3 (глубина 78 м) располагается над южной частью Гданьско-Готландского порога, покрытой серым гомогенным пелитовым илом. Точка мониторинга 4 (глубина 84 м) расположена над южной частью Гданьско-Готландского порога, подстилающие осадки – пелитово-алевритовый коричневый ил. Наконец, точка мониторинга 5 (глубина 104 м) находится на склоне Готландской впадины, донные осадки представлены здесь окисленным зеленовато-серым обводненным илом с примесью песчаной фракции. Анализ вертикального распределения взвеси выполнялся по 7 сямкам.

Осреднение полученных данных весовой концентрации взвешенного вещества проводилась по точкам. Среднее арифметическое рассчитывалось после удаления выбросов в данных с помощью правила трех сигм (Рисунок 23).

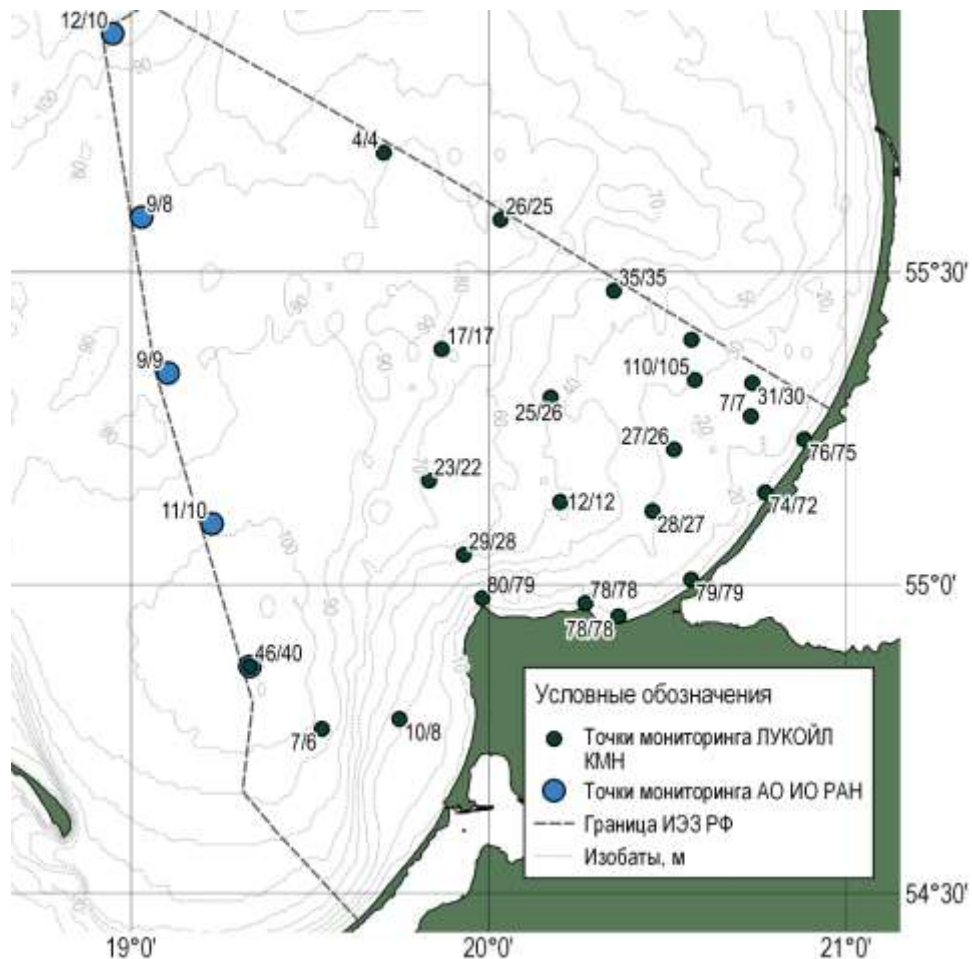


Рисунок 23. Усовершенствованная схема мониторинга. Количество измерений в точках мониторинга в поверхностном/придонном слое.

Схема на рис. 23 демонстрирует явный недостаток точек наблюдений в районе западного побережья Калининградского полуострова, где расположен важный антропогенный источник взвеси — Калининградский янтарный комбинат. По этой причине в 2019 году было проведен локальный геоэкологический мониторинг данной акватории в связи с повысившимися объемами стока пульпы и растущей рекреационной привлекательностью региона. Главным изучаемым параметром была концентрация взвешенного вещества в береговой зоне пос. Янтарный. Схема расположения точек отбора проб представлена на (Рисунок 24).

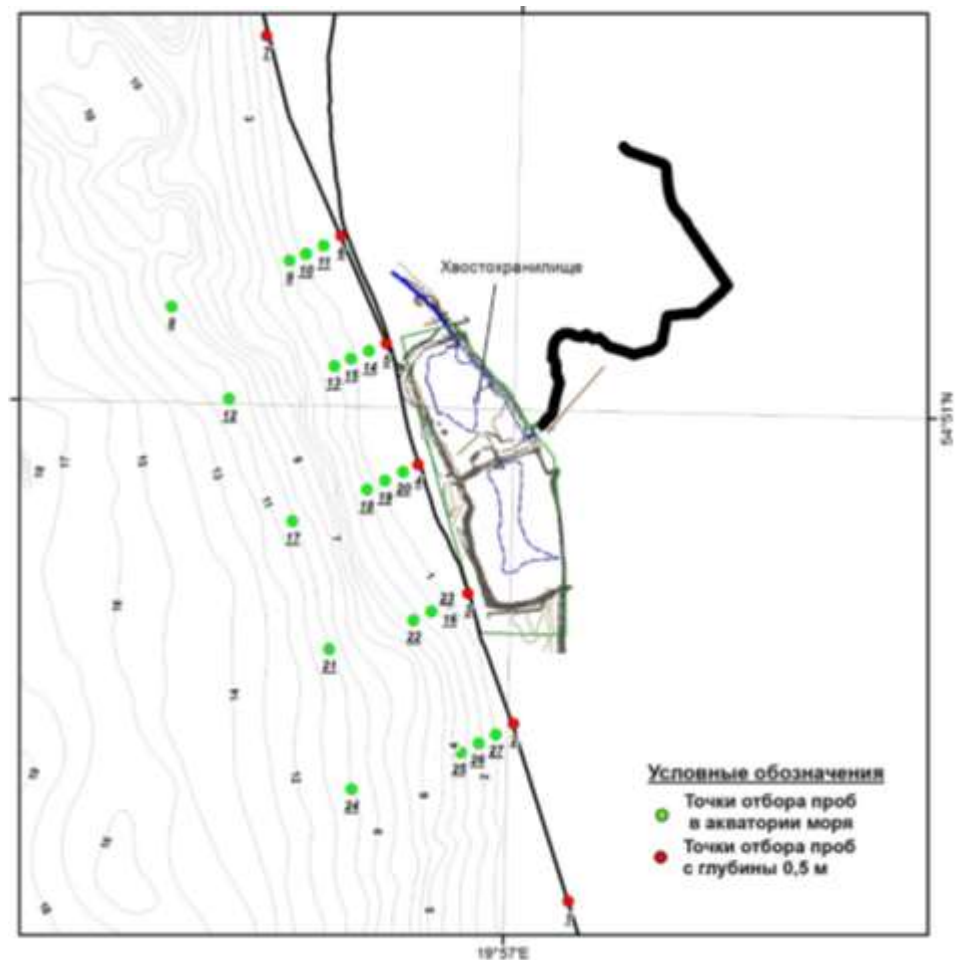


Рисунок 24. Схема расположения точек отбора проб.

Фильтрация взвешенного вещества. Метод фильтрации стал применяться еще в первой половине XX века, когда в качестве мембраны использовались плотные бумажные фильтры (Поляков, 1935). Также использовались и тонкие инертные порошки талька, силикагеля, диатомовой земли, оксида магния или железа, которые наносились на бумажные фильтры и могли удаляться с бумаги после фильтрации [Fox et al, 1952].

Мембранные фильтры с порами малого размера начали применяться А.П. Лисицыным в 1950-х гг. [Лисицын, 1956]. Мембранные фильтры для ультрафильтрации под вакуумом существовали с порами нескольких размеров — от 0,35 мкм до 1,2 мкм [Родина, 1950], однако применялись, в основном, фильтры с диаметром пор 0,5 мкм и 0,7 мкм, которые обеспечивали достаточную скорость фильтрации.

В настоящей работе сбор взвешенного вещества для последующего определения его массовой (весовой) концентрации, измеряемой в мг/л, и изучения вещественного состава осуществляется методом ультрафильтрации через предварительно взвешенные и пронумерованные мембранные ядерные фильтры (пр-во Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатории ядерных реакций) с размером пор 0,4 мкм и диаметром 47 мм. Для фильтрации используются герметичные воронки фирмы Sartorius объемом 250 мл, призванные исключить попадание на фильтр дополнительных взвешенных частиц из воздуха. Для исключения лабораторного загрязнения проб при каждой фильтрации выставлялся чистый фильтр с аналогичным размером пор, время экспозиции которого составляло до 12 часов.

После фильтрации непосредственно пробы морской воды, через фильтр пропускается 100 мл бидистиллированной воды, чтобы растворить морскую соль. Для Балтийского моря такой объем был рассчитан исходя из расчётов [Woźniak et al., 2011], где при солёности от 0,6 до 8,3 пробы фильтры промывали 60 мл деионизированной воды. Солёность в отобранных пробах в юго-восточной части Балтийского моря достигала 14 промилле, поэтому для промывания пробы объем бидистиллята был увеличен.

Суть метода ультрафильтрации заключается в мембранной очистке жидкости, в процессе которой раствор проходит фильтрацию за счет разности молекулярных масс растворителя и взвешенного вещества и различающегося давления по разные стороны мембраны (в данном случае — мембранного фильтра), которая пропускает через себя лишь определенные компоненты раствора (частицы меньшего диаметра, чем размер пор). Все частицы с размером больше диаметра ячеек остаются по другую сторону фильтра и не попадают в приемную колбу вместе с водой. Этот способ имеет сходство с очисткой воды методом обратного осмоса. Фильтрация воды для выделения взвешенного вещества на ядерных мембранных фильтрах с диаметром 0,4 мкм проводится под вакуумом 0,4 МПа.

Электронная сканирующая микроскопия. Электронный микроскоп благодаря высокой разрешающей способности (более чем на два порядка выше по сравнению со световым микроскопом) позволяет наблюдать тонкие особенности и детали структуры микрообъектов на атомно-молекулярном уровне.

В настоящей работе был использован сканирующий электронный микроскоп Quanta 250 Fei. Разрешение электронного микроскопа достигает 3 нм, а возможность работы в режиме, как высокого вакуума и низкого вакуума, так и в режиме «естественной среды» позволяют работать практически с любыми образцами. Среди технических характеристик микроскопа:

- высокопроизводительная термоэмиссионная колонна SEM с двуханодной геометрией электронной пушки;
- неподвижная апертура объектива;
- линза объектива 45° с дифференциальной откачкой через линзу и подогреваемые апертуры объектива;
- максимальная ширина поля зрения: 6,5 мм при аналитическом рабочем расстоянии (10 мм); 11,3 мм при рабочем расстоянии 25 мм.

Для определения вещественного состава частиц взвеси использовалось следующее дополнительное оборудование:

- Детектор вторичных электронов (SED) Эверхарта — Торнли;
- Низковакуумный детектор вторичных электронов большого поля (LFD);
- Высокочувствительный низковольтный детектор обратно отраженных электронов SS-BSED.

Образцы не полировались, покрывались слоем угля толщиной 15 нм и плотностью 2,25 д/см³.

Измерения основных гидрологических характеристик в точках мониторинга осуществлялось при помощи двух *мультипараметрических зондов* с сопоставимыми характеристиками. Зондирования выполнялись от поверхности до дна. Измерения производились в режиме свободного скольжения зонда по тросу с сохранением данных на внутреннем носителе. Скорость опускания прибора составляла около 0,7–0,8 м/с. Такой метод дает возможность регистрации изменений параметров с высоким разрешением.

Зонд CTD90M. Произведен фирмой Sea&Sun Technology (Германия).

Определяемые параметры:

- температура, в градусах Цельсия;
- электропроводность, в миллисименсах на сантиметр;
- давление, в децибарах;

Зонд автоматически вычисляет следующие параметры:

- соленость, в единицах практической шкалы солености (пес).

Характеристики установленных на приборе датчиков приведены в таблице 3.

Таблица 3 — Метрологические характеристики датчиков, установленных на зонде
STD90M

Характеристика/ Параметр	Модель датчика	Диапазон измерений	Точность
Электропроводность, (мС/м)	ADM 7-ми электродная ячейка	0–65	0,002
Температура, (°C)	Sea&Sun Technology Pt 100	-2–36	0,005
Давление, (дБар)	Keller PA7-50	0–500	0,1% от измеренного значения,
Мутность (ЕМФ)	Seapoint Bulkhead	0–1250	< 2%.

Зонд Ocean Seven 316 Plus. Произведен фирмой Idronaut (Италия). Зонд выполняет измерения с частотой 15 Гц, в каждом измерении определяются следующие параметры: температура (градусы Цельсия); электропроводность (миллисименсы на сантиметр); давление, (децибары). При выполнении измерений автоматически вычисляются следующие показатели: соленость (единицы практической шкалы солености). Характеристики установленных на приборе датчиков приведены в таблице 4.

Таблица 4 — Метрологические характеристики датчиков, установленных на зонде
Idronaut Ocean Seven 316 Plus

Характеристика/ Параметр	Модель датчика	Диапазон измерений	Точность
Электропроводность, (мС/м)	IDRONAUT. 7-ми электродная кварцевая ячейка	0–70	0,003
Температура, (°C)	IDRONAUT. Платиновый термоэлектрод	-3–50	0,002
Давление, (дБар)	IDRONAUT. Пьезорезистивный датчик	0–1000	0,05% от измеренного значения,

Мутность (ЕМФ)	Seapoint Bulkhead	0–750	<2%
----------------	-------------------	-------	-----

Определение концентрации растворенного кислорода в пробах морской воды выполнялись методом Винклера [Методика ВНИРО, 1991] при помощи ручного титратор-дозатор Аквилон АТП-1Д с номинальной вместимостью до 30 мл. Устройство, используется для объемного титрования и как высокоточный дозатор жидкости с объемом дозирования от 0,5 до 99,99 мл и точностью 0,01 мл.

Глава 3. Пространственно-временная изменчивость концентрации и состава взвеси

3.1. Среднегодовое распределение взвеси в поверхностном и придонном слоях моря

Среднегодовое (2003–2018) пространственное распределение взвешенного вещества в *поверхностном слое* (Рисунок 25), соответствует циркумконтинентальной зональности [Айзатуллин и др., 1976], поскольку абсолютные максимальные значения концентрации взвеси наблюдались в прибрежной зоне Калининградского полуострова. Как известно, концентрация взвеси в прибрежных водах всегда заметно выше, чем в открытом море, а у устьев рек или у абразионных берегов выше, чем у аккумулятивных берегов. Граница прибрежной зоны и открытой части моря проводилась по изобате 20 м. В сторону открытого моря концентрация уменьшается по экспоненте.

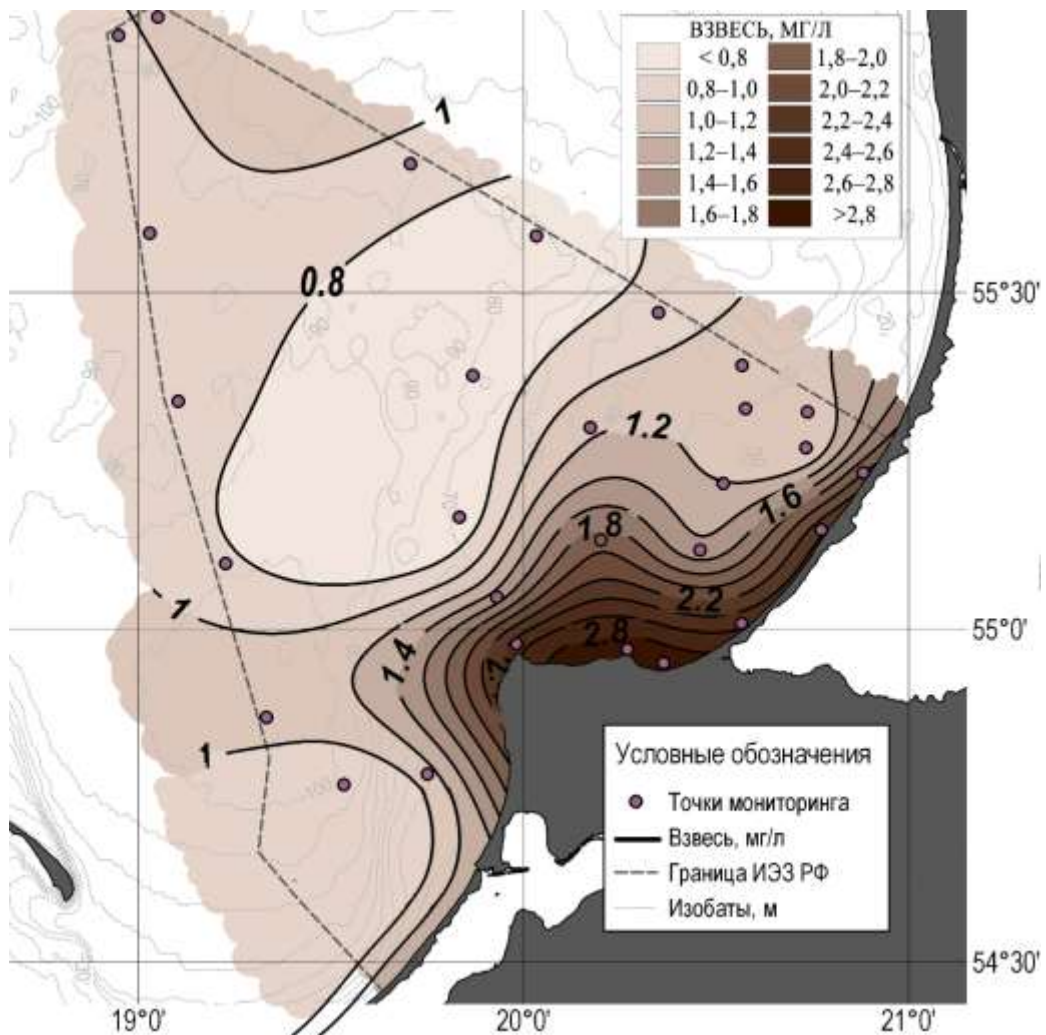


Рисунок 25. Среднемноголетнее распространение взвешенного вещества в поверхностном слое юго-восточной части Балтийского моря.

Абсолютный максимум концентрации взвеси составляет 3,0 мг/л в точке за мысом Гвардейский, где располагаются сразу природный источник терригенной взвеси (абразионный участок берега), антропогенный источник терригенной взвеси (порт Пионерский в стадии строительства и терминал по приему сжиженного природного газа) и природный источник биогенной взвеси (мелководная хорошо прогреваемая бухта). По мере удаления от точки с максимальными значениями концентрация взвеси уменьшается до 2,0 мг/л в береговой зоне и до еще меньших значений в открытом море. В открытой части моря концентрации взвешенного вещества не превышает 1,2 мг/л, но и не опускается ниже 0,6 мг/л.

Пространственное распределение взвешенного вещества в *придонном слое* Гданьского бассейна также следует закону циркумконтинентальной зональности, как и в поверхностном слое (Рисунок 26): постепенное снижение концентрации взвешенного вещества по мере удаления от берега. Тем не менее, абсолютные значения концентрации взвешенного вещества в придонном слое будут ниже, чем на поверхности.

Различие в абсолютных значениях концентрации взвеси вызвано меньшим влиянием на придонных слой биогенного продуцирования взвеси. Тем не менее, локализация максимальных значений в придонном слое и поверхностном совпадает: максимум в прибрежной зоне также приурочен к востоку от м. Гвардейский и достигает 2,85 мг/л. У берегов национального парка «Куршская коса» значения уменьшаются до 2,3 и 2,1 мг/л по мере удаления от Калининградского полуострова.

Содержание взвешенного вещества в придонном слое открытой части моря больше зависит от рельефа дна. Так, максимальные значения наблюдались в центральной части Гданьской впадины (до 1,0 мг/л), а минимальные — на Гданьско–Готландский пороге (0,4–0,8 мг/л). В придонном слое выделяется промежуточный минимум концентрации взвеси, расположенный между 40 и 70 м. В придонном слое Гданьской впадины выделяется повышение концентрации взвешенного вещества, связанное с наличием придонного нефелоидного слоя.

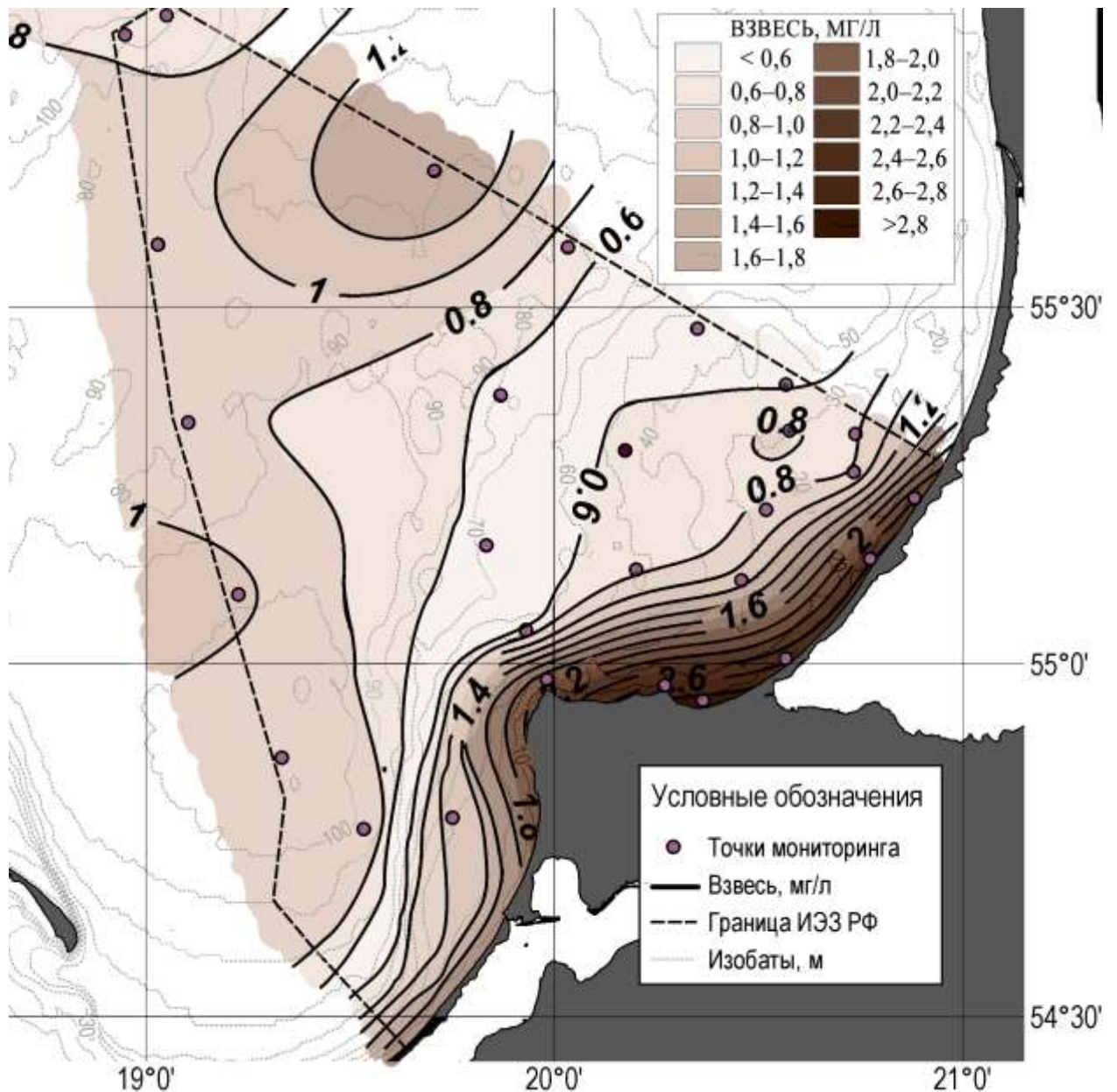


Рисунок 26. Среднегодовое распространение взвешенного вещества в придонном слое юго-восточной части Балтийского моря.

Высокие концентрации взвешенного вещества в прибрежной зоне связаны с развивающимся процессом эвтрофикации Балтийского моря, где наибольший вклад вносят сине-зеленые азотфиксирующие водоросли. Основным лимитирующим фактором их развития является температура воды. За последние двадцать лет можно наблюдать тенденцию к увеличению температуры Балтики. Польские ученые [Rak, Wieszorek, 2012], основываясь на экспедиционных данных с 1994 по 2010 гг. отмечают положительные тренды температуры поверхностного слоя — от 0,056 до 0,07 °C в год в Борнхольмской впадине, а также 0,09–0,11 °C в год в Слупском желобе и Гданьской

впадине. Кроме того, по мнению авторов, время максимального прогрева поверхности сместилось на начало сентября. По данным [State and Evolution ..., 2008] в слое от 0 до 23 м в акватории Борнхольмской впадины значения температуры превышают климатические для августа на 1,8–2,1 °С. В акватории Гданьской впадины поверхностный слой, мощностью до 12–15 м также на 2,1–2,2 °С выше среднемесячных значений для августа. В работе [Rak, Wiczorek, 2012] показано, что среднегодовая температура придонного слоя в период с 1994 по 2010 гг. в южной и юго-восточной Балтике находится в пределах 6,0–7,5 °С. Авторы также отмечают в придонном слое мощностью 10 м положительные температурные тренды — до 0,13 °С в Гданьской впадине. Для данного слоя характерна изменчивость под действием адвекции вод из Датских проливов.

Единственная существующая схема морского пространственного планирования для исследуемой акватории [Ulyanova and Danchenkov, 2016], показывает большое количество потенциальных источников взвешенного вещества и, кроме того, территории, важные с точки зрения рыболовства или рекреации. Процесс разработки схем морского пространственного планирования для Российской Федерации на данном этапе находится на начальной стадии разработки (Гогоберидзе и др., 2011, Gogoberidze et al., 2017, Ершова и др., 2018,), что позволяет уточнять показатели, по которым выделение районов будет более целесообразно. Концентрация взвеси в Балтийском море меняется в пределах нескольких порядков и определяется в целом группой факторов, связанных с климатической, вертикальной и циркумконтинентальной зональностью [Айзатуллин и др., 1976; Лебедев, 1986; Лисицин, 1981]. На зональные факторы накладываются факторы регионального и местного значения, которые при определенных условиях могут доминировать над зональными. С 1970-х уровень эвтрофированности Балтики существенно вырос [HELCOM, 2018] что сказалось и на абсолютных значениях концентрации взвешенного вещества, поскольку биогенное взвешенное вещество составляет большую долю в общей массе взвеси.

Таким образом, можно заключить, что естественная циркумконтинентальная зональность на акватории Юго-Восточной Балтики осложняется орографией берега и господствующими направлениями течений, создавая благоприятные условия для выноса взвешенного вещества (как органического, так и терригенного происхождения) в открытую часть моря. Существующая схема мониторинга не является исчерпывающей,

так как упускает важные техногенные источники взвешенного вещества на западном побережье Калининградского полуострова.

3.2. Сезонная изменчивость вдольберегового распределения взвеси

Как уже было показано (раздел 3.1), в распределении концентрации взвешенного вещества в поверхностном слое моря самые высокие значения концентрации взвеси наблюдались в береговой зоне моря в Куликовской бухте и достигали значений выше 2,8 мг/л. Оценка пространственного распределения взвеси была выполнена по 6-ти точкам мониторинга, расположенным вдоль северного побережья Калининградской области (Рисунок 267).

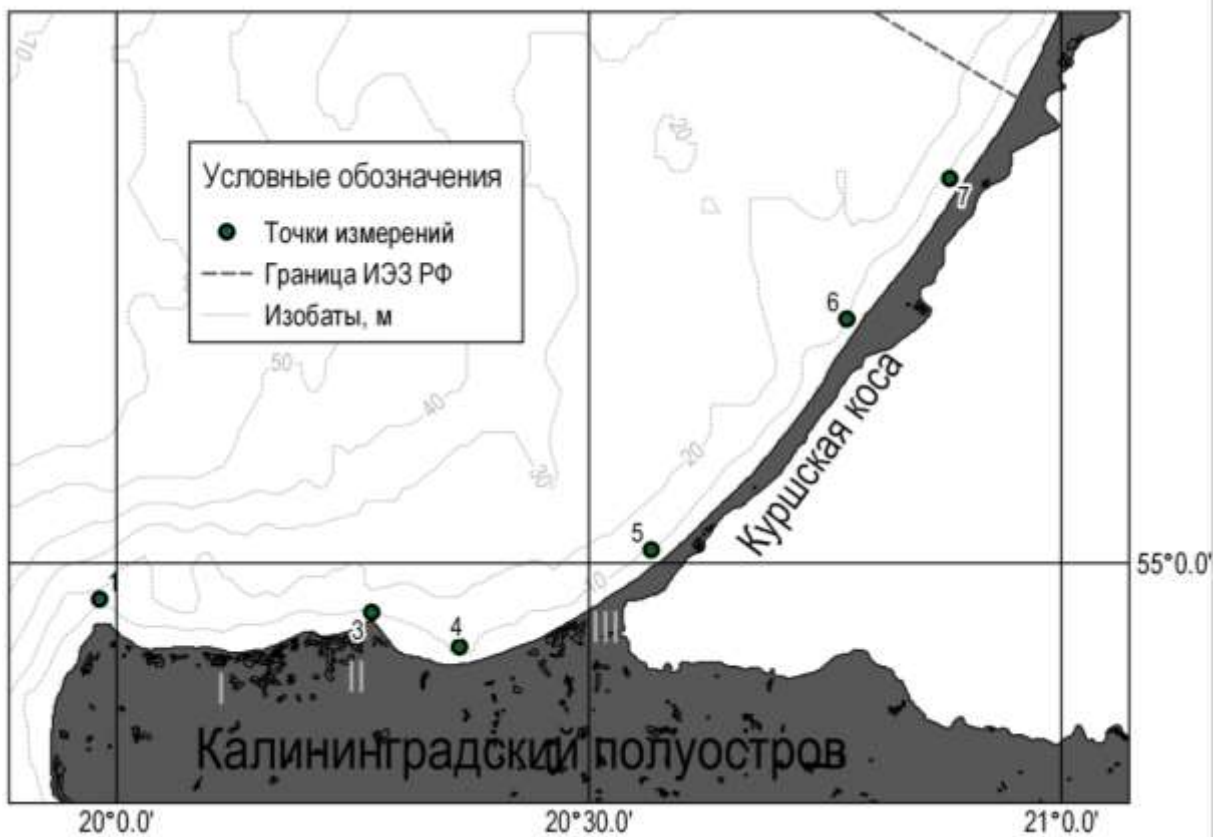


Рисунок 27. Расположение точек мониторинга в береговой зоне Калининградской области. I — г. Светлогорск, II — м. Гвардейский, III — г. Зеленоградск, корень Куршской косы.

Вертикальное распределение взвешенного вещества вдоль северного побережья Калининградской области неоднородно: прибрежная зона Куршской косы не стратифицирована по вертикали (Рисунок 28). Минимальные значения концентрации взвеси слое приурочены к побережью Куршской косы, где происходит аккумуляция

осадочного материала и придонному слою в районе мыса Таран, где не развит процесс абразии.

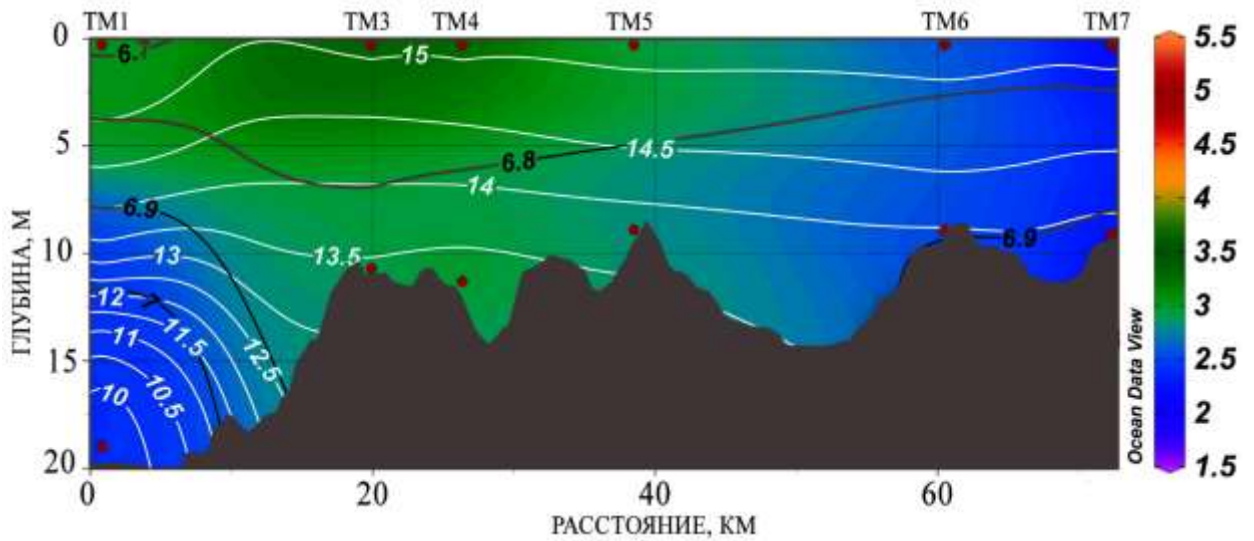


Рисунок 28. Среднее многолетнее распределение взвеси вдоль северного побережья Калининградской области за период 2003-2018 гг.

Вертикальное распределение взвешенного вещества имеет сезонные особенности, вызванные различными причинами. В частности, выраженный приповерхностных максимум концентрации взвеси в весенний и летний периоды (Рисунок 29 и 30) вызван активным цветением разных видов фитопланктона (весной — диатомовых, летом — сине-зеленых). Согласно [Кудрявцева, 2017], в зоне локализации максимума концентрации взвешенного вещества вогнутая форма береговой линии создает т.н. «эффект полузамкнутой бухты».

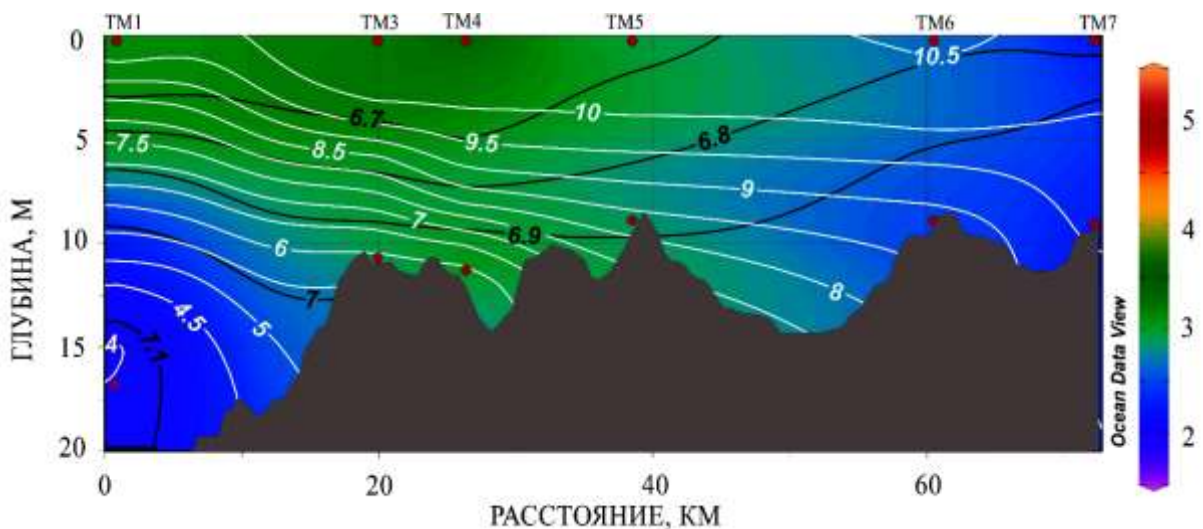


Рисунок 29. Распределение взвеси в береговой зоне в октябре (2003-2017) показано цветовой градацией, температура воды — белые линии, соленость — черные.

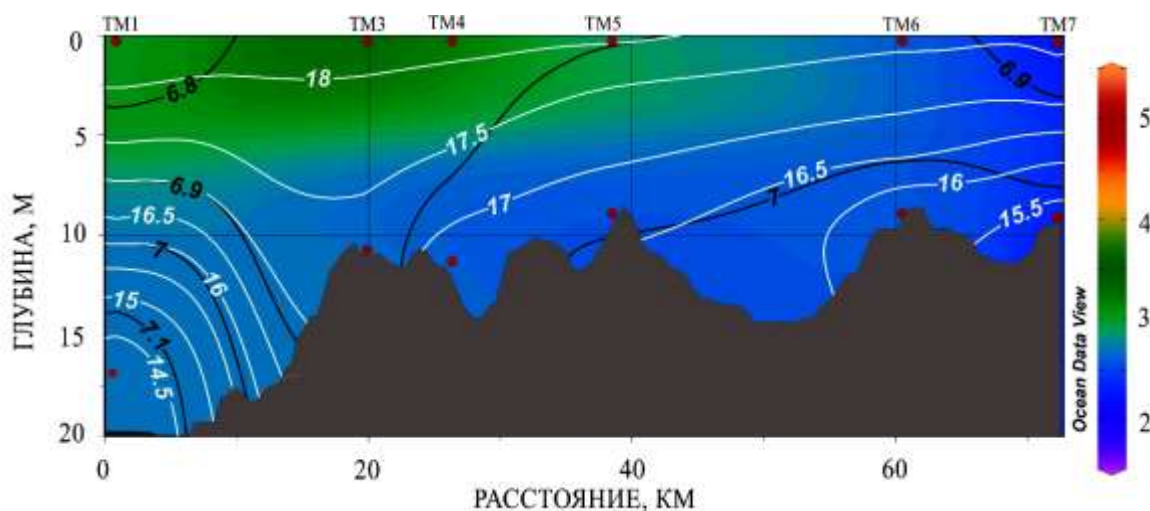


Рисунок 30. Распределение взвеси в береговой зоне летом (2003-2017) показано цветовой градацией, температура воды — белые линии, соленость — черные.

Таким образом, основным лимитирующим фактором для первичной продукции является температура воды, так как не интенсивный водообмен препятствует выносу биомассы фитопланктона. В то же время, небольшие глубины акватории и частые вихревые структуры в зоне сочленения Калининградского полуострова и Куршской косы способствуют интенсивному перемешиванию и быстрому возвращению питательных веществ в фотический слой [Gurova, Chubarenko, 2012]. Дополнительный приток биогенов обусловлен стоком с северного побережья Калининградского полуострова, периодически возникающими апвеллингами и близостью Объединенных канализационных очистных сооружений курортной группы городов (ОКОС), поставляющий дополнительные питательные вещества в береговую зону. Основным различием между весенним и летним сезонами является тот факт, что летом концентрации взвеси у дна ниже в силу меньшего количества штормовых дней и, как следствие, меньшей абразии берега.

Противоположная ситуация возникает в октябре, когда максимальные концентрации взвеси наблюдались в придонном слое в Куликовской бухте (ТМ-4), на остальных участках берега вода перемешана по всей глубине из-за штормовой активности, а береговая абразия отсутствует (Рисунок 31).

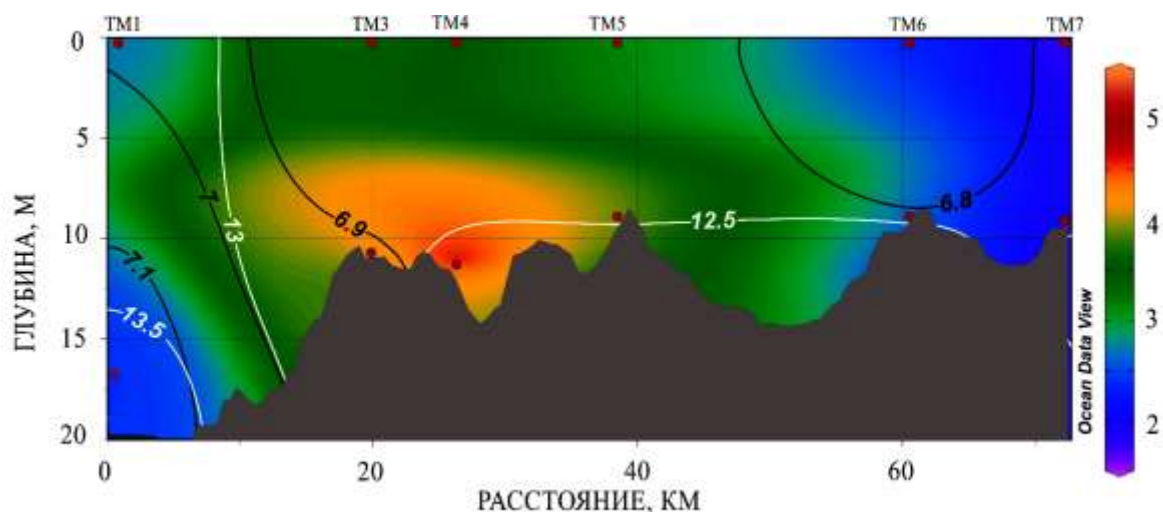


Рисунок 31. Распределение взвеси в береговой зоне в октябре (2003-2017) показано цветовой градацией, температура воды — белые линии, соленость — черные.

Многие аспекты антропогенной нагрузки на береговую зону моря включают в себя изменения в части содержания взвешенных веществ в воде. В естественном виде система берег–море является открытой, так как поступление вещества и энергии происходит извне, однако она обладает гомеостазисом, саморегулируется за счет того, что все процессы скомпенсированы и происходят примерно с равной интенсивностью. Основными естественными источниками взвешенного вещества являются: вынос рек, абразия берега и эрозия подводного берегового склона. Часть взвеси выносится в открытую часть моря, часть подхватывается вдольбереговым потоком наносов и аккумулируется на Куршской косе.

В настоящее время для рекреационных нужд морских городов-курортов и строительства в береговой зоне берегозащитные мероприятия включают в себя два основных метода: строительство продольных укрепительных берегозащитных сооружений и строительство поперечных сооружений (поперечные буны и портовые сооружения). Железобетонные конструкции различной проницаемости (променады, волногасящие бермы, габионы, стенки и т.д.) сооружаются для укрепления абразионных уступов, что стабилизирует берег, но приводит к усилению дефицита наносов за счет сокращения поступления абразионного материала в море. Поперечные сооружения прерывают вдольбереговой поток наносов, вызывая дефицит осадочного материала на смежных участках с подветренной стороны. Кроме того, могут сдвигаться зоны аккумуляции материала, в частности, разрушаться прикорневая зона Куршской косы.

Строительство портовых сооружений в г. Пионерский (с общей длиной оградительных гидротехнических сооружений 765 м) может прервать вдольбереговой поток наносов и привести к истощению всего тела Куршской косы.

Существует мнение, что в результате подводный береговой склон должен испытывать повышенные нагрузки и деформации, которые могут привести к изменению его устойчивости. Променады в г. Зеленоградск, Светлогорск и Пионерский, а также существующие железобетонные опояски занимают на сегодняшний день 14% длины береговой линии северной части Калининградского (Самбийского) полуострова, что делает уязвимым такой же процент подводного берегового склона. Поступление минерального взвешенного вещества в открытую часть моря от укрепленного таким образом побережья также снижается, а возросшая прозрачность воды способствует большому цветению фитопланктонных микроорганизмов.

Пространственное распределение взвешенного вещества вдоль северного побережья Калининградской области указывает на наличие зоны размыва в районе м. Гвардейский и Куликовской бухты, а также на наличие зоны аккумуляции в районе Куршской косы. Направление потока взвешенного вещества от района с высокой антропогенной нагрузкой, которой является Калининградский полуостров, к национальному парку и объекту Всемирного наследия Юнеско может негативно сказываться на экологическом состоянии последнего в зависимости от состава переносимых и отлагаемых взвешенных частиц.

3.3 Особенности вещественного состава взвеси в береговой зоне

Наряду с концентрацией взвешенного вещества в береговой зоне были выявлены особенности вещественного состава взвеси в пробах, отобранных в июле 2017 года в ходе 35-й экспедиции НИС «Академик Николай Страхов». Состав минеральной и биогенной фракций оставался относительно однородным от мыса Таран до центральной части Куршской косы, однако были выделены некоторые особенности.

Минеральные частицы. Среди минеральных зерен, находящихся во взвешенном состоянии, чаще всего обнаруживались зерна кварца, полевых шпатов (ортоклаз и альбит) и глинистых минералов (иллит, смектит, монтморрилонит). Кроме того, были зафиксированы единичные частицы гедрита, гётита, доломита, амфибола, кальцита и пирита. Наибольшее количество минеральных зерен было определено в пробах, полученных в ТМ-4 в районе Куликовской бухты (Рисунок 32), где располагается и

среднегодовалый, и сезонные максимумы концентрации взвеси. Размеры частиц достигают 50 мкм, что не является исключительным для береговой зоны моря, где интенсивно идет ветро-волновое перемешивание. Определить тип минеральной частицы по текстуре и структуре не представляется возможным, поэтому определение осуществлялось по данным микроскопа. Пробы взвешенного вещества, отобранные в точках мониторинга у побережья Куршской косы, часто содержали большее количество железа.

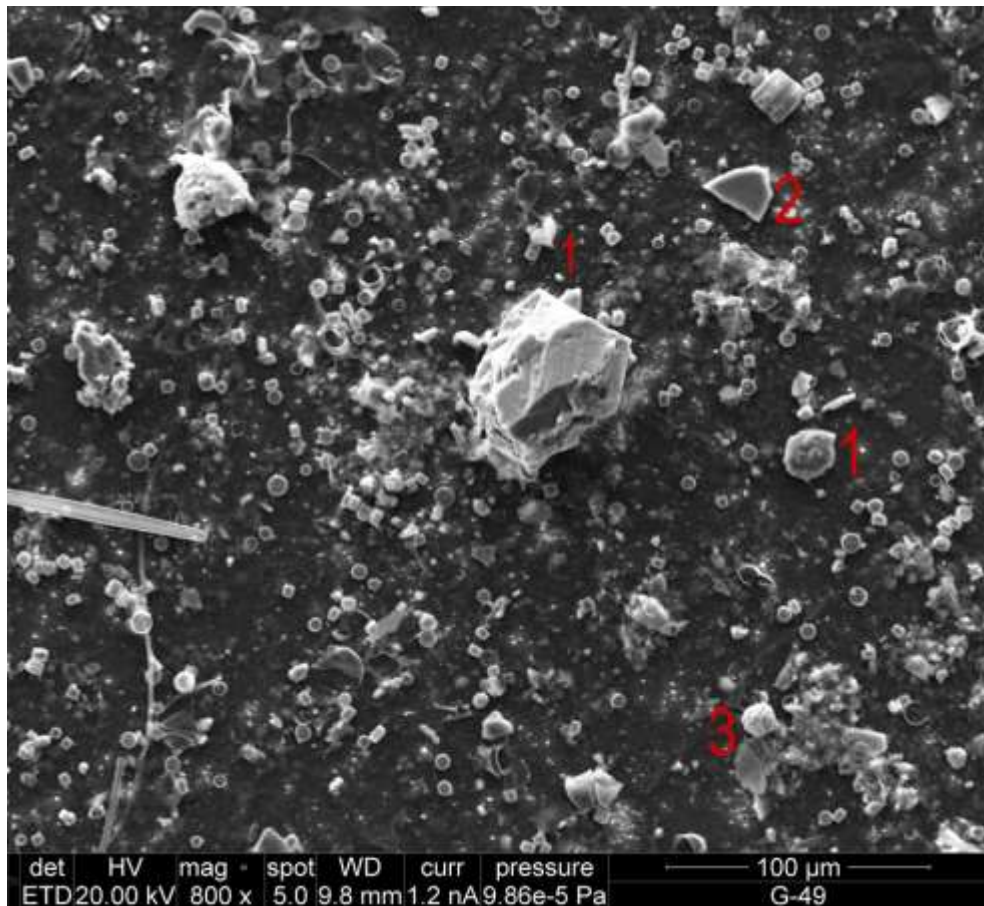


Рисунок 32. Проба взвешенного вещества придонного слоя ТМ 4. 1 — кварц, 2 — кальцит, 3 — фрамбоид пирита.

Биогенные частицы. Пробы взвеси, отобранные в июле, попадают в летнее увеличение концентрации взвеси, вызванное развитием теплолюбивых сине-зеленых водорослей (*Nodularia spumigena*, *Aphanizomenon* sp. и других) (Рисунок 33А) [Kahru et al., 2007; Евтушенко и Шеберстов, 2016]. Тем не менее, на всех точках мониторинга в пробах присутствуют как целые, как и обломочные диатомовые водоросли и

динофлагелляты (Рисунок 33Б), пик цветения которых приходится на апрель–май [Thamm et al., 2004; Kahru, Elmgre, 2014]. Видовую принадлежность организмов при отборе проб методом принудительной фильтрации с последующей сушкой определить не представляется возможным, только групповую принадлежность.

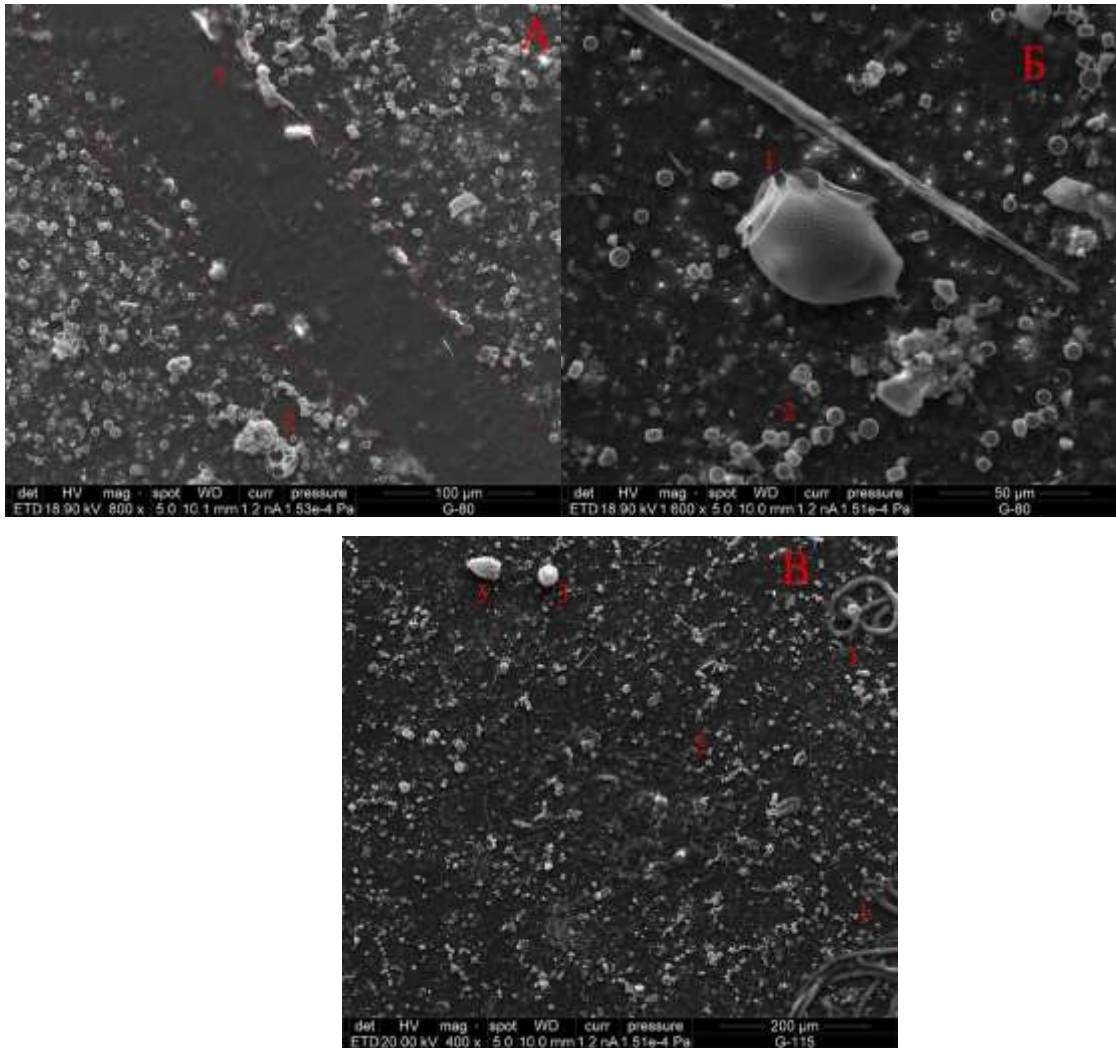


Рисунок 33. Проба взвешенного вещества поверхностного слоя ТМ 5 (корневая часть Куршской косы). А. 1 — колония сине-зеленых бактерий, 2 — осколок диатомовой водоросли. Б. 1 — динофитовая водоросль, 2 — диатомовые водоросли. В. 1,2 — колонии сине-зеленых бактерий, 3 — био-минеральный агрегат.

Агрегирование частиц. Встречаются как единичные минеральные зерна и микроорганизмы, так и различные агрегаты смешанного состава. В частности, были найдены pellets копепод. Известно, что pelletный транспорт взвеси является главным в ее переносе от поверхности в глубинные слои [Лисицын, 1978]. Интересной

особенностью многих проб было наличие динофитовых водорослей (динофлагеллят), обросших минеральными частицами (Рисунок 34). Минеральная фракция такого агрегата включает в себя как частицы полевых шпатов (ортоклаза), амфибол, кальцит так и глинистых минералов с большим содержанием железа. Среди динофлагеллят существуют виды, создающие себе известковый скелет (Hildebrand-Nabel and Willems, 2004), в то время как создание скелета из других минералов было обнаружено впервые. Таким образом, данный феномен может иллюстрировать один из механизмов ускоренной седиментации минеральных зерен.

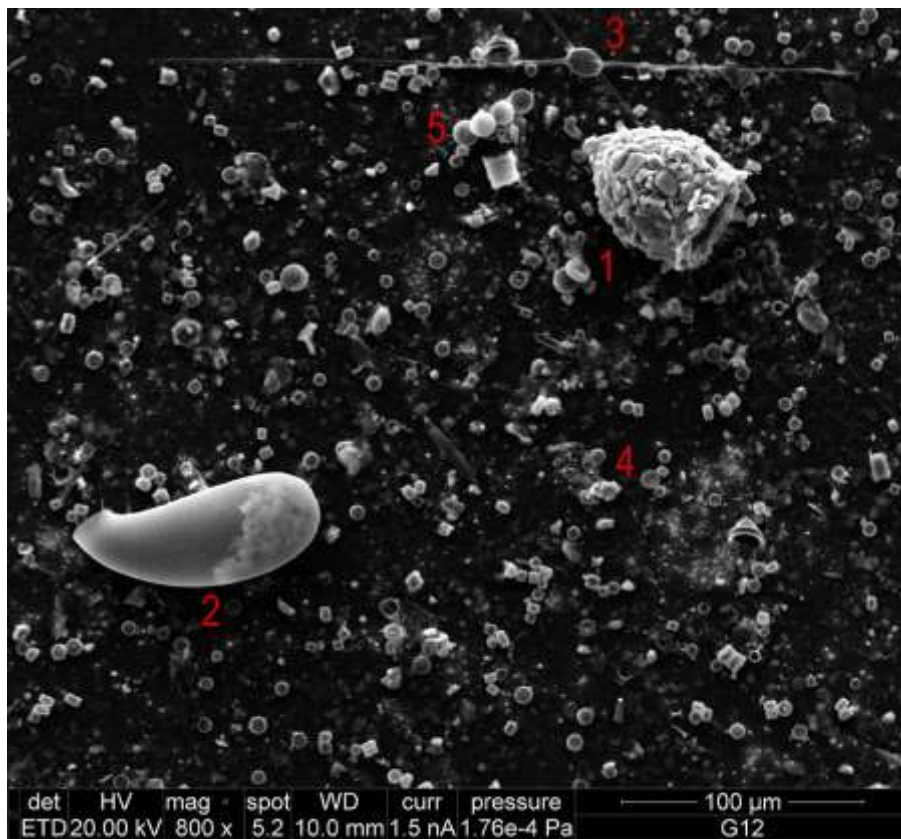


Рисунок 34. Проба взвешенного вещества поверхностного слоя ТМ 3 (г. Светлогорск). 1 — скопление частиц кварца и ортоклаза на скелете динофлагелляты, 2 — пеллета планктонных ракообразных, 3 — диатомовая водоросль, 4 — частица ортоклаза, 5 — скопление диатомовых водорослей.

У побережья Куршской косы уменьшилось количество минеральных зерен и минеральных агрегатов, однако в их составе стало больше глинистых минералов с высоким содержанием железа, в связи с чем точная идентификация частиц оказалась затруднена. Источником дополнительного железа в пробах взвеси могут служить как

природные (размыв ожелезненных гидроокислами железа слоев палеогенового песчаника — «земли Кранта»), так и антропогенные источники (судоходство, берегозащитные мероприятия, строительство в береговой зоне). Необходимо отметить, при промышленной добыче янтаря ожелезненные песчаники разрушаются и сбрасываются в море может служить дополнительным источником железа во взвеси.

3.4. Сезонная и межгодовая изменчивость вертикального распределения взвешенного вещества

Изучение вертикального распределения взвеси в Юго-Восточной Балтике осуществлялось по данным серии судовых океанологических съемок, выполненных вдоль опорного разреза. Исследования проводились с 2015 года по 2018, что позволило проследить реакцию вод акватории по мере ассимиляции вод из Северного моря.

Апрель 2015 г. Первая съемка соответствует времени появления вод большого залива, произошедшего в конце 2014 года («рождественский залив»), во впадинах Юго-Восточной Балтики [Naumann et al., 2015]. В Гданьской впадине он проявился высокими значениями солености (> 13 пс) и температуры ($> 7^{\circ}\text{C}$) на глубинах более 80 м (Рисунок 35). Максимальные значения придонной солености (14,2 пс) были заметно выше средних многолетних — 11,43 пс, по [State and Evolution... 2008] и максимальных среднегодовых значений за период 1947–2005 гг. 13,8 пс, по [Дроздов, Смирнов, 2008]. Над склоном Готландской впадины (глубина 80–110 м) придонная соленость и температура были ниже. Концентрация кислорода в придонном слое Гданьской впадины была 1,7–2,1 мл/л, а над склоном Готландской впадины — около 2,0 мл/л. Сезонный термоклин еще не был сформирован, а галоклин залегал на глубинах от 60–75 м до 90–95 м. В Гданьской впадине он находился в пределах 8–13 пс, а над склоном Готландской впадины — в пределах 8–11 пс. Высокая концентрация взвеси была отмечена в верхней части верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) до глубины 30–40 м, особенно над Гданьской впадиной — более 1,6 мг/л. Скопления взвеси в галоклине и над ним не было отмечено. Заметное повышение ее концентрации под галоклином (более 1,0 мг/л) имело место в Гданьской впадине. Между приповерхностным и придонным максимумами на глубинах 50–70 м располагался слой минимальных значений концентрации взвеси.

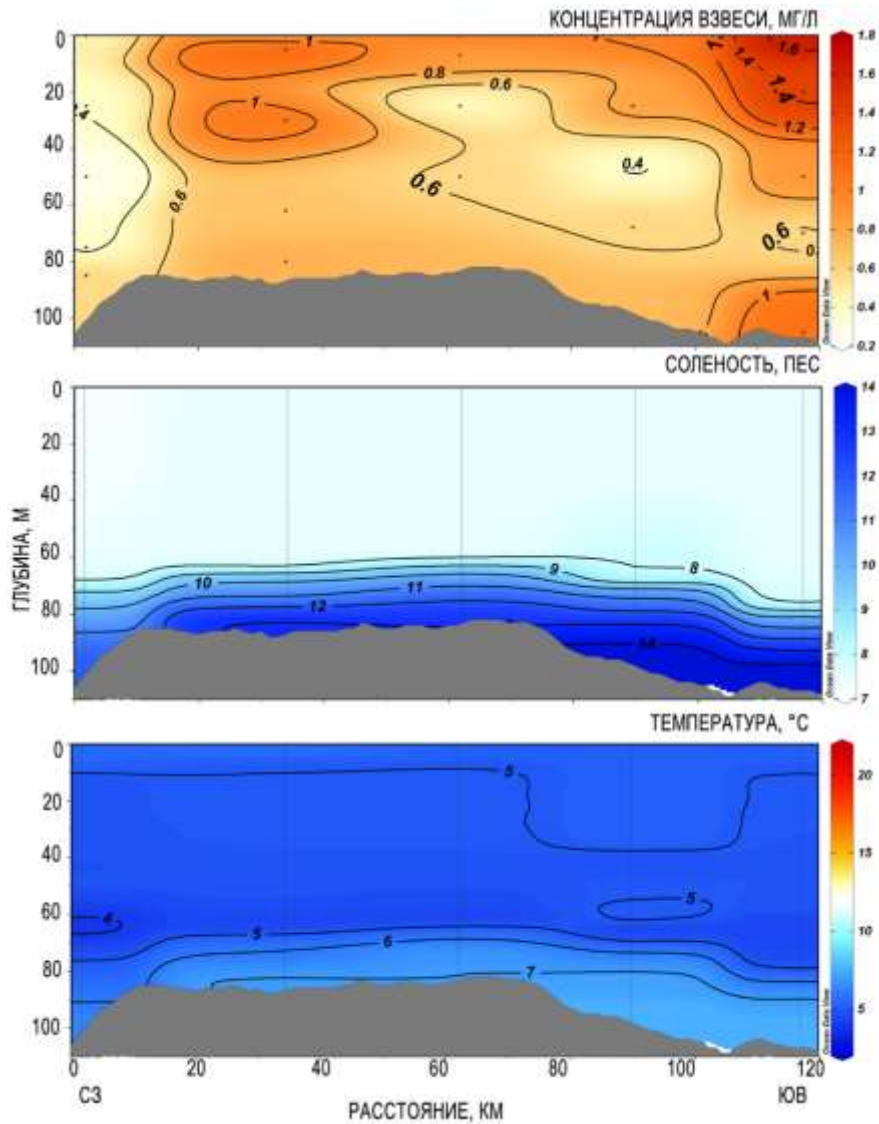


Рисунок 35. Гидрологические условия (температура, соленость) и концентрация взвешенного вещества на опорном разрезе в юго-восточной части Балтийского моря в апреле 2015 года.

Август 2015 г. В придонном слое Гданьской впадины появились признаки ассимиляции вод, поступивших четыре месяца назад в результате «рождественского затoka». Понизилась соленость и, в меньшей мере, температура (Рисунок 36) и концентрация кислорода (0,8–2,0 мл/л). В то же время над склоном Готландской впадины концентрация кислорода несколько повысилась (до 3,0 мл/л). Сезонный термоклин был хорошо выражен (15,0–5,5°C) и находился на глубинах от 20–35 м до 50–65 м. Глубина и мощность галоклина за четыре месяца почти не изменились. Как и во время предыдущей съемки (апрель 2015 г.) высокие значения концентрации взвеси были отмечены у поверхности моря до глубин 15–40 м (1,0–1,6 мг/л) и под галоклином в

Гданьской впадине (до 1,6 мг/л). Меньше всего взвеси было над верхней границей галоклина, особенно в мористой части разреза. Скоплений взвеси в термоклине и галоклине не было выявлено.

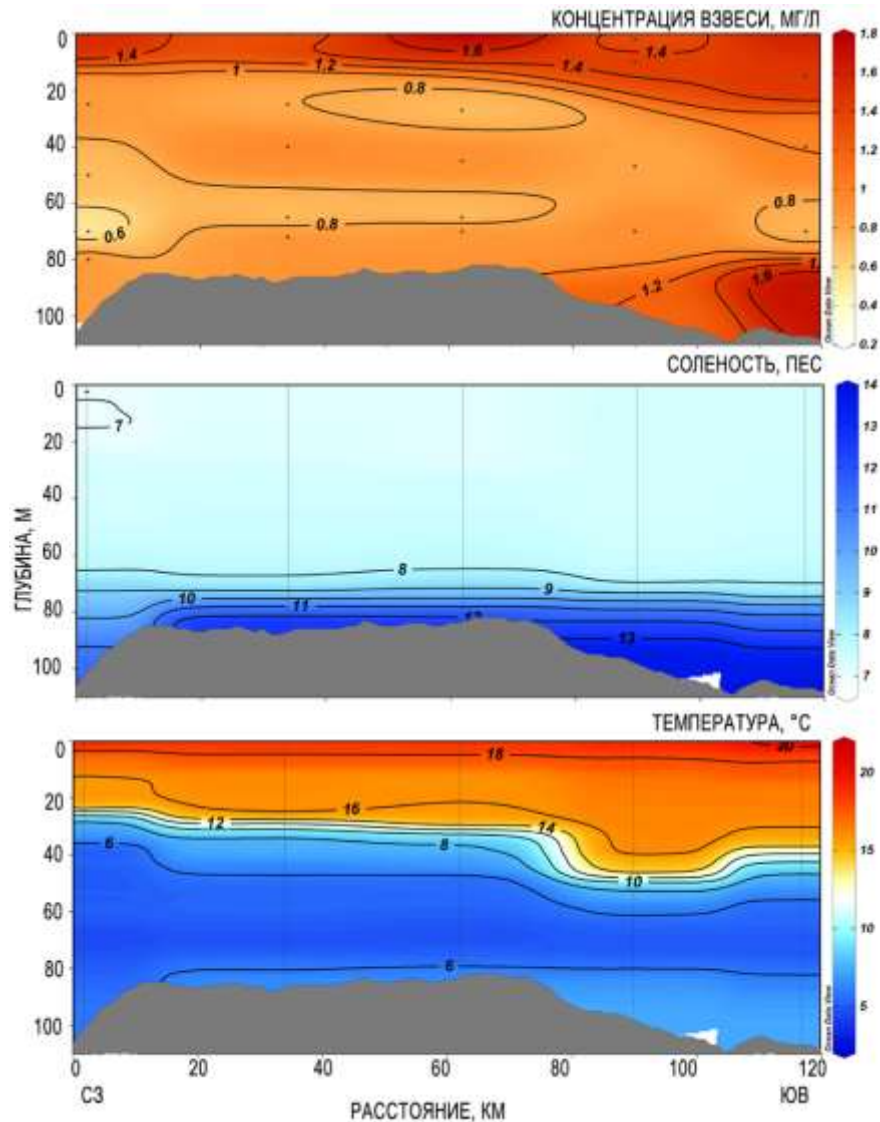


Рисунок 36. Гидрологические условия (температура, соленость) и концентрация взвешенного вещества на опорном разрезе в юго-восточной части Балтийского моря в августе 2015 года.

Октябрь 2015 г. Продолжилась ассимиляция вод, поступивших в Гданьскую впадину в результате «рождественского затока»: придонная соленость, температура и концентрация кислорода (0,9–1,7 мл/л) еще несколько уменьшились (Рисунок 37). Над склоном Готландской впадины за два месяца (с августа 2015 г.) концентрация кислорода также уменьшилась (до 1,9 мл/л). По сравнению с предыдущей съемкой верхняя граница галоклина в Гданьской впадине поднялась до горизонта 50 м, а сам он стал менее градиентным. Верхняя граница сезонного термоклина в результате начавшейся осенней

конвекции заглубилась до 35–40 м. Эродированный термоклин (11,0–6,0 °С) стал тоньше. Концентрации взвеси была низкой на всем разрезе, минимальные ее значения, как обычно, находились в промежуточном слое (глубина 50–70 м). Скопления взвеси в частично эродированном сезонном термоклине и в галоклине не были выявлены.

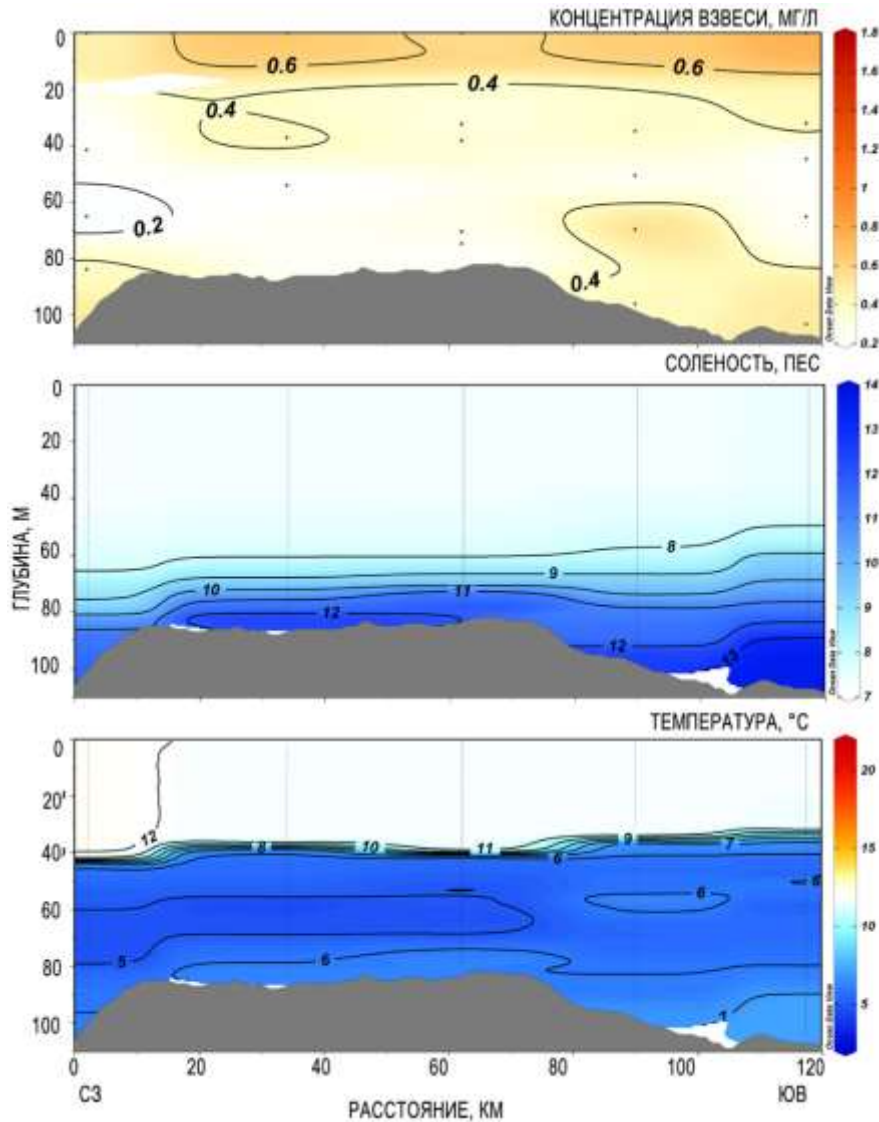


Рисунок 37. Гидрологические условия (температура, соленость) и концентрация взвешенного вещества на опорном разрезе в юго-восточной части Балтийского моря в октябре 2015 года.

Март 2016 г. В придонном слое Гданьской впадины вновь появилась вода с соленостью более 14 пес. Увеличился объем воды с соленостью >13 пес и температурой >7 °С (Рисунок 38). Придонная соленость на склоне Готландской впадины также повысилась, но всего лишь до 12,4 пес. Содержание кислорода у дна увеличилось: в Гданьской впадине до 3,8–4,3 мл/л, на склоне Готландской впадины до 3,5 мл/л. Все это—свидетельства еще одного залива североморских вод в Балтийское море,

произошедшего в ноябре 2015 года. Термоклин еще не начал формироваться. Верхняя граница галоклина вновь опустилась до 60–65 м, и он стал более градиентным. Скоплений взвеси в нем и над ним не выявлено. Повышение концентрации взвеси было отмечено в приповерхностном и в придонном слое Гданьской впадины (до 0,6 мг/л).

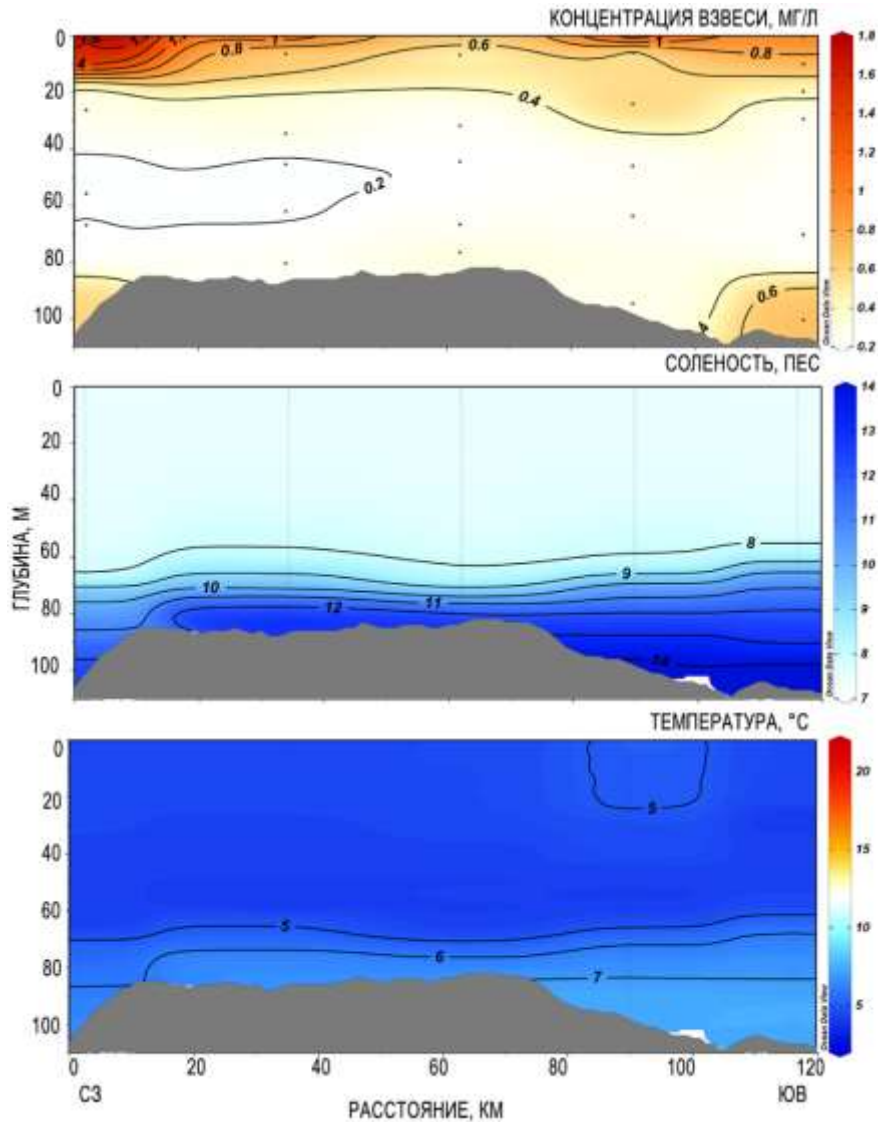


Рисунок 38. Гидрологические условия (температура, соленость) и концентрация взвешенного вещества на опорном разрезе в юго-восточной части Балтийского моря в марте 2016 года.

Июль 2017 г. Эта съемка была выполнена почти через год после сентябрьского затора 2016 года североморских вод в Балтику. В Гданьской впадине, несмотря на значительное время, прошедшее после затора, соленость придонного слоя оставалась сравнительно высокой (13,6 пес), тогда как над южным склоном Готландской впадины на тех же глубинах она едва превышала 12,0 пес (Рисунок 39). Температура воды в придонном слое Гданьской впадины не достигала 7 °С, концентрация растворенного

кислорода уменьшилась: в Гданьской впадине—до 1,0–1,1 мл/л, на склоне Готландской впадины — до 1,8 мл/л. Верхняя граница термоклина (от 16,0 до 6,0 °С) располагалась на глубине 14–16 м, нижняя—около 35 м, за исключением участка над южной частью Гданьско-Готландского порога, где она «просела» до глубины 50 м, возможно как следствие присутствия внутритермоклинного вихря. Галоклин находился на глубине от 50–60 м до 85–90 м. Концентрации взвеси, как в приповерхностном, так и в придонном слоях (0,6 мг/л и 0,4 мг/л соответственно, рисунок 26) понизилась по сравнению с предыдущим годом. Максимальные ее значения (до 1,2 мг/л) были отмечены в ВКС южной части разреза (в Гданьском заливе). Как и ранее, термоклин и галоклин не отличались повышением концентрации взвеси. Между ними ее концентрация была минимальна (0,2–0,4 мг/л).

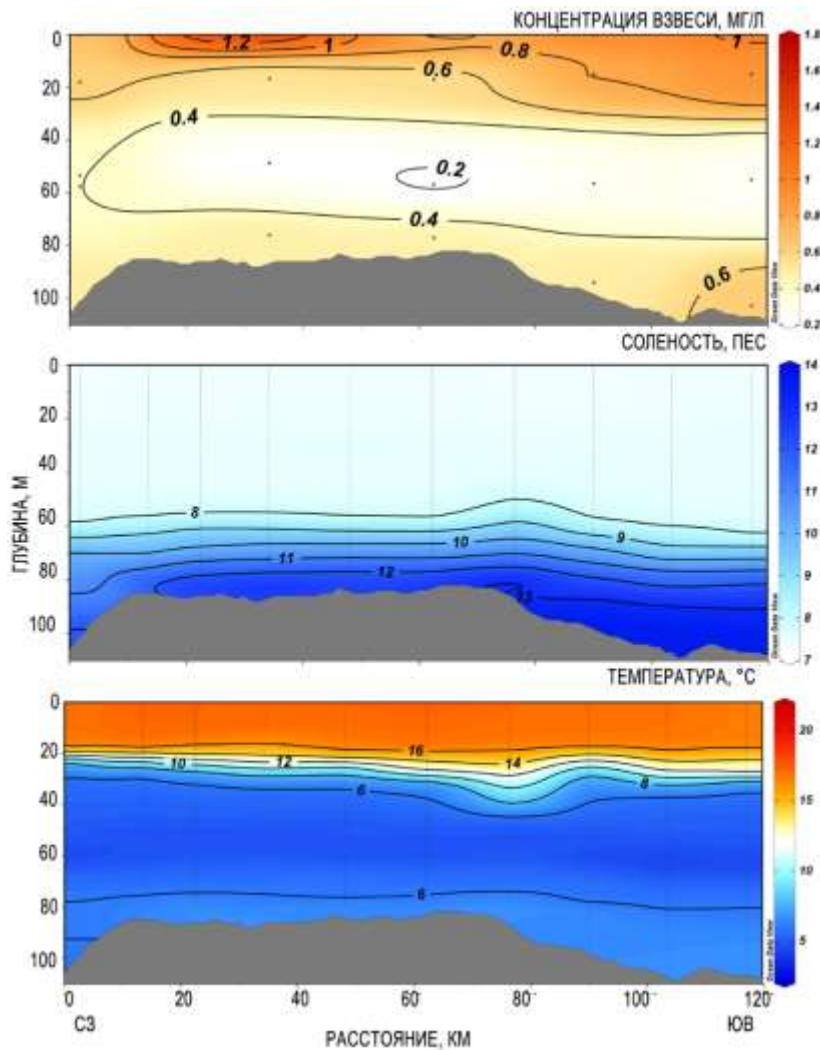


Рисунок 39. Гидрологические условия (температура, соленость) и концентрация взвешенного вещества на опорном разрезе в юго-восточной части Балтийского моря в июле 2017 года.

Октябрь 2017 г. Продолжилась ассимиляция вод залива, произошедшего год назад. В придонном слое Гданьской впадины соленость не превышала 13,2 пс, температура — 6,6°C (Рисунок 40), а концентрация кислорода понизилась до 0,3–0,8 мл/л. В то же время над склоном Готландской впадины температура, соленость и концентрация кислорода (1,7 мл/л) почти не изменились. Сезонный, частично эродированный термоклин (12–6,5 °С) и галоклин были наклонены с севера на юг. Верхняя граница термоклина заглублялась от 40 до 65 м, а нижняя — от 45 до 75 м, верхняя граница галоклина — от 50 до 85 м, нижняя — от 70 до 90 м. Из-за аномально сильного заглубления сезонного термоклина произошло его частичное совмещение с галоклином. При этом вертикальные градиенты солености и температуры действуют однонаправленно, а именно, на увеличение градиента плотности. Однако ввиду крайне низких осенних концентраций взвеси, барьерный эффект такого, более резкого пикноклина в распределении взвеси не проявился. Приповерхностное и придонное скопления взвеси также были выражены слабо.

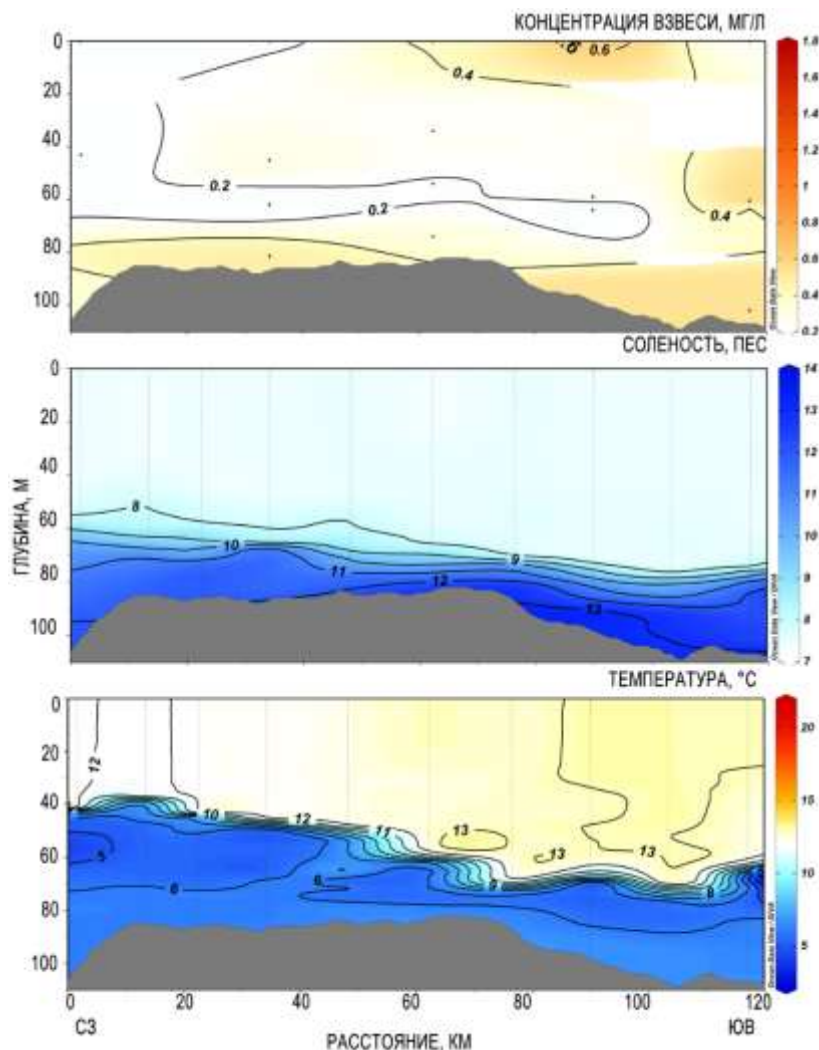


Рисунок 40. Гидрологические условия (температура, соленость) и концентрация взвешенного вещества на опорном разрезе в юго-восточной части Балтийского моря в октябре 2017 года.

Август 2018 г. Соленость придонного слоя заметно понизилась. В Гданьской впадине она не превышала 11,86 пс, а в Готландской впадине — 11,66 пс. Температура придонных вод нигде не достигала 7 °С. Все это согласуется с отсутствием новых затоков и ассимиляцией вод предыдущих затоков. Кислород в придонном слое обеих впадин отсутствовал, вплоть до горизонта около 85 м, т.е. он полностью был потрачен на окисление органического вещества и дыхание живых организмов. Возникли условия аноксии. Сезонный термоклин (5–21 °С) находился на глубинах 10–30 м, за исключением южной части разреза, где его нижняя граница опустилась глубже 40 м (Рисунок 41). Характерное искривление изотерм — подъем в верхней и опускание в нижней части термоклина — указывает на возможное присутствие здесь внутритермоклинного вихря с диаметром около 20 км. Из-за уменьшения солености глубинных вод галоклин стал менее выраженным. Приповерхностный максимум концентрации взвеси (1,1 мг/л) был выражен в северной части разреза и не проявился в его южной части. Между термоклинном и галоклином концентрация взвеси была минимальна (менее 0,2 мг/л). Концентрация взвеси в придонном слое над Гданьско-Готландским порогом (до 0,6 мг/л) явно была выше, чем в Гданьской впадине и над склоном Готландской впадины. Такая ситуация наметилась уже в октябре 2017 года. Она обусловлена условиями аноксии у дна моря и, как следствие, существованием на некотором расстоянии от дна редокс-клина (или оксиклина) — переходной зоны от окислительных условий к восстановительным. В этой зоне происходит изменение форм миграции металлов, в основном железа и марганца, и формирование скоплений взвеси биогеохимической природы [Емельянов, 1998]. В рассматриваемом случае глубина редокс-клина находилась непосредственно над Гданьско-Готландским порогом, и именно это обусловило возникновение выраженного придонного скопления взвеси.

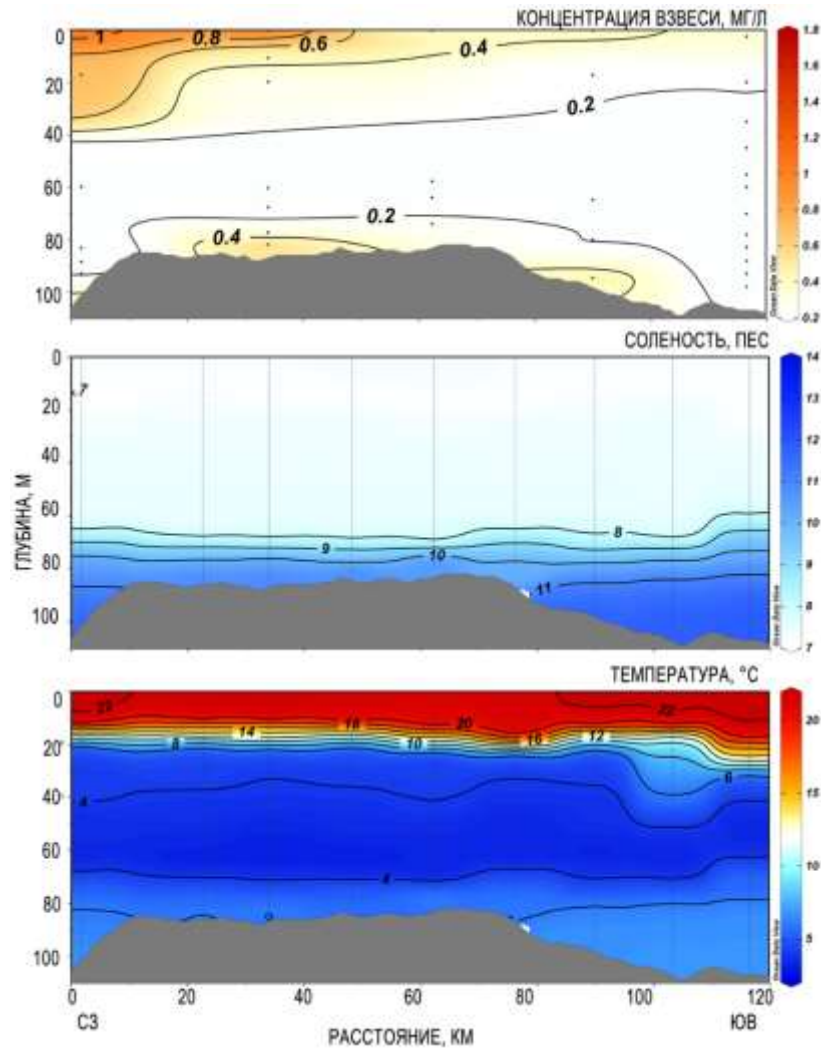


Рисунок 41. Гидрологические условия (температура, соленость) и концентрация взвешенного вещества на опорном разрезе в юго-восточной части Балтийского моря в августе 2018 года.

Полученные данные в основном соответствуют существующим представлениям о гидрологии Юго-Восточной Балтики [Дубравин, 2012а]. Как известно, на поверхности моря годовой ход солености зависит от хода атмосферных осадков и речного стока, но выражен слабо, в отличие от устойчивого годового хода температуры с максимумом в августе и минимумом в марте. С началом весеннего прогрева (апрель) в условиях ветро-волнового перемешивания начинает формироваться летняя гидрологическая структура: теплый ВКС, сезонный термоклин и холодный промежуточный слой (ХПС). Увеличение глубины залегания термоклина и эрозия ХПС происходит по мере летнего прогрева до достижения на поверхности температурного максимума (август). С началом осеннего охлаждения поверхностных вод термоклин продолжает заглубляться, но уже за счет

эрозии, обусловленной усилением конвективного перемешивания и увеличением ВКС. Максимальной интенсивности конвекция достигает в январе-феврале и продолжается до установления минимальных поверхностных температур (март). В результате ХПС практически исчезает, а сезонный термоклин, размываясь вплоть до полного своего исчезновения, опускается до главного пикноклина (галоклина). Наибольшей плотности поверхностные воды при солености 6–7 ПЕС достигают при температуре около 2,50 °С. В апреле поверхностная температура становится выше температуры наибольшей плотности, и вертикальная конвекция ослабевает, а затем и прекращается. На этом фоне выделяется гидрологическая ситуация октября 2017 года, когда было обнаружено частичное совмещение сезонного термоклона с галоклином.

Относительно невысокие значения концентрации кислорода, даже при повышении значений температуры и солёности в придонном слое Гданьской впадины, свидетельствуют о поступлении не «свежих» североморских вод, а вытесненных ими «старых» придонных вод Борнхольмской впадины и Слупского желоба, расположенных по пути распространения затоков. Эти «старые» воды были все же более солёными, теплыми и аэрированными, чем придонные воды Гданьской впадины. Поступивший в нее кислород довольно быстро расходовался и окисление органического вещества, и дыхание биоты, и гипоксия развивалась снова. Пониженные значения температуры и солености и повышенные–концентрации кислорода над склоном Готландской впадины по сравнению с Гданьской впадиной объясняются большей глубиной Готландской впадины, а значит, и более глубинной траекторией «больших затоков».

Полученные нами распределения концентрации взвеси в разные сезоны, в общем, соответствуют сложившимся представлениям [Jonasz, Zalewski, 1978; Jonasz, 1982]. В той или иной степени, всегда выражены поверхностный и придонный скопления взвеси, а между ними, в ХПС, располагается минимум концентрации. В холодный сезон в юго-восточной Балтике концентрации взвеси низка, не только в ВКС, но и по всей глубине моря. Это обусловлено сезонным снижением биологической активности и твердого стока рек, в первую очередь р. Вислы. Существование весеннего приповерхностного скопления взвеси обычно связывается с сезонным максимумом развития фитопланктона, главным образом, диатомовых водорослей и динофлагеллят [Thamm et al., 2004; Kahru, Elmgre, 2014] и влиянием половодья р. Вислы [Kowalczyk, 1999]. Летнее увеличение концентрации взвеси вызывается развитием теплолюбивых сине-зеленых

водорослей (*Nodularia spumigena*, *Aphanizomenon* sp. и других) [Kahru et al., 2007; Евтушенко и Шеберстов, 2016]. Осенью выравнивание температуры водных масс по вертикали и перемешивание вод приводят к развитию третьего годового максимума цветения фитопланктона. В этот период доминируют диатомовые водоросли, например, *Coscinodiscus granii* [Thamm et al., 2004].

Среднепогодная вертикальная структура распределения взвеси в Юго-Восточной Балтике характеризуется повышенными значениями концентрации взвеси в поверхностном и придонном слоях и относительно чистым промежуточным слоем (Рисунок 42). Эта структура более контрастна над впадинами, чем над Гданьско-Готландским порогом. Возможно, что при более длительном периоде отсутствия вентиляции придонных вод посредством затоков, хотя бы и слабой, над порогом будет существовать более выраженный придонный нефелоидный слой, обусловленный выпадением во взвесь растворенных соединений железа и марганца на окислительно-восстановительном геохимическом барьере (в редокс-клине) [Емельянов, 1998]. Полученная же нами картина вертикального распределения взвеси относится, в основном, к условиям активизации затоков.

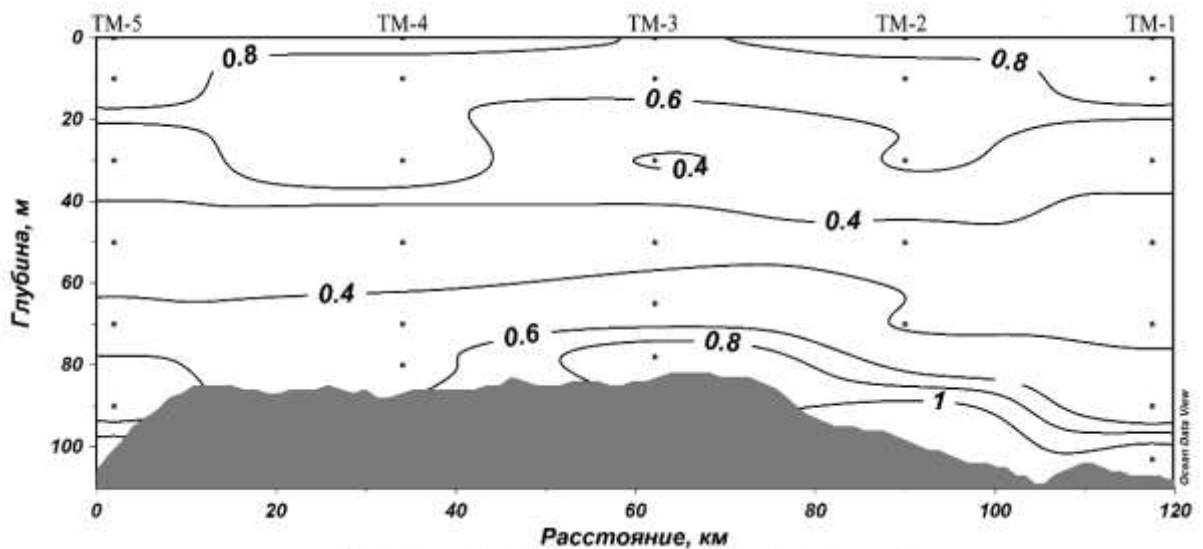


Рисунок 42. Среднее многолетнее распределение концентрации взвеси на разрезе в Юго-Восточной Балтике за период 2015–2018 гг.

В отличие от [Jonasz, Zalewski, 1978; Jonasz, 1982] нами не было отмечено повышения концентрации взвеси от поверхности моря к термоклину и формирования над ним скопления взвеси. В галоклине или над ним также не было отмечено

увеличения концентрации взвеси. Кратное ее увеличение было обнаружено под галоклином в Гданьской впадине, но только в апреле и августе 2015 года (придонный нефелоидный слой). Это не согласуется с данными [Jonasz, Zalewski, 1978; Jonasz, 1982], которые указывали на существование устойчивого придонного максимума концентрации взвеси независимо от сезона. В сравнении с данными упомянутых авторов наши данные значительно более представительны. Они были получены в результате серии съемок, а не однократных измерений. Поэтому нам удалось выявить сезонные и межгодовые изменения придонной концентрации взвеси.

С точки зрения концепции геохимических барьерных зон считалось, что седиментологическое значение галоклина связывается с его барьерным эффектом [Емельянов, 1986]: в слое скачка плотности скорость погружения взвеси замедляется. Считается, что здесь скапливаются зоопланктон и бактерии. Скачок плотности (галоклин) становится местом сосредоточения взвеси и микроорганизмов, активно участвующих в ее биогеохимическом преобразовании. В результате формы миграции многих химических элементов по разные стороны галоклина существенно различаются.

Осовой разрез по центральной части Балтийского моря от Арконской впадины до Готландской дает наглядное представление о вертикальном распределении взвеси и его зависимости от затоков соленых североморских вод (Рисунок 43). Разрез построен по данным 70-го рейса НИС «Профессор Штокман», который проходил летом 2005-го года. Распределение взвеси на разрезе в целом соответствует термохалинной структуре вод: в поле концентрации взвеси выделяются поверхностный и придонный слои повышенных концентраций и промежуточный "прозрачный" слой.

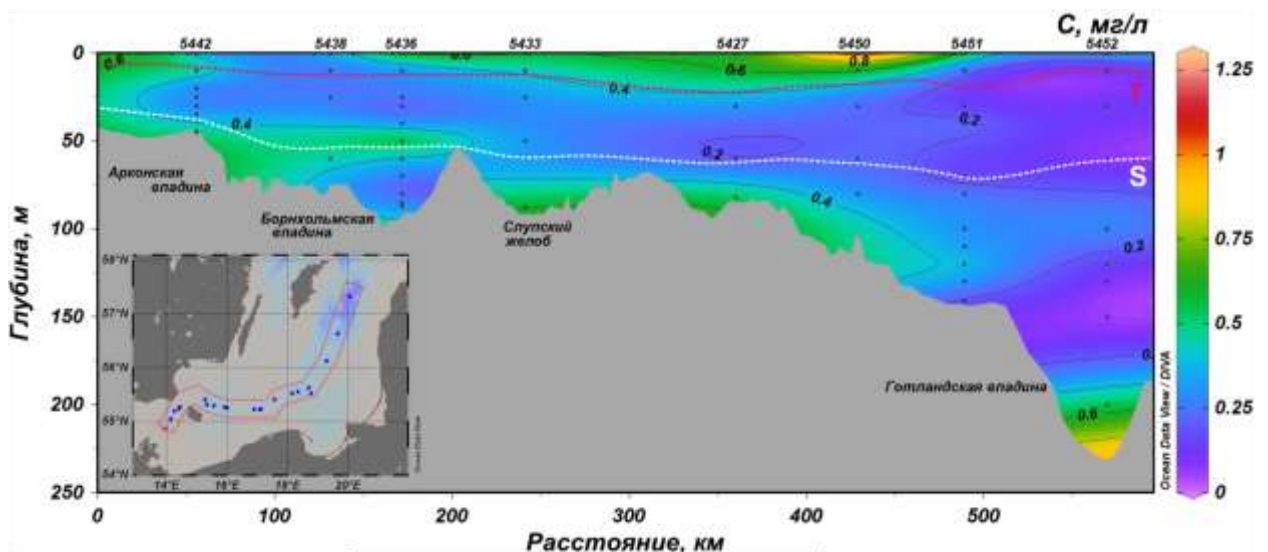


Рисунок 43. Распределение весовой концентрации фильтрационной взвеси (С) вдоль осевой линии Балтийского моря (по данным 70-го рейса НИС «Профессор Штокман», лето 2005 года): красная линия (Т) – глубина максимальных градиентов термоклина, белая линия (S) – глубина максимальных градиентов галоклина, черные точки – горизонты пробоотбора взвеси. На врезке – положение станций разреза.

Борнхольмская впадина – первый на пути поступающих в Балтику североморских вод относительно глубоководный бассейн Балтийского моря. Здесь граница между верхним и нижним слоем эстуария наиболее контрастна, и поэтому заметна роль галоклина (как плотностной границы) в концентрировании взвеси. Из-за резких вертикальных градиентов солености (плотности) взвешенные частицы не могут в него проникнуть из вышележащего ВКС, т.е. имеет место своего рода "запирающий" эффект. В центральной части Балтийского моря, в Восточно-Готландской впадине, галоклин уже не так резок, как в юго-западной и южной его частях, поэтому взвесь не скапливается на его верхней границе.

Выраженность придонного скопления взвеси зависит в основном от активности биопродуцирования в поверхностном слое моря. Это обусловлено существованием механизма ускоренной седиментации, так называемого «пелетного транспорта» взвешенного вещества [Bishop and Edmond, 1976, Honjo and Roman, 1978]. Однако нельзя полностью исключать и влияния придонных течений, инициированных большим затокком, когда развивается вертикальная турбулентная диффузия, препятствующая седиментации [Murray, 1970].

Таким образом, исследования взвеси на опорном разрезе позволяют сделать следующие выводы:

1. Вертикальное распределение взвеси в Юго-Восточной Балтике, как в сезонном, так и в межгодовом масштабе содержит в себе основные черты, характерные для всех морских бассейнов, а именно повышенные значения концентрации взвеси у поверхности моря ($> 0,8$ мг/л) и у его дна ($>1,0$ мг/л) и промежуточный слой минимальных концентраций ($< 0,4$ мг/л), расположенный на глубине 50–70 м.

2. Сезонные колебания концентрации взвеси весьма значительны и обусловлены, главным образом, сезонным ходом биопродуцирования в поверхностном слое моря и стока рек. Концентрация взвеси в придонном слое моря не показала сколь-либо

заметных аномалий, связанных с влиянием затоков североморских вод и вызванных ими перемещений «старых» (с низкой концентрацией кислорода) придонных вод из западных бассейнов Балтики. Полученная нами картина вертикального распределения взвеси относится, в основном, к условиям активизации затоков североморских вод, которые хотя и слабо, но обеспечивают вентиляцию придонных вод в Юго-Восточной Балтике. Можно предположить, что при длительном отсутствии затоков над Гданьско-Готландским порогом будет существовать придонный нефелоидный слой, обусловленный выпадением во взвесь растворенных соединений железа и марганца на окислительно-восстановительном геохимическом барьере (в редокс-клине).

3. Не получено подтверждения барьерной роли плотностных границ (термоклина и галоклина) в седиментационных и геохимических процессах. На этих потенциальных геохимических барьерах не обнаружено замедления седиментации и возникновения скоплений взвешенного вещества, а значит нет оснований говорить об интенсификации здесь биогеохимических процессов, связанных с деятельностью фито-, бактерио- и зоопланктона и разложением органических частиц. Возможно, для выявления барьерного эффекта «скачков плотности» в толще воды требуется более детальное их опробование.

Глава 4. Геоэкологический анализ распределения взвешенного вещества

4.1. Изменчивость вещественного состава взвеси в открытой части моря

Как уже говорилось в Первой главе, условия в придонном слое Гданьской впадины сильно зависят от затоков североморских вод. Гидрохимический режим в придонном слое впадины часто характеризуется недостатком содержания растворенного кислорода (Рисунок 44) и наличием сероводорода. Отбор проб для определения содержания взвеси с последующим анализом проб методом электронной сканирующей микроскопии и растворенного кислорода производился на референтной точке в самой глубокой части Гданьской впадины — станция 22 мониторинга «ЛУКОЙЛ-КМН» и станция 1 мониторинга ИО РАН.

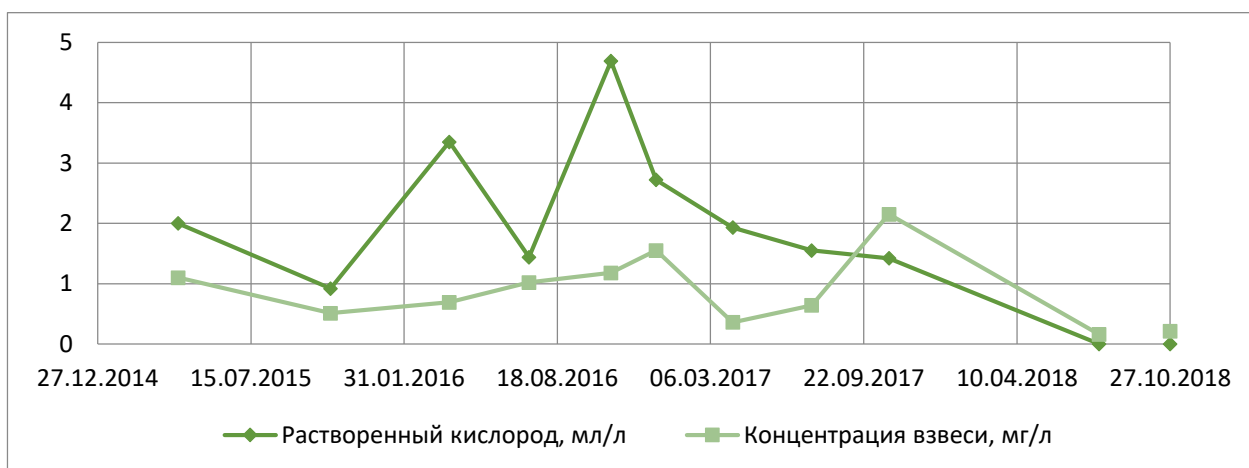


Рисунок 44. Ход концентраций растворенного кислорода и взвешенного вещества за период после попадания в Гданьскую впадину затоковых вод.

Затоковые явления и формирование зон гипоксии оказывают значительное влияние на вещественный состав взвеси в придонном слое, что хорошо иллюстрируют данные электронной сканирующей микроскопии. Пробы взвеси для анализа были отобраны с декабря 2017 года по ноябрь 2018 года, в период перехода от окислительных условий в глубинных водах к восстановительным.

В декабре 2016 года (Рисунок 45) в составе взвешенного вещества были обнаружены минеральные частицы (кварц, ортоклаз, альбит, пирит, глинистые минералы), органический детрит и обломки диатомей, а также небольшое количество образований, в составе которых была большая доля ОВ и Мп. Эти образования имели

круглую форму с небольшими «щупальцами» или «лучами», процентное содержание Mn достигало 76 %. По внешнему виду и химическому составу эти частицы напоминают минерал вернадит на начальной стадии образования — органическая бактериальная природа вернадита была впервые описана в [Чухров и др., 1989].

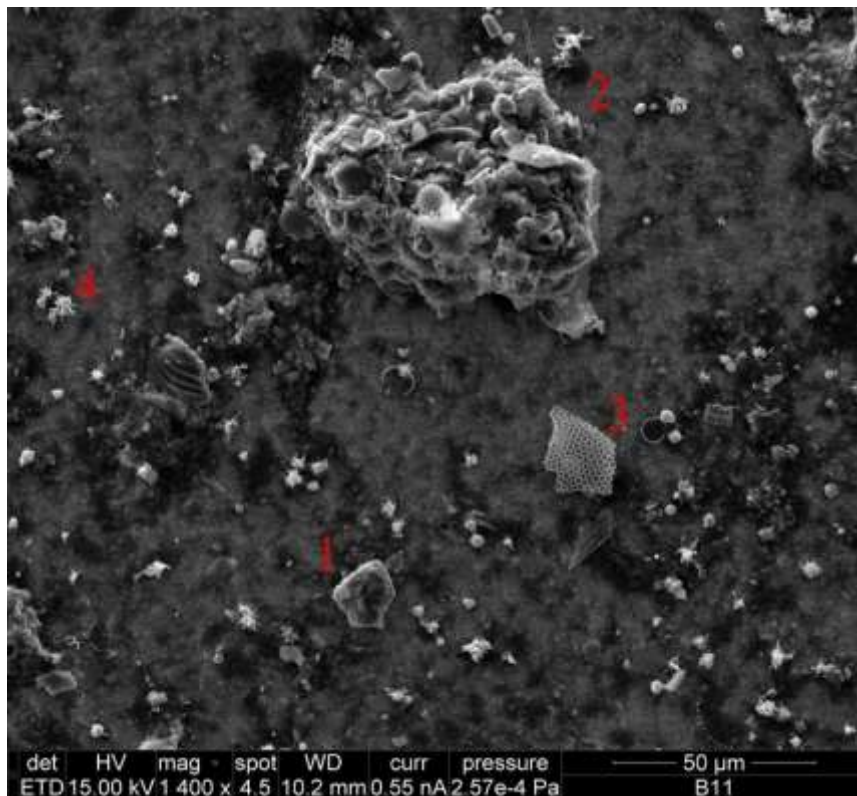


Рисунок 45. Проба взвеси В11, отобрана 25.12.2016 г., горизонт пробоотбора 103 м. 1 — частица кварца, 2 — агрегат из частиц кварца, глинистых минералов и ортоклаза, 3 — осколок диатомовой водоросли, 4 — Mn-содержащий агрегат, предположительно вернадит.

В апреле 2017 г. увеличилось количество ОВ и частиц вернадита (Рисунок 46). Состав минеральной фракции не изменился: преобладающим минеральным являлся кварц, затем шли полевые шпаты (ортоклаз и альбит), глинистые минералы и амфиболы.

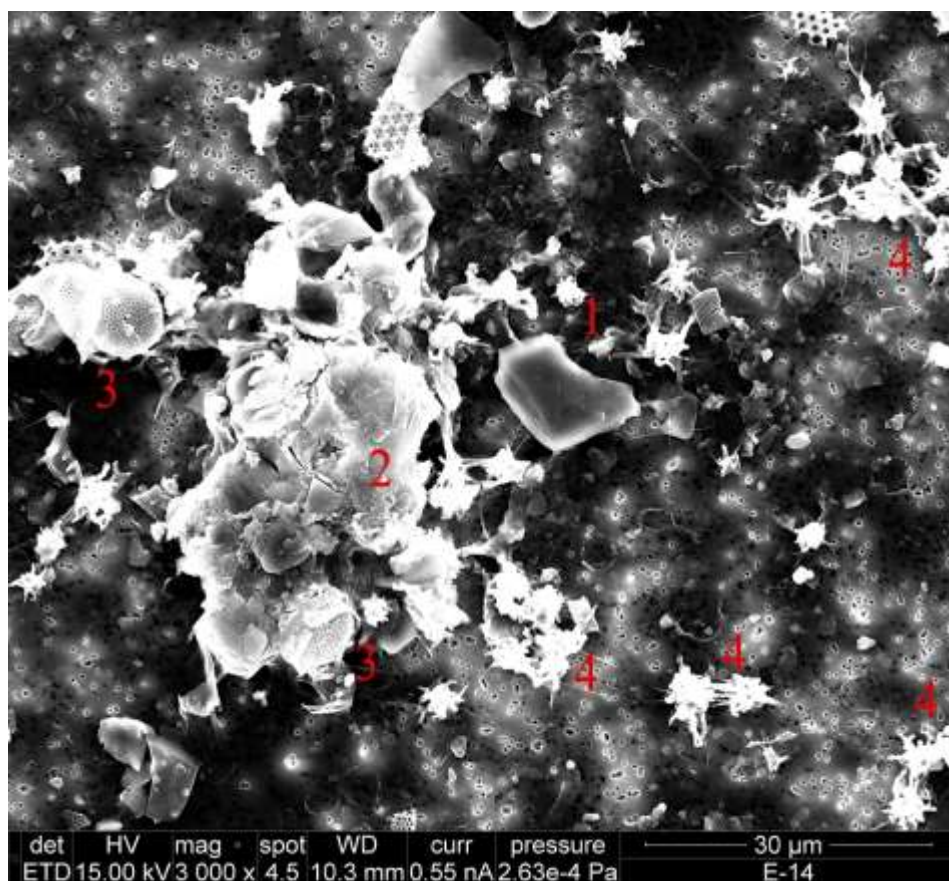


Рисунок 46. Проба взвеси E14, дата отбора 01.04.2017 года, горизонт пробоотбора 103 м. 1 — частица гедрита, 2 — агрегат из частиц иллита и смектита, 3 — обломки диатомей, 4 — вернадит.

Октябрь 2017 г., характеризуется гораздо меньшим количеством Mn-содержащих частиц и большим — останков диатомовых водорослей (Рисунок 47) и других организмов, в том числе, копепод. Как видно из (Рисунок 44), концентрация взвешенного вещества повышена по сравнению с предыдущей съемкой, а концентрация растворенного кислорода понижена. Частицы вернадита совсем небольшого размера и имеют меньшее количество «щупалец» по сравнению с предыдущими пробами. Минеральная фракция остается неизменной с доминирующим кварцем.

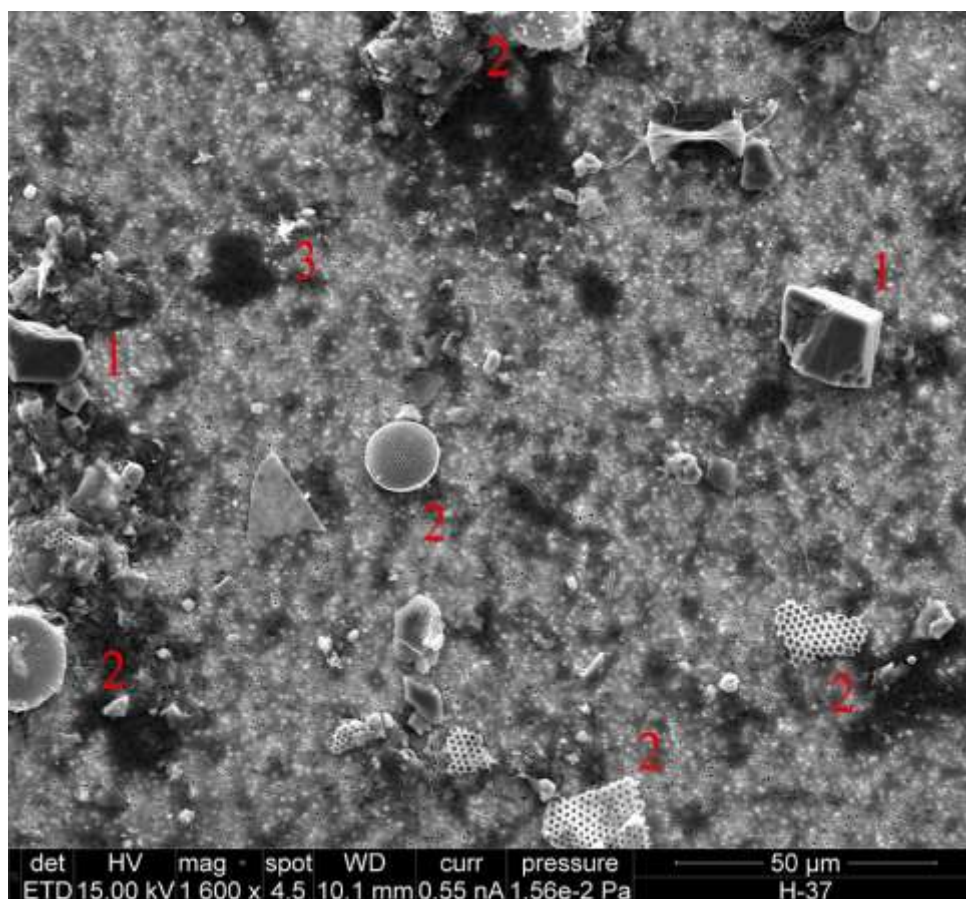


Рисунок 47. Проба взвеси Н37, дата отбора 14.10.2017 г., горизонт пробоотбора 103 м. 1 — частицы кварца, 2 — осколки диатомей, 3 — маленькие частицы вернадита.

Август 2018 г. отличается практически полным отсутствием кислорода в придонном слое при наличии сероводорода и крайне низкой концентрацией взвеси, что особенно заметно на изображении, полученном с помощью электронного сканирующего микроскопа (Рисунок 48А). Вместо минеральных или органических частиц в пробе содержались азот-содержащие (до 70% азота) пленки с мелкими минеральными включениями (в том числе, золото) и частицы технеция (Рисунок 48Б). Количество взвеси на фильтре настолько мало, что видны поры фильтра, забитые угольным напылением.

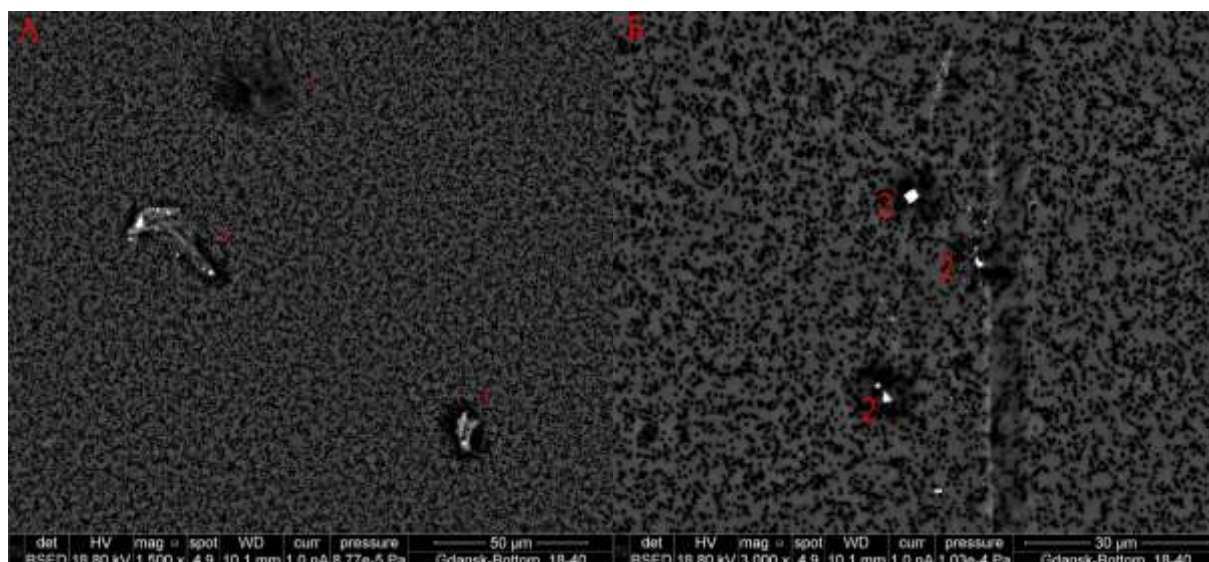


Рисунок 48. Проба взвеси 18-40, отобрана 02.08.2018 г., горизонт пробоотбора 103 м. 1 — азот-содержащие пленки, 2 — частицы технеция.

В октябре 2018 г. условия придонного слоя в Гданьской впадине были аналогичны тем, что наблюдались в августе того же года: аноксия и сероводородное заражение. Тем не менее, концентрация взвеси увеличилась и изменился ее состав: практически все минеральные зерна, обнаруженные в данном образце, представлены кристаллизованной серой (Рисунок 49) диаметром до 10 мкм. Процесс образования взвешенной серы на границе дно–вода с участием бактерий рода *Veggiatoa* описан для Готландской впадины в [Yücel et al., 2017].

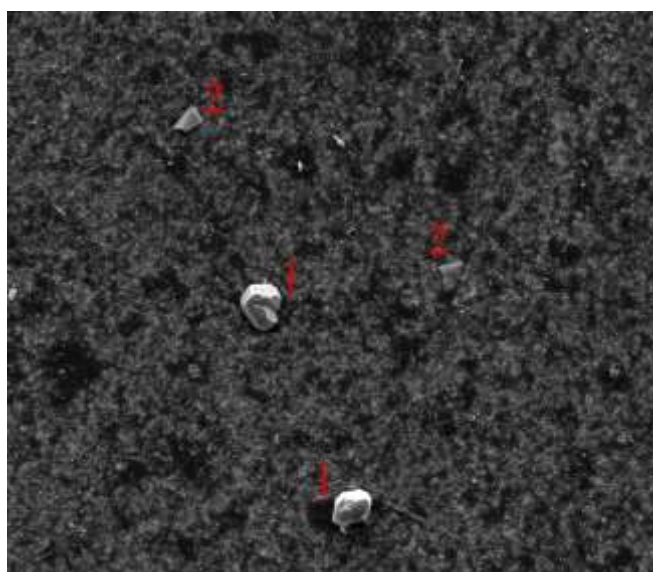


Рисунок 49. Проба взвеси 1-38, дата отбора 20.10.2018 г., горизонт пробоотбора 103 м. 1 — частицы серы, 2 — осколки диатомей.

В процессе увеличения содержания сероводорода в придонном слое и увеличением этого слоя граница смены окислительных условий на восстановительные переместилась выше, на глубину 80–77 м. Таким образом, условия, благоприятные для бактериального окисления растворенных форм марганца также сместились на эту глубину. Пробы, отобранные в августе 2017 г. показывают уже не начальные стадии развития вернадита, а процесс агрегации его с минеральными частицами (кварцем и глинистыми минералами) (Рисунок 50).

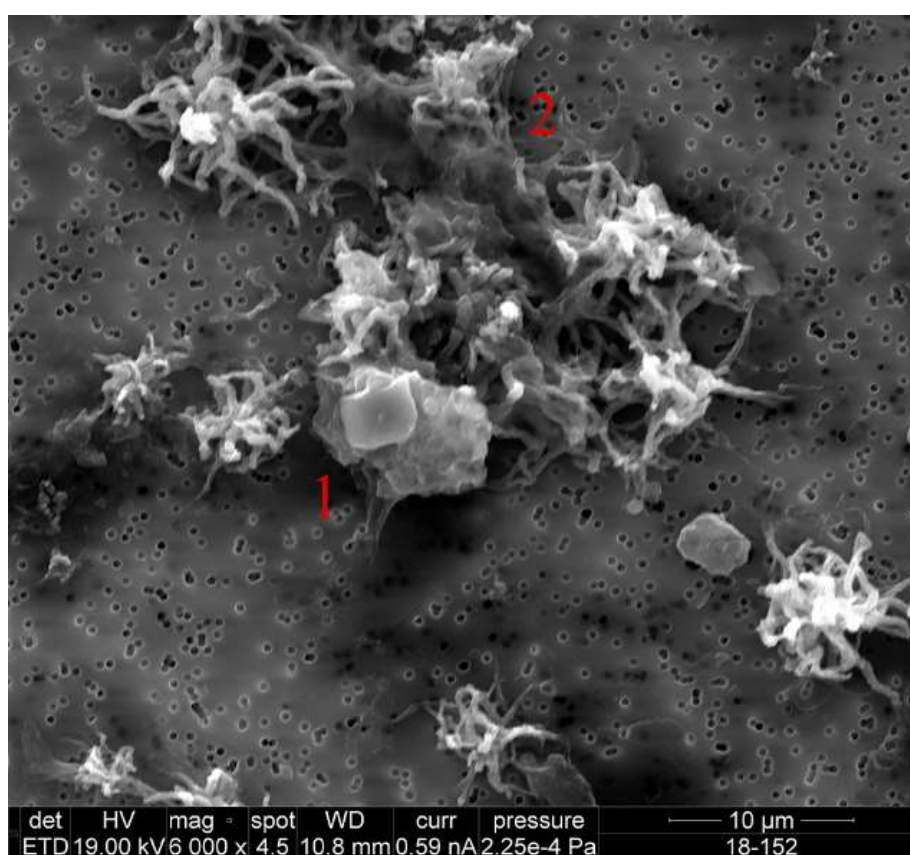


Рисунок 50. Проба взвеси 18-152, дата отбора 02.08.2018 г., горизонт пробоотбора 80,2 м. 1 — частица ортоклаза, 2 — вернадит.

Слой максимальной мутности на опорном разрезе в августе 2018 года расположен на глубине 80 м, что означает, что в Гданьской впадине он будет промежуточным, а для Гданьско-Готландского порога — придонным (Рисунок 51). Придонный слой повышенной мутности не является классическим нефелоидным, так как в данном районе нет осадков, которые могут быть взмучены.

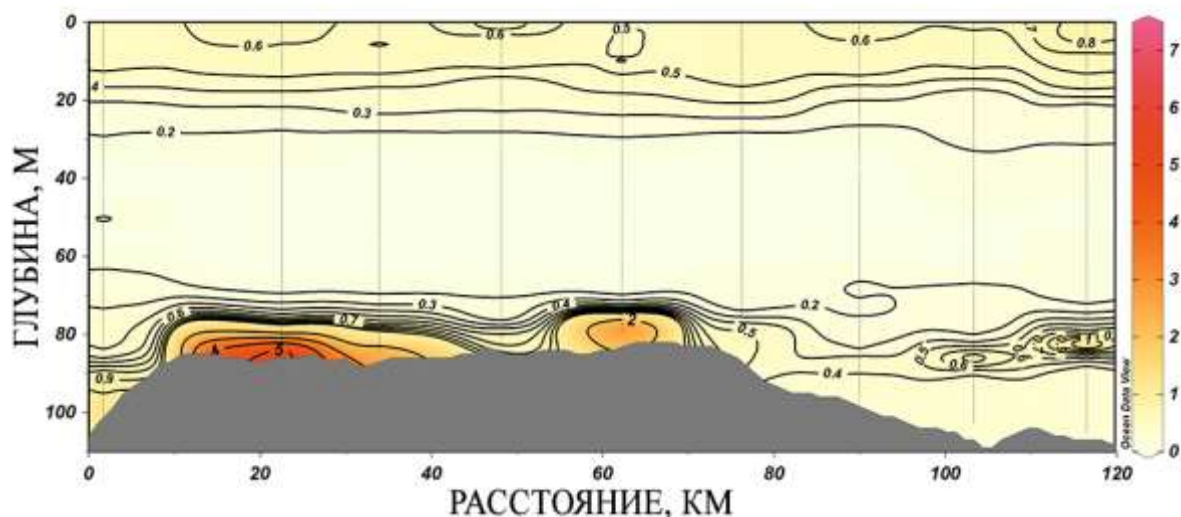


Рисунок 51. Вертикальное распределение мутности (FTU) на опорном разрезе 02.08.2018 гг.

По данным [Лукашин и др., 2018] основными взвесеобразующими компонентами для Юго-Восточной Балтики являются: органическое вещество, кремнезем кремнистых организмов планктона (индикатор которого SiO_2 аморфный), литогенная компонента и Fe и Mn. Изучение содержания вещественного состава взвеси осуществлялось на описанном выше опорном разрезе.

Во взвеси SiO_2 ам представлен в основном диатомовыми водорослями — преимущественно тонкопанцирными *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros holsaticus*, *Coscinodiscus granii*, *Achnanthesaeniata* и др, чей пик цветения происходит весной и, как следствие, сезонная изменчивость концентрации аморфного кремнезема проявляется в уменьшении концентраций от весны к осени. Распределения SiO_2 ам на разрезе показывают уменьшение концентраций с глубиной во все сезоны, некоторое увеличение наблюдается в придонном горизонте.

Органическое вещество (ОВ) представлено привнесенным реками и автохтонным (детрит и фитопланктон) веществом. Основным поставщиком ОВ в Балтике являются сине-зеленые водоросли, особенно активны *Aph. flosaquae* и *N. Spumigena*. Распределение концентраций органического вещества уменьшается с глубиной, образуя второй максимум в придонном слое. Летом концентрации его несколько выше, чем весной и осенью (в сентябре), что обусловлено длительным цветением фитопланктона летом [Кудрявцева, 2017].

Литогенное вещество представлено минеральной частью взвеси, поступающей в моря с речным стоком, в результате абразии берегов или с аэрозолями. Это в основном продукты кислых пород, выносимые реками со Скандинавского щита и Русской платформы, представленные кварцем, обломочными (полевые шпаты) и глинистыми алюмосиликатами [Емельянов, Пустельников, 1976]. В составе абиогенной части взвеси встречается барит, железистые алюмосиликаты, кальцит, аутигенные железистые и марганцовистые образования [Bernard et al., 1989]. Концентрации литогенного вещества в водной толще Балтийского моря распределяются, в отличие от биогенных компонент, довольно равномерно. Характерной особенностью распределения является минимум в холодном промежуточном слое, где минимальны концентрации самой взвеси. Это закономерно, так как биогенные компоненты в процессе осаждения деградируют, а литогенный материал практически не изменяется. Повышение его концентраций также отмечается у дна, что обусловлено влиянием нефелоидных слоев.

В Балтике, как и в других морях с высокой первичной продукцией и слабым водообменом с более плотными водами океана или окраинных морей в глубоких впадинах возникают восстановительные условия с присутствием сероводорода. Попадая в восстановительную среду, оксигидроксиды железа и марганца переходят в состояние низших валентностей и растворяются. Концентрации растворенных форм в восстановленной среде резко увеличиваются. Возникает диффузия растворенных форм элементов вверх и происходит микробиальное окисление Fe и Mn, оксигидроксиды которых обогащаются рядом микроэлементов. Они могут быть в виде аморфных оксигидроксидов, аморфных соединений с фосфором, но основная часть их находится в органической матрице, что замедляет их скорость осаждения [Neretin et al., 2003; Yakushev et al., 2007; Dellwig et al, 2010; Pohl, Fernández-Otero, 2012; Glockzin, 2014; Bauer et al, 2017].

Таким образом, межгодовой ход гидрологических параметров, растворенного кислорода и состава взвешенного вещества в придонном слое Гданьской впадины указывает не только на нерегулярное поступление затоковых североморских вод, но также и на общую для Балтийского моря тенденцию к высокой скорости ассимиляции растворенного кислорода. Наличие перехода от окислительных условий к восстановительным в придонном слое Гданьской впадины вызывает развитие слоя повышения концентрации взвешенных форм марганца, образованных в процессе

бактериального окисления. Образовавшиеся частицы не вносят большого вклада в весовую концентрацию взвеси, поэтому зафиксировать наличие аутигенных нефелоидных слоев можно лишь с помощью оптических методов (мутность на мультипараметрическом зонде). Кроме того, в процессе жизнедеятельности сульфид-окисляющих бактерий, в придонном слое Гданьской впадины образуется взвешенная сера.

4.2. Изменения в концентрации взвеси в береговой зоне

Межгодовой ход концентрации взвешенного вещества в береговой зоне моря связан с большим количеством параметров: биопродуцирование, штормовая активность, хозяйственная деятельность. Как следствие, он с трудом поддается прогнозу и моделированию. В частности, для всех точек мониторинга, расположенных вдоль северного побережья Калининградской области от м. Таран до центральной части Куршской косы (Рисунок 26), был посчитан линейный тренд концентрации взвеси за период с 2003 года по 2018. Для каждой точки наблюдений количество измерений превышало 75, однако не для всех точек p -уровень значимости был ниже 0,1 (10% — допустимое значение уровня значимости по [Малинин, 2008]). Значимый положительный тренд наблюдался для точек наблюдений №1 (м. Таран), №4 (Куликовская бухта) и №5 (корень Куршской косы) (Рисунок 52–54). Прирост концентрации взвешенного вещества для станции 1 составил 0,025 мг/л за 15 лет, а для станций 4 и 5 — 0,016 мг/л за те же 15 лет.

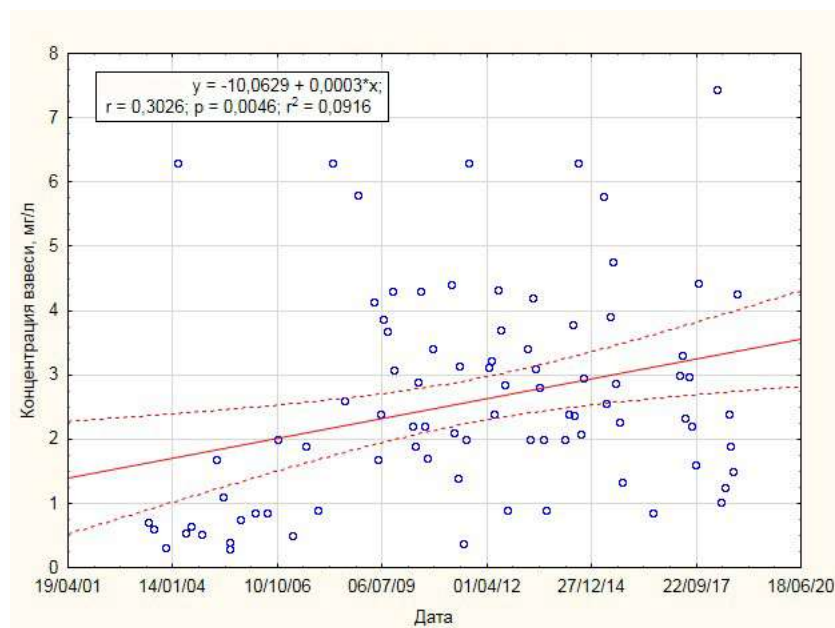


Рисунок 52. Концентрация взвешенного вещества в точке мониторинга 1 (м. Таран) за 2003–2018 гг.

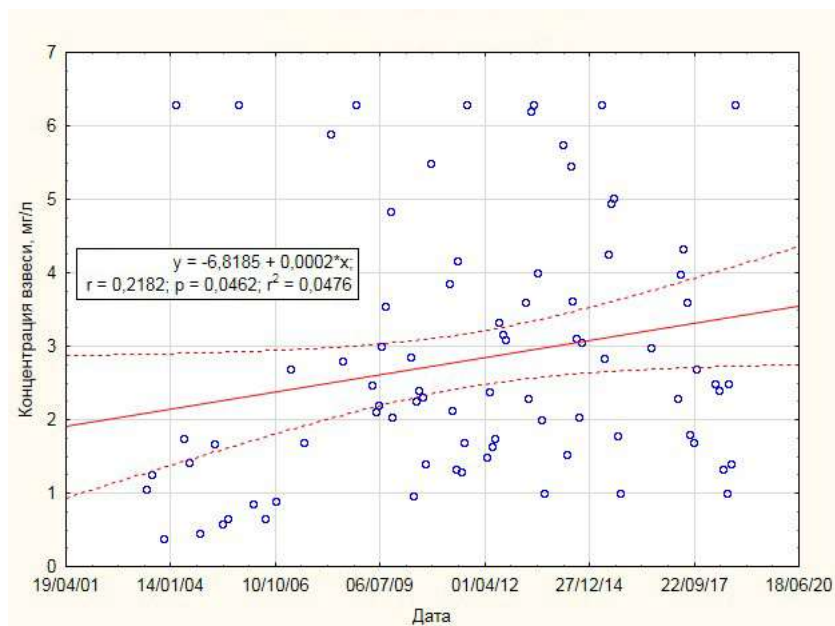


Рисунок 53. Концентрация взвешенного вещества в точке мониторинга 4 (Куликовская бухта) за 2003–2018 гг.

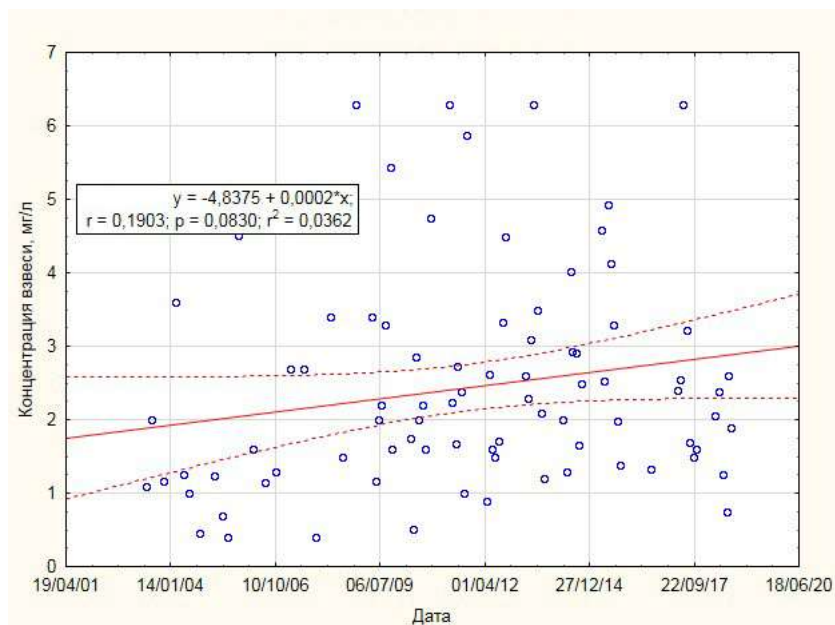


Рисунок 54. Концентрация взвешенного вещества в точке мониторинга 5 (корень Куршской косы) за 2003–2018 гг.

Для остальных точек мониторинга: 3, 6 и 7, количества собранных данных оказалось недостаточно, чтобы говорить о значимом тренде какого-либо знака (Рисунок 55–57). Для этих точек p -уровень значимости был выше 0,1, поэтому нельзя было

отвергать нулевую теорию о том, наблюдаемые различия между значениями находятся в пределах случайных отклонений.

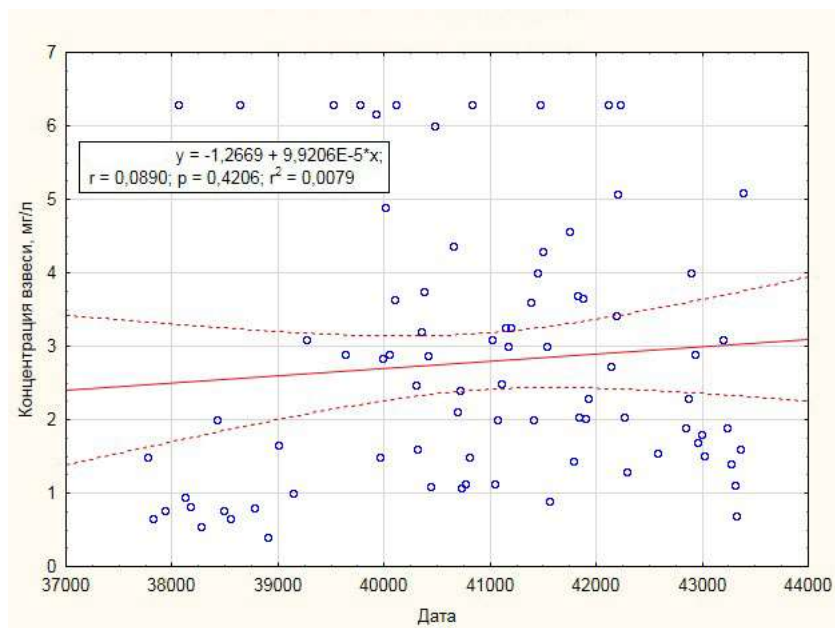


Рисунок 55. Концентрация взвешенного вещества в точке мониторинга 5 (корень Куршской косы) за 2003–2018 гг.

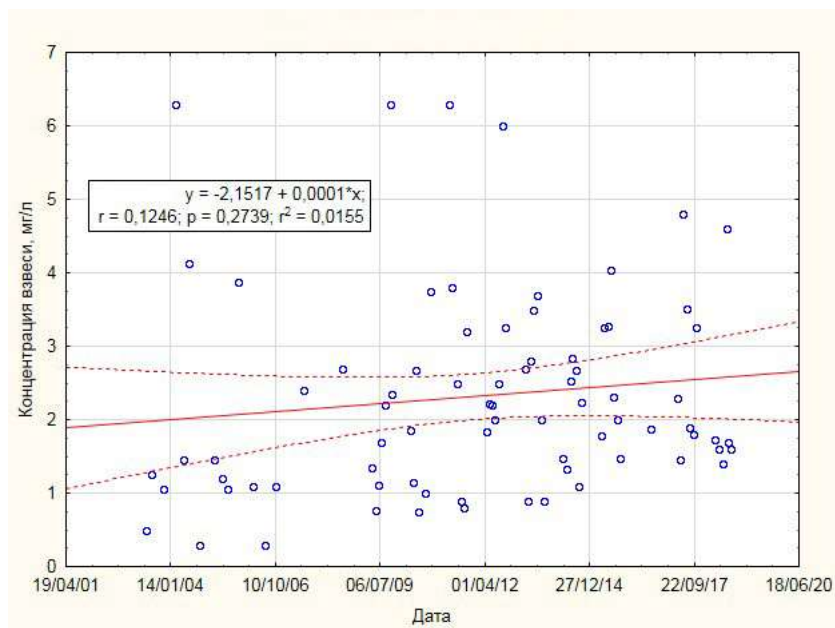


Рисунок 56. Концентрация взвешенного вещества в точке мониторинга 5 (корень Куршской косы) за 2003–2018 гг.

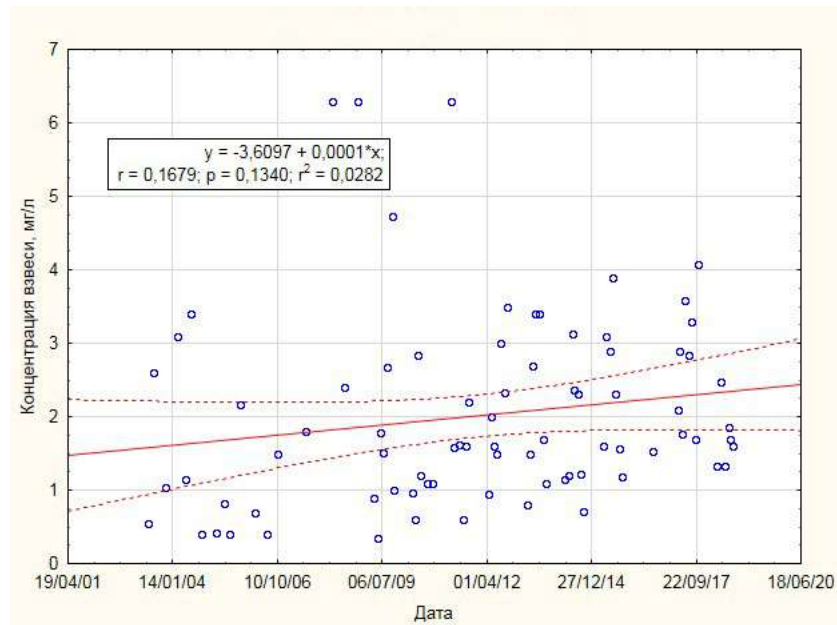


Рисунок 57. Концентрация взвешенного вещества в точке мониторинга 5 (корень Куршской косы) за 2003–2018 гг.

Точка мониторинга на МЛСП Дб, которую можно назвать фоновой для береговой зоны, так как платформа расположена на изобате 30 м, что является крайней границей зоны. Для концентрации взвешенного вещества за последние 15 лет получен положительный тренд (на основании 106 измерений) (Рисунок 58), прирост составил 0,01 мг/л.

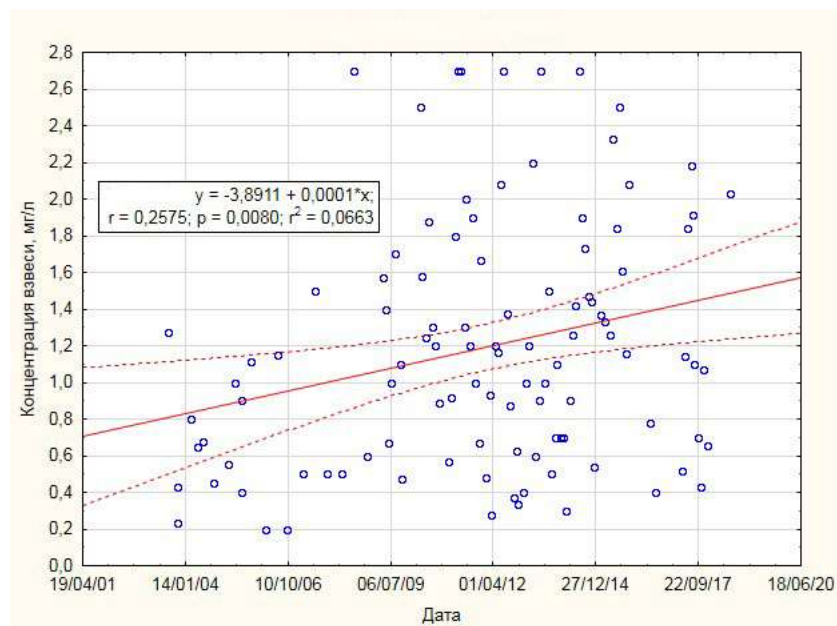


Рисунок 58. Концентрация взвешенного вещества в точке Дб за 2003–2018 гг.

По результатам зонирования по значимости положительного тренда береговая зона была разделена на 2 типа (Рисунок 59).

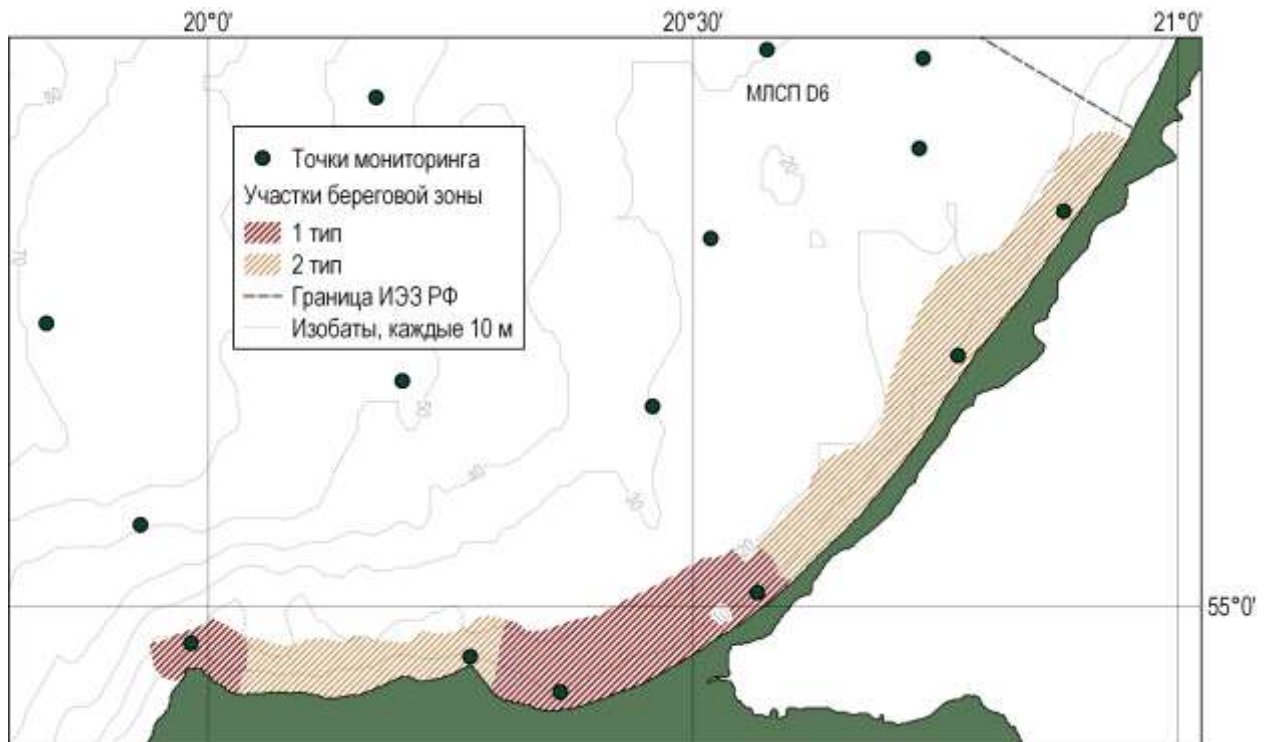


Рисунок 59. Карта-схема участков береговой зоны, где выражен положительный тренд в концентрации взвеси (тип 1) и где тренд незначителен (тип 2).

1 тип — участки береговой зоны, где наблюдается положительный тренд по взвешенному веществу. Это, в первую очередь, зона высокой первичной продукции: бухта между Калининградским полуостровом и Куршской косой [Кудрявцева, 2017]. Тенденция увеличения концентрации взвеси может быть связана как с изменениями в биопродуктивности, так и с гидрометеорологическими параметрами и связанной с ними абразией берега. Данный тренд косвенно указывает на рост уровня эвтрофированности на этих участках акватории региона. Положительный тренд в концентрации взвеси наблюдается в районе м. Таран, где сильно действие апвеллингов и вихреобразование. Кроме того, эта зона испытывает влияние западного побережья Калининградского полуострова и, не в последнюю очередь, Калининградского янтарного комбината (рис. 60).

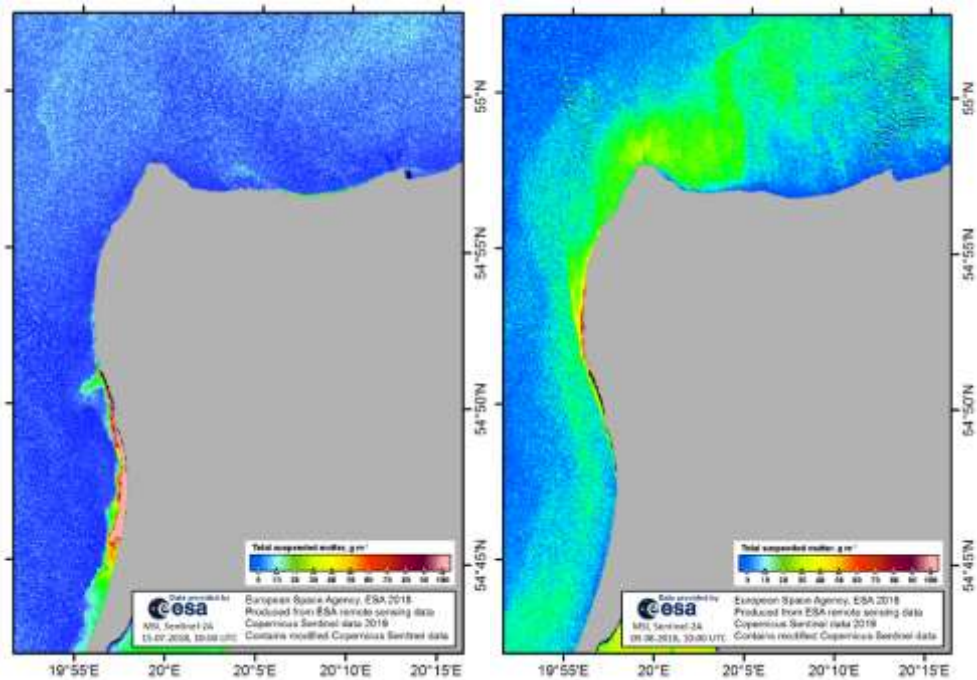


Рисунок 60. Поступление взвешенных веществ в береговую зону моря со сбросом пульпы Янтарного комбината, июль и август 2018 г.

2 тип — участки без выраженного повышения концентрации взвеси, что позволяет обозначить их как устойчивые.

Таким образом, в зону с наибольшим риском повышения концентрации взвешенного вещества при существующих высоких концентрациях попадает обширная акватория между Калининградским полуостровом и Куршской косой, хозяйственное использование представлено, в основном, рекреацией, и часть акватории, открытой к воздействию западного побережья полуострова.

4.3. Формирование антропогенного ландшафта на западном побережье Калининградского полуострова

Несмотря на то, что объемы сброса твердого вещества Калининградского янтарного комбината (КЯК) в море несопоставимы с объемами речного твердого стока для региона — 30 км³/год для р. Висла [Majewski, 1994] и 3,7 км³/год [Dubra, 1994] для Вислинской лагуны, КЯК является важным элементом антропогенной нагрузки на акваторию. Поступление взвешенного вещества со сбросом Янтарного комбината было нерегулярно по времени. В частности, с 1991 года объемы добычи янтаря существенно снизились, уменьшился и объем рыхлого материала сбрасываемого в море с 1,2 млн.м³ в 1991 г. до 0,8 млн.м³ в 2001 г. Применялся способ сброса пульпы через

хвостохранилище, поэтому поступление взвешенного вещества в море было минимальным. Тем не менее, в 2019 году предприятие приняло решение об изменении способа сброса вскрышных пород.

В береговой зоне моря, прилегающей к району Приморского месторождения янтаря (пос. Янтарный), доминирует вдольбереговой перенос песчаных фракций, преимущественно южного направления. Вместе с тем, представляются вероятными латеральные пути распространения частиц мелкопесчаной и алевритовой размерности. Они возникают в результате гравитационного «сползания» (сальтации) частиц по склону в условиях изменчивой придонной гидродинамики и контролируются отрицательными формами микрорельефа дна (углубления, эрозионные врезы).

На протяжении последнего столетия береговая линия западного берега Самбийского п-ова претерпела значительные изменения в результате как естественных факторов, так и техногенного вмешательства. Побережье в районе пос. Янтарный, является техногенным. Расположенный на значительном удалении от современного берега древний береговой уступ стабилизировался, за исключением двух мысов, где доминируют абразионные волновые и склоновые обвальнo-осыпные процессы, приводящие к отступанию берега. К северу от пос. Янтарный берег развивается под влиянием абразионных и слоновых процессов, без техногенного вмешательства. За восьмидесятилетний период (1936–2013 гг.) принципиально береговой контур не изменился: на мысах сохранились выступы берега, а вогнутости береговой линии не изменили своей формы. Основная трансформация берега, выравнивающая береговой контур проявлена на локальных мысах в районе пос. Донское.

Таким образом, основным естественным динамическим процессом в пределах западного побережья Калининградского полуострова является абразия. В то же время, активная прибрежная литодинамика на участке во многом определяется и антропогенным фактором. В отсутствии подпитки пляжей техногенными сбросами пульпы КЯК в условиях дефицита естественных источников осадочного материала, возможна периодическая резкая активизация размыва берегов.

Работы, направленные на изучение пространственного распределения плюма вод с повышенной концентрацией взвешенного вещества, источником которого является КЯК, включали 6 съемок в разных гидрометеорологических условиях.

Съемка 22 марта 2019 г.

Результаты съемки представлены на рисунке 1.8. Максимальные концентрации взвешенного вещества (до 80 мг/л в придонном и поверхностном слоях) сосредоточены у точки 4 (рисунок б1).

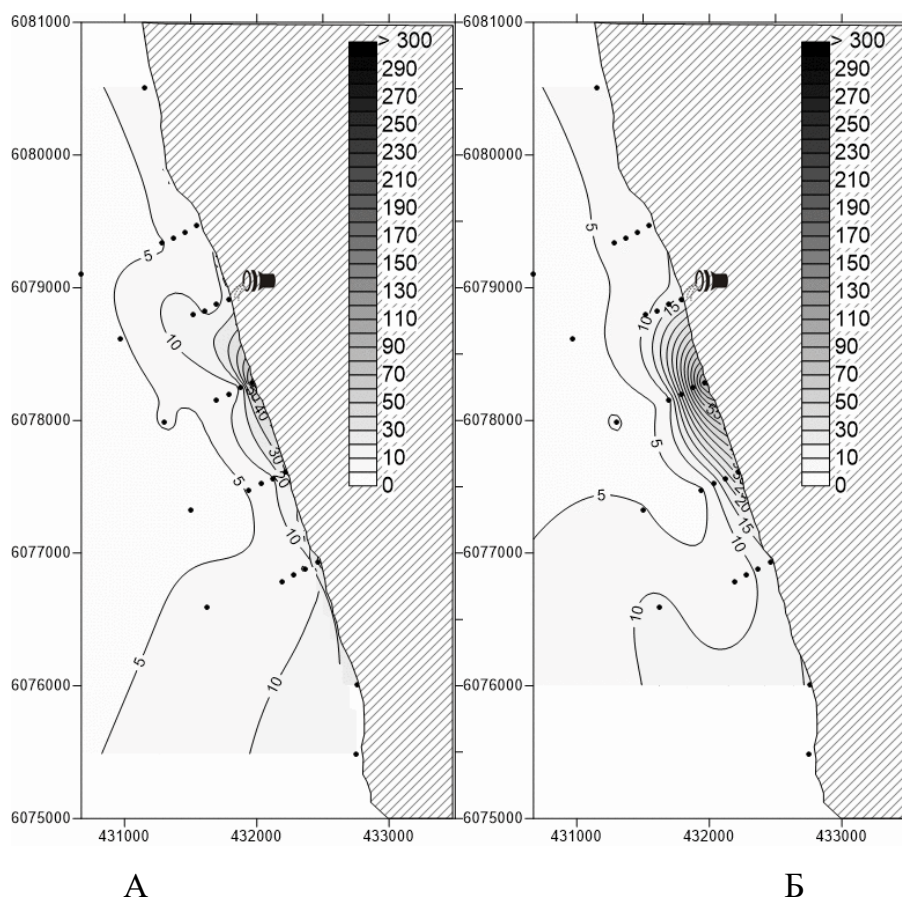


Рисунок б1. Концентрация взвеси в поверхностном (А) и придонном (Б) слое
22.03.19.

Ветровые условия, за сутки перед отбором проб представляли собой ветра западного направления (рисунок б2), что отразилось в локализации максимума концентрации взвешенного вещества непосредственно в районе выпуска вод.

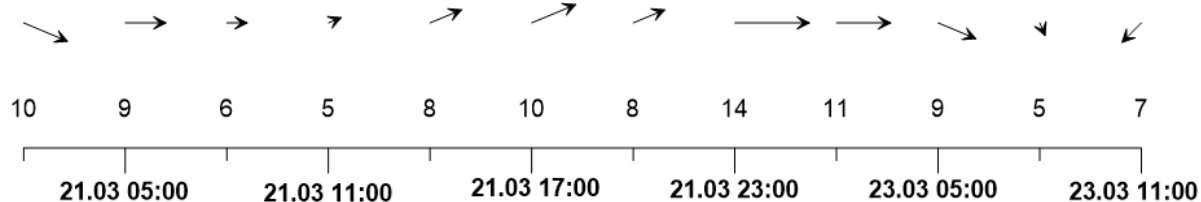


Рисунок б2. Скорость ветра (м/с) и его направление за сутки до отбора проб.

Съёмка 28 марта 2019 г.

Результаты съемки представлены на рисунке 63. Максимальные концентрации взвешенного вещества (до 270 мг/л в придонном и поверхностном слоях) сосредоточены у точки 4.

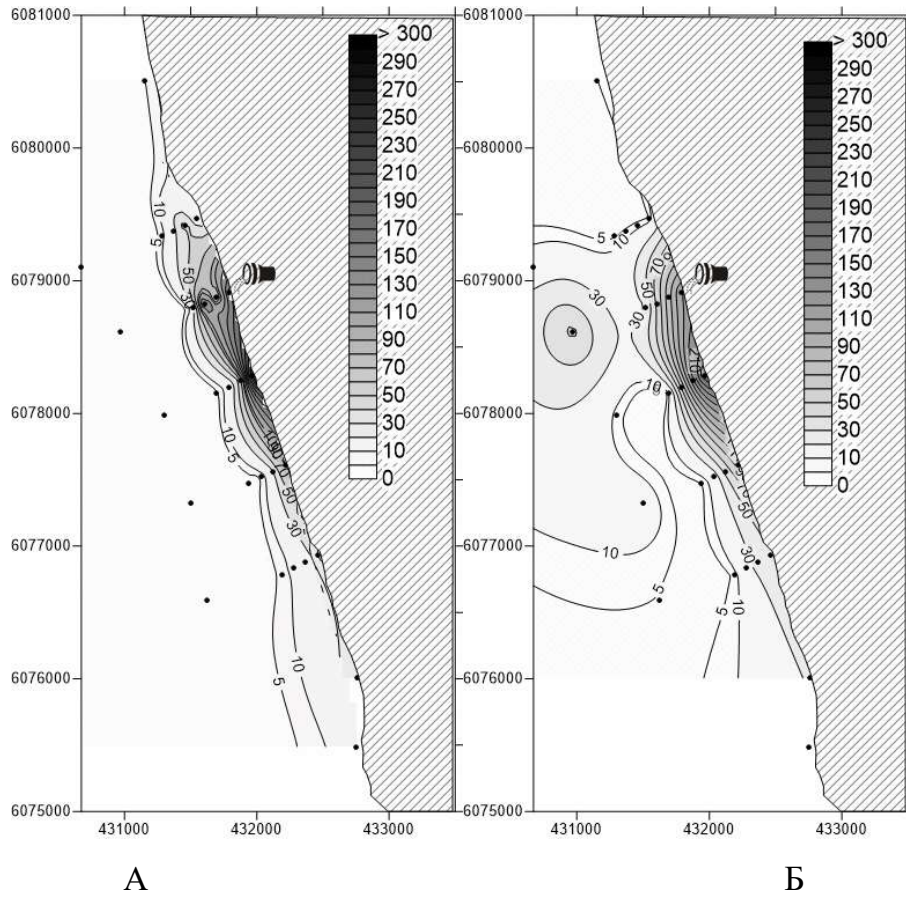


Рисунок 63. Концентрация взвеси в поверхностном (А) и придонном (Б) слое 28.03.19.

Ветровые условия, за сутки перед отбором проб представляли собой переход от ветров юго-западных румбов к северо-западным и вновь к юго-западным (рисунок 64), что, как и во время предыдущей съемки, отразилось в локализации максимума концентрации взвешенного вещества непосредственно в районе выпуска вод и небольшому его перемещению к северу.

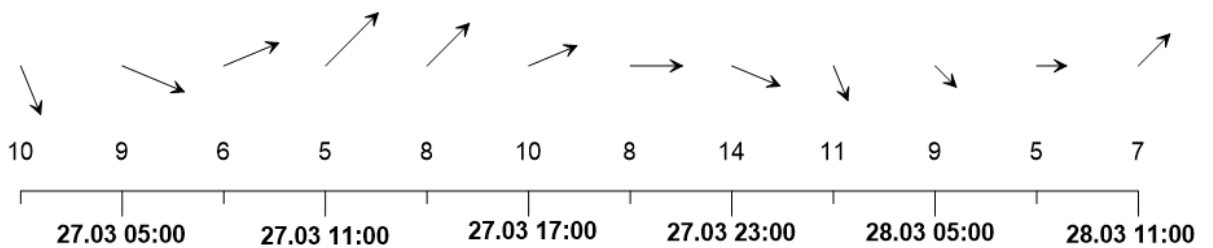


Рисунок 64. Скорость ветра (м/с) и его направление за сутки до отбора проб.

Съёмка 17 апреля 2019 г.

Результаты съёмки представлены на рисунке 65. Максимальные концентрации взвешенного вещества (до 180 мг/л в придонном и поверхностном слоях) сосредоточены у точек 3–5.

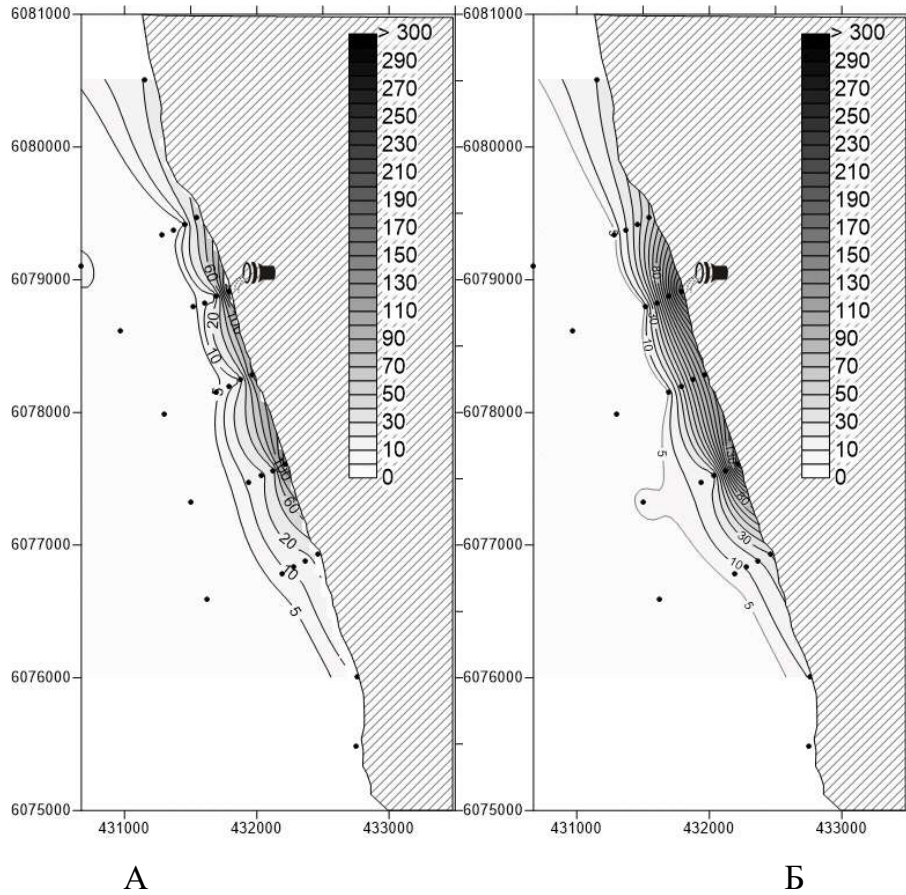


Рисунок 65. Концентрация взвеси в поверхностном (А) и придонном (Б) слое 17.04.19.

На спутниковом снимке, полученном спутником TERRA/AQUA (MODIS) 17.04.19 хорошо прослеживается пятно с повышенной концентрацией взвеси, распространяющееся на юг от точки сброса (рисунок 66).

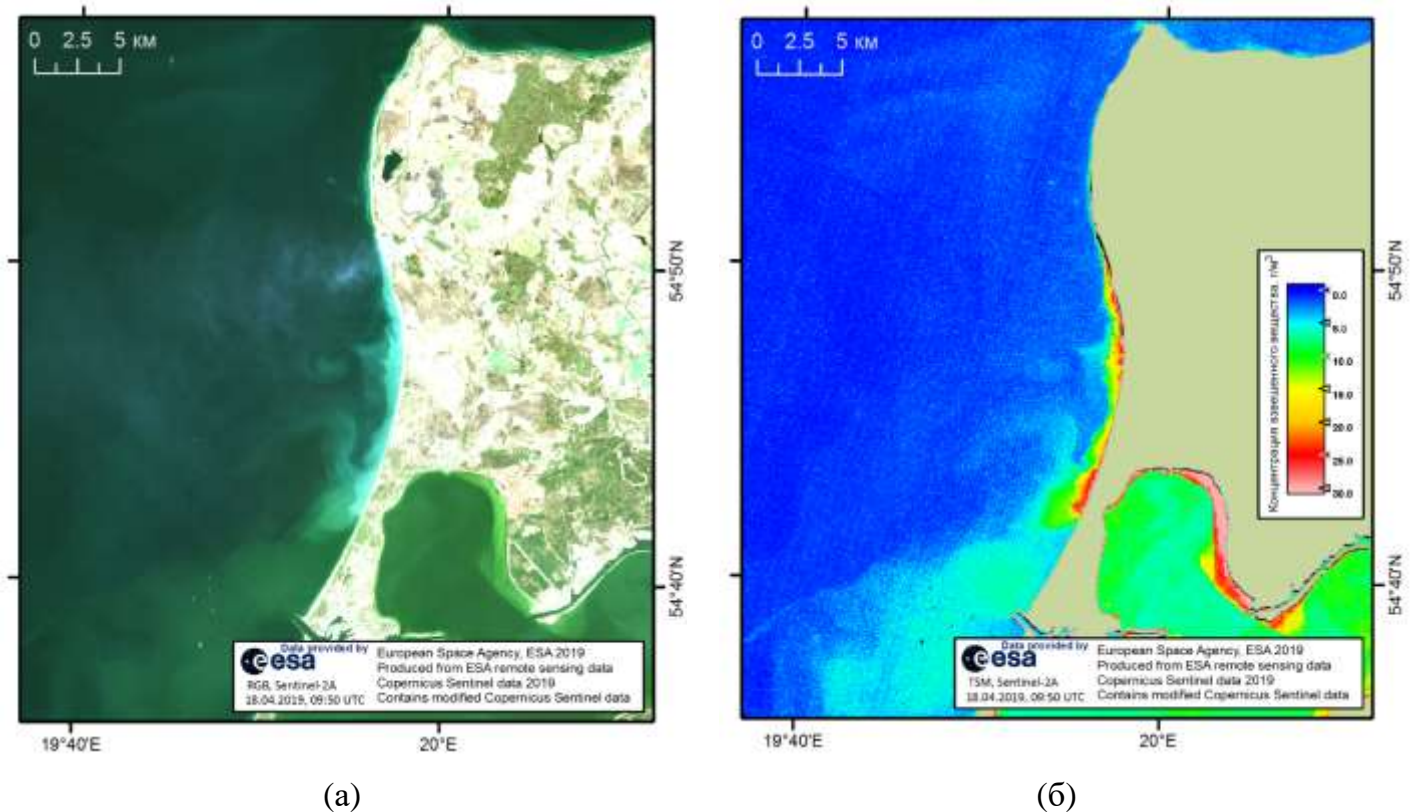


Рисунок 66. Оптическое спутниковое изображение Юго-Восточной Балтики (композиция 3-х каналов RGB) (а) и концентрация взвешенного вещества ($\text{г}/\text{м}^3$) (б) по данным Sentinel-2A (MSI) 18.04.2019 (09:50 UTC)

Направление ветра за сутки перед отбором проб менялось с северного на западное и юго-западное (рисунок 67), что отразилось в распространении зоны максимальных концентраций взвешенного вещества от точки выпуска вод к югу от сброса вод.

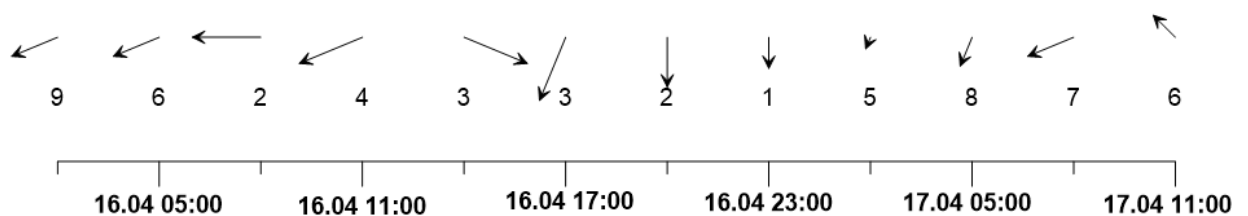


Рисунок 67. Скорость ветра ($\text{м}/\text{с}$) и его направление за сутки до отбора проб.

Съёмка 29 апреля 2019 г.

Результаты съёмки представлены на рисунке 68. Максимальные концентрации взвешенного вещества (до $360 \text{ мг}/\text{л}$ в поверхностном слое и $460 \text{ мг}/\text{л}$ в придонном) сосредоточены у точки 3.

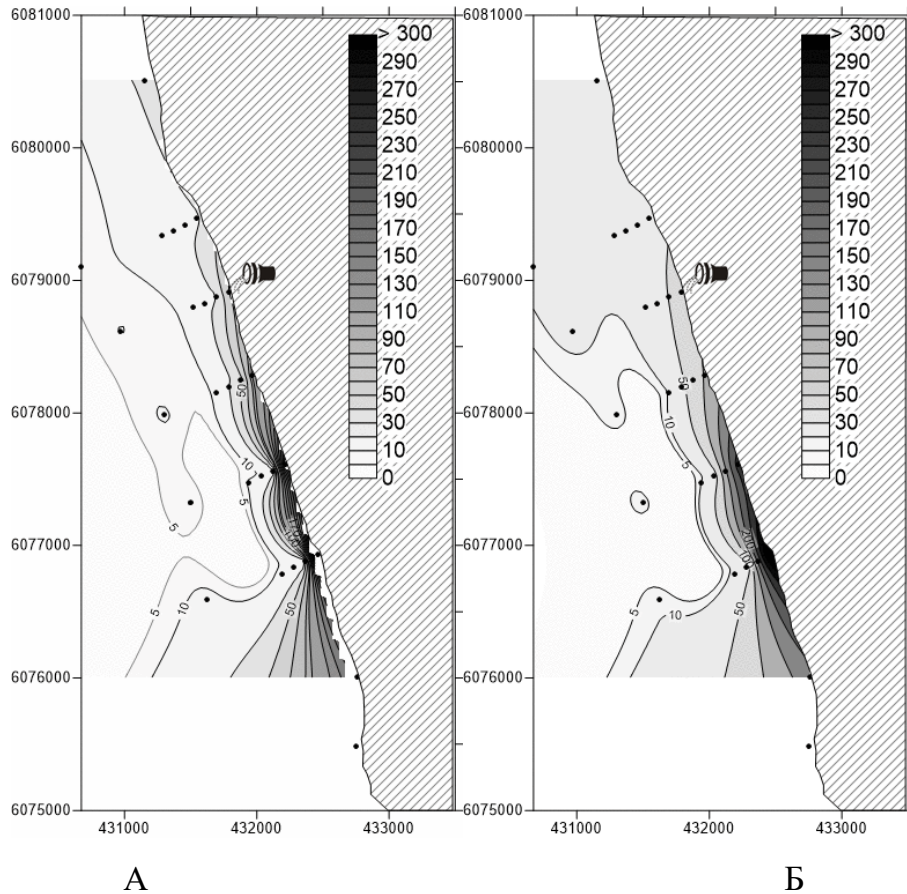


Рисунок 68. Концентрация взвеси в поверхностном (А) и придонном (Б) слое 29.04.19

За сутки до съемки преобладали ветра северных румбов (рисунок 69), что способствовало перемещению пятна максимальных (за весь период наблюдений) концентраций взвеси южнее от места выпуска вод.

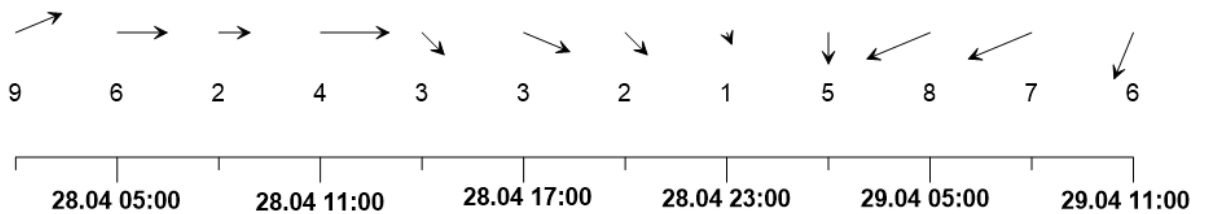


Рисунок 69. Скорость ветра (м/с) и его направление за сутки до отбора проб.

Съемка 06 июня 2019 г.

Результаты съемки представлены на рисунке 70. Во время данной съемки были зафиксированы минимальные концентрации взвешенного вещества в районе исследований за весь период. Максимальные концентрации взвешенного вещества (до 11 мг/л) были локализованы вдоль берега (точки 2–5), следуя, в том числе, циркумконтинентальной зональности.

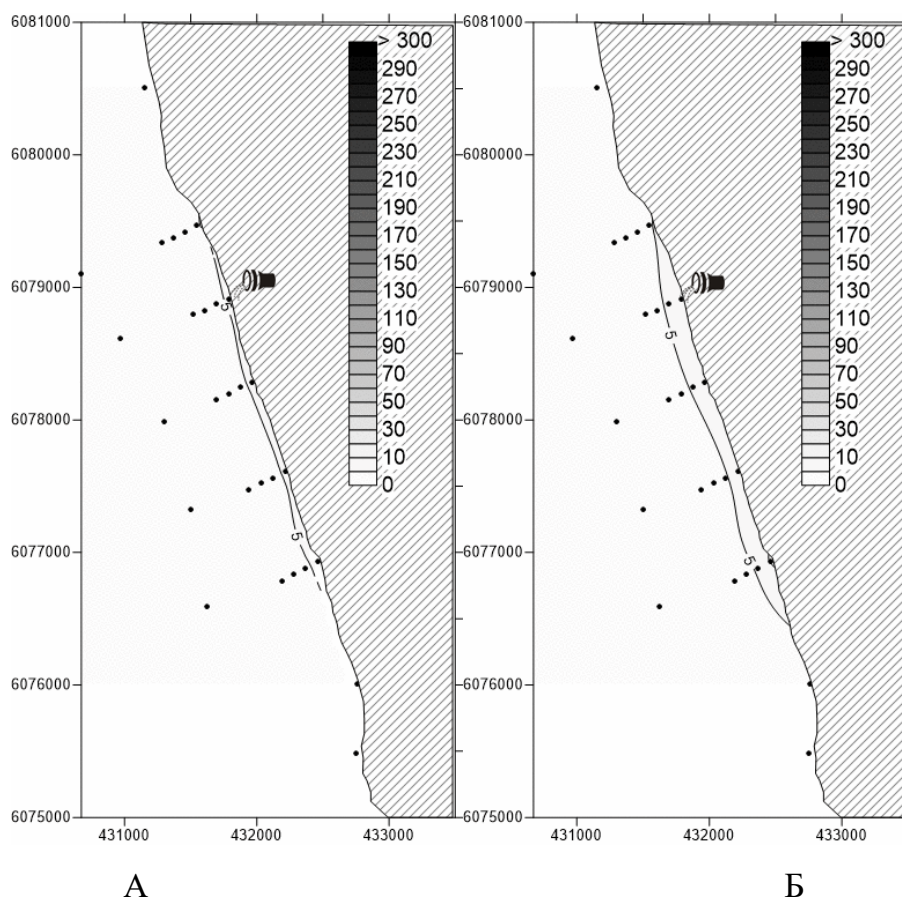


Рисунок 70. Концентрация взвеси в поверхностном (А) и придонном (Б) слое 06.06.19.

За сутки до съемки преобладали ветра восточных румбов (рисунок 71), что позволило максимальным концентрациям взвеси более-менее равномерно распределиться вдоль берега.

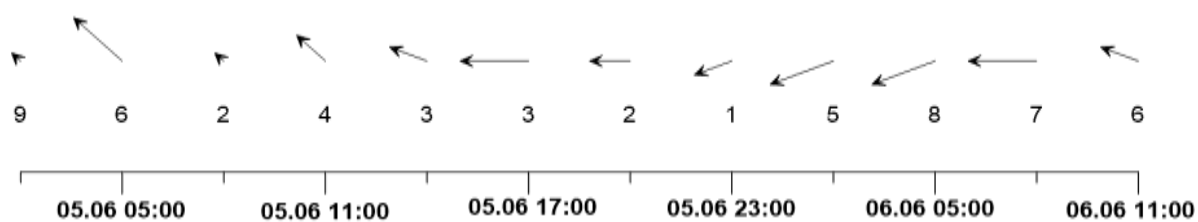


Рисунок 71. Скорость ветра (м/с) и его направление за сутки до отбора проб.

Съёмка 30 июля 2019 г.

Результаты съемки представлены на рисунке 72. Концентрации взвеси, которые наблюдались в этот день также были невелики. Максимальные концентрации (до 24 мг/л в поверхностном слое и 29 мг/л в придонном) были локализованы у точки 4 с небольшим смещением на юг, в сторону точек 2 и 3.

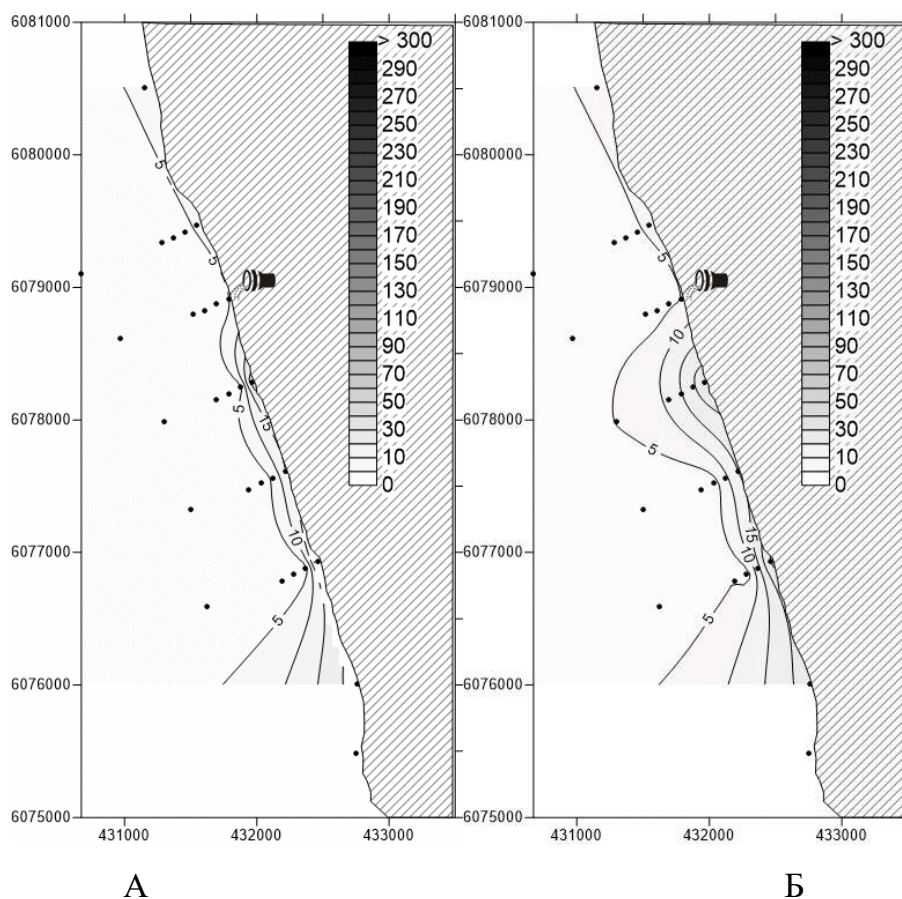


Рисунок 72. Концентрация взвеси в поверхностном (А) и придонном (Б) слое 30.07.19.

За сутки до съемки преобладали слабые ветра северные ветра (рисунок 73), что и вызвало перенос взвеси к югу от источника.

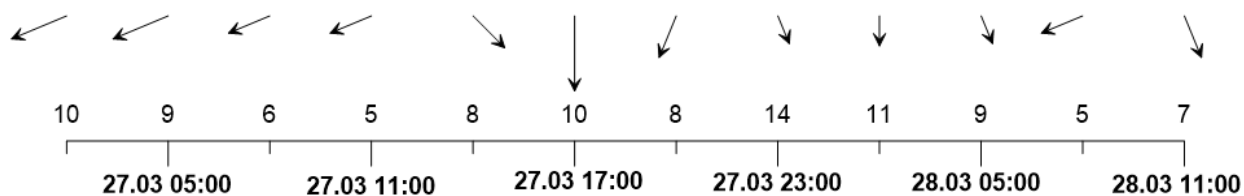


Рисунок 73. Скорость ветра (м/с) и его направление за сутки до отбора проб.

По результатам 6-ти съемок можно сделать несколько выводов.

Во-первых, распространение воды с максимальными концентрациями взвешенного вещества значительно зависит от ветровых условий (скорость ветра и направление), но подчиняется законам циркумконтинентальной зональности (уменьшение концентрации взвеси по мере удаления от берега), то есть максимальные концентрации всегда локализованы в приурезовой волноприбойной зоне и не распространяются далеко в открытое море. Структура поля течения в исследуемом

районе в основном определяется структурой поля ветра и геометрией береговой линии. Характерны течения имеющие вдольбереговую ориентацию. При восточном ветре в исследуемом районе наблюдается разделение течения на два противоположных направления: вдоль берега на север, с последующим отклонением в сторону открытого моря, и вдоль берега на юг. Наибольшие концентрации пульпы в исследуемом районе наблюдаются при западных и восточных ветрах. При ветрах северного, северо-западного и восточного направления наблюдается вдольбереговой перенос в южном направлении в сторону г. Балтийск.

Во-вторых, пятно воды с экстремальными концентрациями взвеси (более 10 мг/л) достигало рекреационной зоны пос. Янтарный (точка 7) 29.03, 17.04 и 29.04, когда концентрация взвешенного вещества в районе источника превышала 180 мг/л.

4.4. Совершенствование схемы мониторинга

Существование зон бескислородных и малоокислородных условий в Юго-Восточной Балтике является одним из главных экологических рисков, угрожающих промышленному рыболовству. Для региона наиболее многочисленными и важными в промысловом отношении видами рыб являются, как и во всей Балтике, шпрот, сельдь, треска, камбалы и, в меньшей степени, лососевые рыбы (атлантический лосось и кумжа) [Александров и др., 2012]. В период перед «большим рождественским затоком» 2014 г., аэрировавшим придонный слой Гданьской впадины, нерестовый запас трески восточной Балтики находился в депрессивном состоянии (ниже минимального уровня предосторожности равного 160 тыс. т) [Александров и др., 2012]. Основными причинами плохого состояния запаса трески являются интенсивный промысел и неблагоприятные для выживания икры и личинок условия окружающей среды, включающие кислородные условия и мутность. Своевременное оконтуривание районов рискованного рыболовства, связанных с развитием сероводородных условий, позволит оптимизировать процесс промыслового рыболовства в регионе.

Согласно [Рябченко и др., 2016], в будущем климате качество воды, характеризваемое растворенным кислородом и сероводородом, будет ухудшаться по сравнению с современными условиями, что может привести к расширению зон сероводородного заражения и уменьшению эффективности промыслового рыболовства. Это будет происходить как за счет общего падения уловов, так и за счет замещения

ценных промысловых видов рыб на менее ценные с уменьшением стоимости валовой рыболовной продукции [Еремина, 2014]. В то же время, развитие аквакультуры как направления рыбохозяйственной деятельности на Балтийском море позволит адаптировать эту деятельность к прогнозируемым изменениям климата [Бугров и др., 2017]. Кроме того, новая схема геоэкологического мониторинга призвана более детально рассмотреть западное побережье Калининградской области, где расположен мощный антропогенный источник взвеси — Калининградский Янтарный Комбинат.

Таким образом, необходимо улучшить существующую объединенную схему геоэкологического мониторинга Юго-Восточной Балтики, принимая во внимание несколько экологических рисков. Во-первых, выделение зон рискованного рыболовства. По данным работы (п. 4.2), слой перехода от окислительных условий к восстановительным расположена на границе 80 м. Непосредственно сероводородные условия начинают развиваться глубже, на глубине 90 м. Таким образом, на изобате 90 м следует разместить несколько точек геоэкологического мониторинга, чтобы иметь возможность не только узнать толщину слоя сероводородного заражения, но и его пространственные особенности (Рисунок 74).

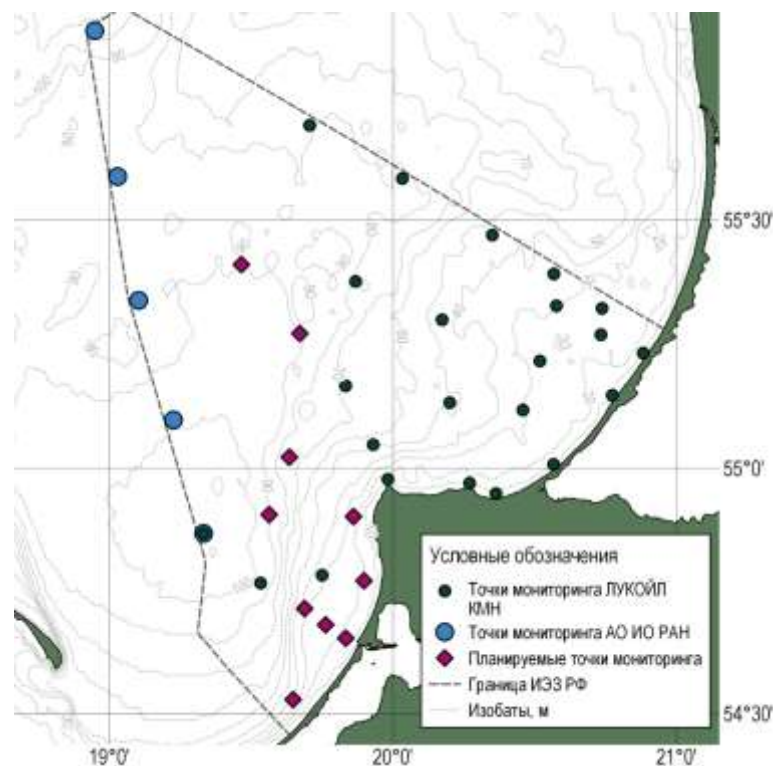


Рисунок 74. Предлагаемая схема геоэкологического мониторинга в российском секторе Юго-Восточной части Балтийского моря.

Также необходимо разместить дополнительные точки мониторинга у западного побережья Самбийского полуострова, поскольку влияние поступления взвешенного вещества из антропогенных источников, р. Висла и Вислинского залива в существующем мониторинге не отражено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поскольку пространственно-временная неоднородность распределения и состава взвешенного вещества вносит неоднородности в геоэкологическое состояние, проведенное исследование рассматривает взвесь как индикатор геоэкологического состояния морской среды региона. По результатам исследования были получены следующие выводы

1. Циркумконтинентальная зональность распределения взвеси в российском секторе Юго-Восточной Балтики нарушается циркуляцией вод, вызванной орографией берега, хозяйственной деятельностью и наличием локального источника взвеси на Калининградском полуострове. Максимум среднесуточной концентрации взвеси в Юго-Восточной Балтике составляет 3,0 мг/л в поверхностном слое и 2,85 мг/л в придонном в районе пос. Куликово, где кроме активного развития фитопланктона, наблюдается абразионное разрушение берега. В открытой части моря поверхностные концентрации взвешенного вещества не превышает 1,2 мг/л, но и не опускается ниже 0,6 мг/л. Максимальные значения концентрации взвеси в придонном слое открытой части моря располагаются в центральной части Гданьской впадины (до 1,0 мг/л). Основным направлением транспорта взвешенного вещества является вдольбереговой перенос взвеси от полуострова в сторону Куршской косы.

2. В вогнутой части береговой зоны между Куршской косой и Калининградским полуостровом существует положительный тренд для концентрации взвеси на временном отрезке 2003–2018 гг., который является следствием действия комплекса факторов: усиления эвтрофикации, штормовой активности и связанной с ней береговой абразией, и активизацией хозяйственной деятельности в береговой зоне моря, а также вносит вклад в потенциально неблагоприятные изменения геоэкологического состояния береговой зоны.

3. Сезонная изменчивость вертикального распределения взвеси определяется, главным образом, биопродуктивностью, которое вызывает повышение концентрации взвешенного вещества по всей глубине. Вертикальное распределение взвешенного вещества в Юго-Восточной Балтике, как в сезонном, так и в межгодовом масштабе содержит в себе основные черты, характерные для всех морских бассейнов, а именно повышенные значения концентрации взвеси у поверхности моря ($> 0,8$ мг/л) и у его дна ($>1,0$ мг/л) и промежуточный слой минимальных концентраций ($< 0,4$ мг/л),

расположенный на глубине 50-70 м. Не получила подтверждения барьерная роль плотностных границ (термоклина и галоклина) в седиментационных и геохимических процессах. На этих потенциальных геохимических барьерах не обнаружено замедления седиментации и возникновения скоплений взвешенного вещества, а значит нет оснований говорить об интенсификации здесь биогеохимических процессов, связанных с деятельностью фито-, бактерио- и зоопланктона и разложением органических частиц. Таким образом, не происходит задержки в седиментации избытка органических частиц и загрязнителей на дно Гданьской впадины. Возможно, для выявления барьерного эффекта «скачков плотности» в толще воды требуется более детальное их изучение.

4. Межгодовой ход гидрологических параметров, растворенного кислорода и состава взвешенного вещества в придонном слое Гданьской впадины указывает не только на нерегулярное поступление затоковых североморских вод, но также и на общую для Балтийского моря тенденцию к высокой скорости ассимиляции растворенного кислорода. Наличие перехода от окислительных условий к восстановительным в придонном слое Гданьской впадины и вертикальная миграция переходной зоны вызывает развитие слоя повышения концентрации взвешенных форм марганца, образованных в процессе бактериального окисления. Образующийся слой повышенной мутности является своего рода специфичным промежуточным бактериальным биотопом.

Предложенная объединенная схема геоэкологического мониторинга для российского сектора Юго-Восточной Балтики позволяет более точно изучить процессы, связанные с развитием сероводородного заражения в глубоководных впадинах моря, хозяйственной деятельностью на западном побережье и выносом Вислинского залива и р. Вислы. Проведенные исследования позволили наметить дальнейшие направления работы, которые включают изучение трансформации взвешенного вещества в береговой зоне, в том числе процесс биоминерального агрегирования, и исследования формирования специфического придонного или промежуточного бактериального биотопа, образующегося в нефелоидном слое на границе окислительных и восстановительных условий.

Список литературы.

1. Alikas, K., Kratzer, S., Reinart, A., Kauer, T., Paavel, B. Robust remote sensing algorithms to derive the diffuse attenuation coefficient for lakes and coastal waters // *Limnol. Oceanogr. Methods*. 2015. Vol. 13. P. 402–415. doi: 10.1002/lom3.10033
2. Andersen J. H., Carstensen J., Conley D., Dromph K., Fleming-Lehtinen V., Gustafsson B.G., Josefson A.B., Norkko A., Villnäs A., Murray C.. Long-term temporal and spatial trends in eutrophication status of the Baltic Sea // *Biol Review*. 2017. Vol. 92. P. 135–149.
3. Atlas of the Baltic Sea. HELCOM. 2010. 192 pp.
4. Bishop J. K. B., Edmond J. M. A new large volume filtration system for sampling of oceanic particulate matter // *J. Marine Research*. 1976. Vol. 34, P. 181–198.
5. Brewer P.G., Spenser D.W. Distribution on some trace elements in Black Sea and their flux between dissolved and particulate phases // *The Black Sea: Geology, Chemistry and Biology*. Tulsa: Okla, 1974. P. 137–143.
6. Bukanova T., Kopelevich O., Vazyulya S., Bubnova E., Sahling, I. Suspended matter distribution in the south-eastern Baltic Sea from satellite and in situ data // *International Journal of Remote Sensing*, 2018. P. 1–22. doi:10.1080/01431161.2018.1519290
7. Carstensen J., Andersen J.H., Gustafsson Bo G, Conley D.J Deoxygenation of the Baltic Sea during the last century. *PNAS*, 2014, 111 (15), 5628-5633; first published March 31, 2014 <https://doi.org/10.1073/pnas.1323156111>
8. Chebboa, G., Gromaire, M.C. The experimental urban catchment ‘Le Marais’ in Paris: what lessons can be learned from it? // *J. Hydrology*. 2004. Vol. 299. P.312–323.
9. Cyberska B., Krzyminski W. Extension of the Vistula water in the gulf of Gdansk//*Proc. 16th Conf. of the Baltic Oceanographers*. Kiel, 1988. P. 89.
10. Downing J (2006) Twenty-five years with OBS sensors: the good, the bad, and the ugly // *Continental Shelf Research*. 2006. Vol. 26. P. 2299–2318
11. Elken J. Deep water overflow, circulation and vertical exchange in the Baltic Proper //*Report Series № 6*. Estonian Marine Institute. 1996. 91 p
12. Emelyanov E.M. Geochemistry of suspended matter and bottom sediments of the Gdansk Basin and processes of sedimentation // *Geology of the Gdansk Basin. Baltic Sea, Kaliningrad: Yantarnyskaz*, 2002. P. 220–302.

13. Finni T, Kononen K, Olsonen R, Wallstrom K. The history of cyanobacterial blooms in the Baltic Sea // *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. 2001. Vol. 30(4). P. 172–179.
14. Fleming-Lehtinen, V., and Laamanen, M. Long-term changes in Secchi depth and the role of phytoplankton in explaining light attenuation in the Baltic Sea // *Estuarine Coastal Shelf Science*. 2012. Vol.102. P. 1–10. doi: 10.1016/j.ecss.2012.02.015
15. Frank R. Spellman. *Water and Wastewater Treatment Plant Operations*. CRC: Press Taylor & Francis Group, 2014 P. 874
16. Galkus A. Thindispersed Sedimentary Matter of the Curonian Lagoon and Impact on the Baltic Sea of its Flowing Out. // *Geography in Lithuania*. Special issue for the 28th International Geographical Congress on "Land, Sea and Human Effort". Vilnius. 1996. P. 55–67.
17. Gippel C.J. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams // *Hydrological Processes*. 1995. Vol. 9. P. 83–97
18. Gogoberidze G., Abramov V., Ershova A. et al. The Concept and Methodology of Integrated Assessment of Coastal Systems and Coastal Infrastructure Sustainability // *Proceedings of 17th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference SGEM 2017*. Vol. 17(52). P. 951–958.
19. Gogoberidze G.G., Mamaeva M.A., Matyushkova A.G. Analysis of opportunities for economic development of the coastal territories of Aniva bay in Sakhalin region based on the cadastral approach // *National Interests: Priorities and Security*. 2011. Vol. 41. P. 14–21.
20. Gustafsson, B.G., Schenk, F., Blenckner, T., Eilola, K., Meier, H.E.M., Müller-Karulis, B., Neumann, T., Ruoho-Airola, T., Savchuk, O.P., Zorita, E. Reconstructing the development of Baltic Sea eutrophication 1850–2006 // *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. 2012. Vol. 41. P. 534–548.
21. Hakanson L., Bryhn A.C. *Eutrophication in the Baltic Sea. Present situation, nutrient transport process, remedial strategies*. Springer, 2008. 264 pp.
22. Harvey, T. *Bio-optics, Satellite Remote Sensing and Baltic Sea Ecosystems: Applications for Monitoring and Management* // Doctoral dissertation. 2015. Sweden, Stockholm University. Available online at: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A849120&dswid=3680> (Accessed December 20, 2018).

23. HELCOM. Eutrophication status of the Baltic Sea 2007-2011. A concise thematic assessment. *Baltic Sea Environment Proceedings*. 2014. Vol. 143. 41 p.
24. HELCOM. Sources and pathways of nutrients to the Baltic Sea. *Baltic Sea Environment Proceedings*. 2018. Vol. 153.
25. HELCOM. State of the Baltic Sea—Second HELCOM holistic assessment 2011-2016. 2018. URL: www.helcom.fi/baltic-sea-trends/holistic-assessments/state-of-the-baltic-sea-2018/reports-and-materials (дата обращения 31.05.2019)
26. Hildebrand-Habel T., Willems H.. New calcareous dinoflagellates (Calciodinelloideae) from the Middle Coniacian to Upper Santonian chalks of Lägerdorf (northern Germany) // *Journal of Micropalaeontology*. 2014. Vol. 23. P. 181-190. <https://doi.org/10.1144/jm.23.2.181>
27. Hornsburgh, J.S., Jones, A.S., Stevens, D.K., Tarboton, D.G., Mesner, N.O. A sensor network for high frequency estimation of water quality constituent fluxes using surrogates // *Environmental Modelling & Software*. 2010. Vol. 25. P. 1031–1044
28. Jonasz M. The particle size distribution in the Baltic // *Proceedings of the XIII Conference of Baltic oceanographers*. Helsinki. 1982. Vol.2. P. 402–429.
29. Jonasz M., Zalewski M.S. Stability of the shape of particle size distribution in the Baltic // *Tellus*. 1978. Vol. 30(6). P. 569–579.
30. Jones, S. A., Stevens, D.K., Horsburgh, J.S., Mesner, N.O.. Surrogate measures for providing high frequency estimates of total suspended solids and total phosphorus concentrations // *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 2011. Vol. 47 (2). P. 239–253
31. Kahru M, Elmgren R. Multidecadal time series of satellite-detected accumulations of cyanobacteria in the Baltic Sea // *Biogeosciences*. 2014. Vol. 11. P. 3619–3633.
32. Kahru M., Savchuk O.P., Elmgren R. Satellite measurements of cyanobacterial bloom frequency in the Baltic Sea: interannual and spatial variability // *Marine ecology progress series*. 2007. Vol. 343. P. 15–23.
33. Kirchner, J.W., Austin, C.M., Myers, A., Dyan, C. Whyte quantifying remediation effectiveness under variable external forcing using contaminant rating curves // *Environmental science & technology*. 2011. Vol. 45. P. 7874–8788.

34. Koponen, S., Attila, J., Pulliainen, J., Kallio, K., Pyhälä, T., Lindfors, A. A case study of airborne and satellite remote sensing of a spring bloom event in the Gulf of Finland // *Continental Shelf Research*. 2007. Vol. 27. P. 228–244. doi: 10.1016/j.csr.2006.10.006
35. Kostka, J., Nealson K. H. Isolation, cultivation and characterization of iron- and manganese-reducing bacteria // *Techniques in microbial ecology* / R. S. Burlage, R. Atlas, D. Stahl, G. Geesey, and G. Sayler (ed.). New York: Oxford University Press, 1998. P. 58-78
36. Kowalczyk, P., Olszewski, J., Darecki, M., Kaczmarek, S. Empirical relationships between coloured dissolved organic matter (CDOM) absorption and apparent optical properties in Baltic Sea waters // *International Journal of Remote Sensing*. 2005. Vol. 26. P. 345–370. doi: 10.1080/01431160410001720270
37. Krek A., Krechik V., Danchenkov A. and Krek E. Pollution of the sediments of the coastal zone of the Sambia Peninsula and the Curonian Spit (Southeastern Baltic Sea) // *PeerJ*. 2018. 6:e4770
38. Krek A., Stont Zh., Ulyanova M. Alongshore bed load transport in the southeastern part of the Baltic Sea under changing hydrometeorological conditions: Recent decadal data // *Regional Studies in Marine Science*, 2016, pp. 81-87. DOI: 10.1016/j.rsma.2016.05.011
39. Krek A., Ulyanova M., Koschavets S. Influence of land-based Kaliningrad (Primorsky) amber mining on coastal zone // *Marine Pollution Bulletin*. 2018. Vol. 131(Pt A). P.1-9.
40. Kyryliuk, D. and Kratzer, S. Summer distribution of total suspended matter across the Baltic Sea // *Frontiers in Marine Science*. 2018. Vol. 5, p.504.
41. Laakkonen, S. and Laurila, S. (2007). Changing environments or shifting paradigms? Strategic decision making toward water protection in Helsinki 1850–2000 // *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. 2007. Vol. 36. P. 212–219.
42. Levine, Ira N. *Physical Chemistry* (5th ed.). Boston: McGraw-Hill, 2001. p. 955.
43. McCave I.N. Particulate size spectra, behavior, and origin of nepheloid layers over the Nova Scotian continental rise // *Journal of Geophysical Research*. 1983, Vol. 88(12). P. 7647–7666.
44. McCave I.N. Size spectra and aggregation of suspended particles in the deep ocean // *Deep-Sea Research*. 1984, Vol. 31(4). P. 329–352.

45. Meier H.E.M. Modelling of the pathways and ages of inflowing salt- and freshwater in the Baltic Sea // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2007. Vol. 74(4). P. 610–627
46. Meyer T., Wania F. Organic contaminant amplification during snowmelt // *Water research*. 2008. Vol. 42(8-9). P. 1847–1865.
47. Meyer, T., Lei, Y.D., Wania, F.. Transport of polycyclic aromatic hydrocarbons and pesticide during snowmelt within an urban watershed // *Water research*. 2011. Vol. 45(3). P. 1147–1156.
48. Mohrholz V., Naumann M., Nausch G., Krüger S., Gräwe U. Fresh oxygen for the Baltic Sea. An exceptional saline inflow after a decade of stagnation// *J. Mar. Syst.* 2015. Vol. 148. P. 152–166.
49. Mohrholz, V. Major Baltic Inflow statistics-revised // *Frontiers in Marine Science*. 2018. Vol. 5. p.384.
50. Murray, S. P. Settling velocities and vertical diffusion of particles in turbulent water // *Journal of Geophysical Research*. 1970. Vol. 75(9), 1647–1654. doi:10.1029/jc075i009p01647
51. Naumann M., Mohrholz V. and Waniek J., 2018. Water exchange between the Baltic Sea and the North Sea, and conditions in the deep basins. HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheets. 2018. URL: <http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/hydrography/water-exchange-between-the-baltic-sea-and-the-north-sea-and-conditions-in-the-deep-basins>. [Дата обращения 07.01.2019]
52. Naumann M., Mohrholz V., Nausch G. Baltic inflow of December 2014. The Leibniz Institute for Baltic Sea Research. URL: <http://www.iowarnemuende.de/baltic-inflow-of-december-2014.html> [дата обращения: 10.04.2018]
53. Ohde, T., Siegel, H., Gerth, M. Validation of MERIS Level-2 products in the Baltic Sea, the Namibian coastal area and the Atlantic Ocean // *International Journal of Remote Sensing*. 2007. Vol. 28. P. 609–624. doi: 10.1080/01431160600972961
54. Quesada, S., Tena, A., Guillena, D., Ginebreda, A., Vericat, D., Martínez, E.. Dynamics of suspended sediment borne persistent organic pollutants in a large regulated Mediterranean river (Ebro, NE Spain) // *Science of the Total Environment*. 2014. Vol. 473. P. 381–390

55. Raag L., Sipelgas L., Uiboupin R. Analysis of natural background and dredging-induced changes in TSM concentration from MERIS images near commercial harbors in the Estonian coastal sea// *Int. Journal of Remote Sensing*. 2014. Vol. 35. P. 6764–6780. doi: 10.1080/01431161.2014.963898
56. Rak D., Wieczorek P.. Variability of temperature and salinity over the last decade in selected regions of the southern Baltic Sea // *Oceanologia*. 2012. Vol. 54(3). P. 339-354.
57. Rügner, H., Schwientek, M., Beckingham, B., Kuch, B., Grathwohl, P.. Turbidity as a proxy for total suspended solids (TSS) and particle facilitated transport in catchments // *Environmental and Earth Sciences*. 2013. Vol. 69(2). P. 373–380
58. Rügner, H., Schwientek, M., Egner, M., Grathwohl, P., 2014. Monitoring of eventbased mobilization of hydrophobic pollutants in rivers: calibration of turbidity as a proxy for particle facilitated transport in field and laboratory // *Science of the Total Environment*. 214. Vol. 490. P. 191–198.
59. Schlitzer R., *Ocean Data View*. 2018. URL: odv.awi.de.
60. Schramm L. *Dictionary of Nanotechnology, Colloid and Interface Science*. USA: Wiley, 2008. 298 p.
61. Schwarz, K., Gocht, T., Grathwohl, P. Transport of polycyclic aromatic hydrocarbons in highly vulnerable karst systems // *Environmental Pollution*. 2011. Vol. 159. P. 133–139
62. Schwientek, M., Rügner, H., Beckingham, B., Kuch, B., Grathwohl, P. Integrated monitoring of transport of persistent organic pollutants in contrasting catchments // *Environmental Pollution*. 2013. Vol. 172. P. 155–162.
63. Sivkov V., Emeis K.-Ch., Endler R., Zhurov Yu., Kuleshov A.. Observations of the nepheloid layers in the Gotland Deep (August 1994) // *Meereswissenschaftliche Berichte. IOW*. 1998. Vol. 34. P. 84–91.
64. Slaets, J., Schmitter, P., Hilger, T., Lamers, M., Piepho, H., Duc Vien, T., Cadisch, G.. A turbidity based method to continuously monitor sediment, carbon and nitrogen flows in mountainous watersheds // *Journal of Hydrology*. 2014. Vol. 513. P. 45–57.
65. *State and Evolution of the Baltic Sea, 1952–2005. A Detailed 50-Year Survey of Meteorology and Climate, Physics, Chemistry, Biology, and Marine Environment* / Editors: R. Feistel, G. Nausch, N. Wasmund. 2008. 712 p.

66. Thamm R., Schernewski G., Wasmund N., Neumann T. Spatial phytoplankton pattern in the Baltic Sea. *Coastline Reports // Baltic Sea Typology*. 2004. Vol. 4. P. 85–109.
67. Toming, K., Arst, H., Paavel, B., Laas, A., and Nõges, T. Spatial and temporal variations in coloured dissolved organic matter in large and shallow Estonian waterbodies // *Boreal Environmental Research*. 2009. Vol. 14. P. 959–970.
68. Toming, K., Kutser, T., Uiboupin, R., Arikas, A., Vahter, K., and Paavel, B. (2017). Mapping water quality parameters with Sentinel-3 Ocean and Land Colour Instrument imagery in the Baltic Sea // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9. P. 1070. doi: 10.3390/rs9101070
69. Vaiciute, D., Bresciani, M., and Bucas, M.. Validation of MERIS bio-optical ~ products with in situ data in the turbid Lithuanian Baltic Sea coastal waters // *Journal of Applied Remote Sensing*. 2012. Vol. 6. P. 63568–63561. doi: 10.1117/1.JRS.6.063568
70. Vazyulya, S., Khrapko, A., Kopelevich, O., Burenkov, V., Eremina, T., and Isaev, A.. Regional algorithms for the estimation of chlorophyll and suspended matter concentration in the Gulf of Finland from MODIS-Aqua satellite data // *Oceanologia*. 2014. Vol. 56. P. 737–756. doi: 10.5697/oc.56-4.737
71. Wasmund, N., Andrushaitis, A., Łysiak-Pastuszek, E., Müller-Karulis, B., Nausch, G., Neumann, T.. Trophic status of the south-eastern Baltic Sea: a comparison of coastal and open areas // *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 2001. Vol. 53. P. 849–864. doi: 10.1006/ecss.2001.0828
72. Wozniak, S. B., Meler, J., Lednicka, B., Zdun, A., Ston-Egiert, J. Inherent optical properties of suspended particulate matter in the southern Baltic Sea // *Oceanologia*. 2011. Vol. 53. P. 691–729. doi: 10.5697/oc.53-3.691
73. Yücel, M., Sommer, S., Dale, A.W., Pfannkuche, O.. Microbial sulfide filter along a benthic redox gradient in the Eastern Gotland Basin, Baltic Sea // *Frontiers in microbiology*. 2017. Vol. 8. pp.169.
74. Zillén, L., Conley, D.J., Andrén, T., Andrén, E., Björck, S.. Past occurrences of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact // *Earth-Science Reviews*. 2008. Vol. 91. P. 77–92. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.10.001>.
75. Айбулатов Н. А., Жиндарев Л. А., Пискарева М. А. Особенности режима и вещественного состава взвешенных наносов в береговой зоне моря в условиях дефицита осадочного материала // *Водные ресурсы*. 1984. № 2. С. 62–68.

76. Айзатуллин Т.А., Лебедев В.Л., Суетова И.А., Хайлов К.М. Граничные поверхности и география океана // Вестник МГУ. Серия географическая. 1976. № 5. С. 25-35.
77. Анцыферов С.М. Методика определения концентрации взвешенных наносов в верхней части шельфа. М.: Изд. Ин-та океанологии, 1987. 64 с.
78. Анцыферов С.М., Косьян Р.Д. Исследование движения взвешенного обломочного материала в верхней части шельфа мористее зоны валов // Океанология. 1977. Т. 17, вып. 3. С. 497-505.
79. Аракелов М.С., Ахсалба А.К., Гогоберидзе Г.Г., Долгова-Шхалахова А.В., Жиба Р.Ю., Яйли Е.А. К вопросу анализа геоморфологического и геоэкологического состояния и оценки природных и антропогенных рисков снижения устойчивости береговых систем восточной части Черного моря // Успехи современного естествознания. 2018. Т. 12, вып. 2. С. 333–338.
80. 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. 2003. 273 с.
81. Блажчишин А. И. Баланс осадочного материала в Гданьском бассейне Балтийского моря // Литология и полезные ископаемые. 1984. №. 5. С. 67-76.
82. Блажчишин А.И., Бабаков А.Н., Чечко В.А. Концентрация и состав взвешенных наносов Калининградского взморья // Проблемы изучения и охраны Куршской косы. Калининград: Изд-во КГУ, 1998. С. 31–58.
83. Бобыкина, В.П., Болдырев В.Л. Тенденция развития берегов Калининградской области по пятилетним данным мониторинга // Ученые записки Русского географического общества (Калининградское отделение). Т. 7, вып. 1. 2008
84. Бойнагрян В.Р. Динамика и морфология Самбийского полуострова // Океанология. 1966. Т. 6, вып. 3. С. 458-465.
85. Болдырев В.Л., Рябкова О.И. Динамика береговых процессов на Калининградском побережье Балтийского моря // Изв. ВГО. Т. 133, вып. 5. 2001. С. 41–49.
86. Бугров Л.Ю., Еремина Т.Р., Молчанов М.А., Рябченко В.А., Бугров И.Л., Коханюк Е.В. Перспективы и риски развития морской аквакультуры в Балтийском регионе в связи с изменениями климата. В сборнике: Водные биоресурсы, аквакультура

и экология водоемов, труды всероссийской научной конференции, Калининград, 23–24 мая 2017 г. / гл. редактор Тылик К.В. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2017. С. 102–107.

87. Буканова Т.В., Вазюля С.В., Копелевич О.В. и др. Региональные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла и взеси в Юго-Восточной Балтике по данным спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного исследования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 2. С. 64–73.

88. Буренков В.И., Гольдин Ю.А., Кравчишина М.Д.. Распределение концентрации взеси в Карском море в сентябре 2007 г. по судовым и спутниковым данным // Океанология. 2010. Т. 50, вып. 5. С.842–849.

89. Викторов С.В., Кильдюшевский Е.И., Кирсанов А.А. Дополнение к Программе на выполнение работ по теме «Создание опытной модели дистанционной основы Госгеолкарты–200 по материалам космических съемок на площади объектов ГДП–200, финансируемых СЗРГЦ». Отчет ВНИИКАМ ФУГП «Аэрогеология» Министерства природных ресурсов РФ, 1999. 95 с.

90. Владимирова О.М., Еремина Т.Р., Исаев А.В., Рябченко В.А., Савчук О.П. Моделирование растворенного органического вещества в Финском заливе // В книге: Моря России: методы, средства и результаты исследований. 2018. С. 33. Моря России: методы, средства и результаты исследований: тезисы докладов всероссийской научной конференции, Севастополь, 24–28 сентября 2018 г. Севастополь: Изд-во ФГБУН МГИ, 2018. 316 с.

91. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том III Балтийское море. Выпуск I. Гидрометеорологические условия, ред. Ф.С. Терзиев, В.А. Рожков, А.И. Смирнов. Санкт-Петербург. Гидрометеиздат, 1992. 449 с.

92. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том III Балтийское море. Выпуск II. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности, ред. Ф.С. Терзиев, В.А. Рожков, Е.Я. Римш, И.М. Шпаер. Санкт-Петербург. Гидрометеиздат, 1994. 435 с.

93. Дубравин В. Ф., Голенко Н. Н., Горбацкий В., Сивков В. В. Гидрологические условия // Нефть и окружающая среда Калининградской области. - Калининград: Терра Балтика. 2012. Т. II. Море. С. 263–276.

94. Евтушенко, Н. В., С. В. Шеберстов. Использование данных спутникового сканера MODIS-Aqua для исследования циклов цветения фитопланктона в Балтийском море // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 3. С. 114–124.
95. Емельянов Е. М. Геохимические барьеры и барьерные зоны и их роль в седиментогенезе // Геохимия осадочного процесса в Балтийском море. М.: Наука, 1986. С. 5–24.
96. Емельянов Е. М. Количественное распределение морской взвеси у побережья Самбийского полуострова Куршской косы (Балтийское море) // Океанологические исследования. 1968. №. 18. С. 203–213.
97. Емельянов Е. М., Пустельников О. С. Взвешенное вещество, его состав и баланс осадочного материала в водах Балтийского моря // Геология Балтийского моря/Под ред. В. Гуделиса, ЕМ Емельянова. Вильнюс: Мокслас. 1976. С. 159–186.
98. Емельянов Е.М. Седиментогенез в бассейне Атлантического океана. М.: Наука, 1982. 190 с.
99. Емельянов Е.М., Гриценко В.А. Придонная циркуляция в Гданьской впадине Балтийского моря: донные осадки и динамика затоков североморских вод // Океанология. 2004. Т. 44, № 2. С. 283–295.
100. Емельянов Е.М., Стрюк В.Л., Тримонис Э.С. Распределение взвеси в Гданьском бассейне // Геохимия осадочного процесса в Балтийском море. М.: Наука, 1986. С. 45–57.
101. Емельянов Е.М., Стрюк В.Л., Тримонис Э.С., Пенхажевский К., Пенхажевская Э. Количественное распределение взвеси и некоторых микроэлементов в водах Гданьского бассейна // Процессы осадконакопления в Гданьском бассейне (Балтийское море). М.: Изд-во ИО АН СССР, 1987. С. 66–95.
102. Емельянов Е.М.. Барьерные зоны в океане. Калининград: Изд-во Янтарный сказ, 1998. с. 416.
103. Еремина Т.Р., Бугров Л. Ю., Максимов А. А., Рябченко В. А., Шилин М. Б. Воздействие изменения климата на морские природные системы // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Москва: Росгидромет, 2014. С. 615–643

104. Ершова А.А., Вицентий А.В., Гогоберидзе Г.Г., Шишаев М.Г., Ломов П.А. Морское пространственное планирование: возможности для приморских территорий и прилегающих акваторий Мурманской области // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2018. Т. 14, № 2. С. 269–287. <https://doi.org/10.24891/ni.14.2.269>
105. Израэль Ю.А. Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка изменений состояния окружающей природной среды. Основы мониторинга. // Метеорология и гидрология. 1974. №7. С. 3–8.
106. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. М.: "Гидрометеиздат", 1984. 560 с.
107. Израэль, Ю.А.; Цыбань, А.В. Антропогенная экология океана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 528 с.
108. Исследование экосистемы Балтийского моря / под ред. А.В. Цыбань. Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. Вып. 2. 258 с.
109. Кожахметов А.Б., Лащенко В.М. Предварительные итоги определения фоновой мутности на участке намыва свободных песчаных наносов пляжей у северного побережья Самбийского полуострова // Проблемы геоморфологии и четвертичной геологии шельфовых морей, Калининград: изд-во КГУ, 1989. С.96–99.
110. Копелевич О.В., Вазюля С.В., Шеберстов С.В., Буканова Т.В. Взвешенное вещество в поверхностном слое вод Юго-Восточной Балтики по спутниковым данным // Океанология/ 2016, Т. 56, № 1. С. 51–59. [doi:10.7868/S0030157416010068](https://doi.org/10.7868/S0030157416010068)
111. Копелевич О.В., Вазюля С.В., Шеберстов С.В., Буканова Т.В. Региональные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла и взвеси в Юго-Восточной Балтике по данным спутниковых сканеров цвета // Океанология. 2016. Т. 56, № 1. С. 51–59.
112. Кречик В.А., Капустина М.В., Бубнова Е.С., Гриценко В.А. Абиотические условия придонных вод Гданьской впадины Балтийского моря в 2016 году // Ученые записки РГГМУ. № 48. С.186–194.
113. Кудрявцева Е.А. Первичная продукция фитопланктона // Система Балтийского моря / Ред. Лисицын А.П. и др. М.: Научный мир, 2017. С. 214–241.
114. Лебедев В.Л. Граничные поверхности в океане. М., Изд-во МГУ, 1986. 192 с.

115. Лисицын А.П. Гранулометрический состав взвеси и донных осадков морей и океанов // Гранулометрический анализ в геологии. М.: Изд-во ГИН АН СССР, 1978а. С. 106–146.
116. Лисицын А.П. Зональность природной среды и осадкообразование в океанах // Климатическая зональность и осадкообразование. М., Наука, 1981. С. 5–45.
117. Лисицын А.П. Процессы океанской седиментации. М., Наука, 1978б, 392 с.
118. Лисицын, А.П., Клювиткин, А.А., Буренков, В.И., Кравчишина, М.Д., Политова, Н.В., Новигатский, А.Н., Шевченко, В.П., Клювиткина, Т.С.. Распределение и состав взвешенного осадочного вещества на меридиональных разрезах в Атлантическом океане: прямые определения и спутниковые данные // Доклады Академии наук. 2016. Т. 466, №. 2, С. 221–221.
119. Лукашин В.Н., Кречик В.А., Бубнова Е.С., Стародымова Д.П., Клювиткин А.А. Взвесь в Балтийском море: распределение и химический состав // Океанологические исследования. 2018. Т. 46, № 2. С. 145–166
120. Медведева С А. Экология техносферы. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2011. 55 с.
121. Нефть и окружающая среда Калининградской области. Т. II. Море / под ред. Сивкова и др.. Калининград: Терра Балтика, 2012. 312 с.
122. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.
123. Опекунов А.Ю. Аквальный техноседиментогенез // Тр. ВНИИОкеангеологии Министерства природных ресурсов РФ. Т. 208. СПб.: наука, 2005. 278 с.
124. Очерки по биологической продуктивности Балтийского моря / Под. ред. Гершанович Д.Е. М.: Координационный центр СЭВ, 1984. 373 с.
125. Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа. М.: Изд-во ВНИРО, 2001. 247 с.
126. Прандке Х., Ланге Д., Бублиц Г., Стрюк В.Л. Связь взвешенного вещества с распределением гидрологических и оптических характеристик // Процессы осадконакопления в Гданьском бассейне (Балтийское море) / Отв. ред. Е.М. Емельянов и К. Выпых. М.: Изд-во АО ИО АН СССР, 1987, с. 95–98.

127. Рябченко В.А., Карлин Л.Н., Исаев А.В., Ванкевич Р.Е., Еремина Т.Р., Молчанов М.С., Савчук О.П. Модельные оценки эвтрофикации Балтийского моря в современном и будущем климате // *Океанология*. 2016. Т. 56, № 1. С. 41–50.
128. Сивков В. В. Водная взвесь // *Нефть и окружающая среда Калининградской области*. Калининград: Терра Балтика, 2012. Т. II. Море. С. 120–127.
129. Сивков В.В., Емельянов Е.М., Бубнова Е.С. Концентрация и гранулометрический состав взвеси // *Система Балтийского моря* /Ред. Лисицын А.П. и др. М.: Научный мир, 2017. С. 292–316.
130. Сивков В.В., Журов Ю.И. О специфике скоплений взвеси во впадинах Балтийского моря // *Океанология*. 1991. Т. 31, № 6. С. 1060–1066.
131. Степанова Н.Б., Чубаренко И.П., Щука С.А. Структура и эволюция холодного промежуточного слоя в юго-восточной части Балтийского моря по данным натурных измерений 2004-2008 гг. // *Океанология*. 2015. Т. 55, № 1. С. 32-43.
132. Суставов Ю.В. Общая характеристика основных факторов, формирующих изменчивость процессов Балтийского моря // *Проект "Балтика". Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря*. Вып. 2: *Изменчивость компонентов экосистемы и динамика вод*. Л., Гидрометеиздат, 1984. С. 42-46.
133. Тамбиев С.Б., Демина Л.Л. Опыт применения различных видов фильтров для фильтрации морских вод // *Океанология*. 1982, Т. XXII, № 1. С.137–142.
134. Технично-экономическое обоснование обустройства нефтяного месторождения Кравцовское (D-6) на Балтийском море. Том «Охрана окружающей среды». М.: НПФ «Экоцентр МТЭА», 1999.
135. Тищенко В.П. Дисперсные системы и загрязнение атмосферы и гидросферы. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2017. 203 с.
136. Тшосиньская А., Цыберская Б., Кшиминьский В. Гидрологический и гидрохимический режим // *Процессы осадконакопления в Гданьском бассейне (Балтийское море)* / Отв. ред.: Е.М. Емельянов, К. Выпых. М.: Изд-во. АН СССР, 1987. С. 30–57.
137. Чухров Ф. В., Горшков А. И., Дриц В. А. Гипергенные окислы марганца. Наука, 1989. 208 с.
138. Чухров Ф. В., Горшков А. И., Дриц В. А. О вернадите // *Изв. АН СССР Сер. геол.* 1978. № 6. С. 5—19.

Список публикаций

1. Bubnova E., Krechik V., Sivkov V. Suspended matter concentration alongside the northern coastline of Kaliningrad region (south-eastern part of the Baltic Sea) // EMECS'11 SeaCoasts XXVI. August 22-27, 2016, St. Petersburg, Russia. Joint conference. Managing risks to coastal regions and communities in a changing world. Abstract Book. P. 145.
2. Bubnova E., Sivkov V., Zubarevich V. On suspended matter grain size in Baltic Sea // European Geosciences Union General Assembly 2016. Vienna, Austria, 17–22 April 2016. Abstract book. EGU2016-940. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-940-1.pdf>
3. Кречик В.А., Капустина М.В., Бубнова Е.С., Гриценко В.А. Абиотические условия придонных вод Гданьской впадины Балтийского моря в 2016 году // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 48. С.186-194.
4. Бубнова Е.С., Кречик В.А. Придонные условия седиментации в юго-восточной части Балтийского моря. В сборнике: Комплексные исследования Мирового океана материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых. 2017. С. 449-450.
- 5 Alexandrov S. V., Krek A.V., Bubnova E.S., Danchenkov A.R. Eutrophication and effects of algal bloom in the Curonian Lagoon alongside the south-western part of the Curonian Spit (Russia) // Baltica. 2018. Vol. 1
6. Bukanova T., Kopelevich O., Vazyulya S., Bubnova E., Sahling I. Suspended matter distribution in the south-eastern Baltic Sea from satellite and in situ data // International Journal of Remote Sensing. 2018. Vol. 39. Issue 24: Remote Sensing of the Coastal Zone of the European Seas. P. 9317-9338
7. Навазова О.А., Бубнова Е.С. Распространение взвешенного осадочного вещества в прибрежной зоне Калининградской области. В сборнике: Береговая зона моря: исследования, управление, перспективы Сборник материалов Международной молодежной летней школы: научное электронное издание. Под редакцией В. А. Гриценко. 2018. С. 48-55.
8. Власова Т.Е., Бубнова Е.С. Распространение взвешенного осадочного вещества к северу от Калининградского полуострова // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2018. № 3. С. 55-62.

9. Лукашин В.Н., Кречик В.А., Бубнова Е.С., Стародымова Д.П., Клювиткин А.А. Взвесь в Балтийском море: распределение и химический состав. *Океанологические исследования*. 2018. Т. 46. № 2. С. 145-166.

10. Крек А.В., Ульянова М.О., Бубнова Е.С., Кречик В.А., Рябчук Д.В., Данченков А.Р., Чурин Д.А., Капустина М.В., Ткачева Е.С., Хатмуллина Л.И., Сергеев А.Ю. Геоэкологические условия в Балтийском море в 2017 г. // *Океанология*. 2019, том 59, № 1, с. 184–186. <https://doi.org/10.31857/S0030-157459184-186>

11. Sivkov V.V., Peive A.A., Bubnova E.S., Akhmedzyanov V.R., Krechik V.A., Sukhih E.A. Integrated Research during Cruise 33 of the R/V Akademik Nikolaj Strakhov // *Oceanology*, 2019, Vol. 59, No. 2, pp. 279–280.