

На правах рукописи

Кудрявцева Елена Андреевна

**РОЛЬ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ
ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА
ГДАНЬСКОГО БАССЕЙНА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ**

25.00.36 – геоэкология (науки о Земле)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Калининград — 2017

Работа выполнена в Атлантическом отделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук

Научный руководитель: **Сивков Вадим Валерьевич**
кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Шилин Михаил Борисович**
доктор географических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет», заведующий кафедрой экологии

Минеева Наталья Михайловна
доктор биологических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологии внутренних вод имени И.Д. Папанина Российской академии наук, лаборатория альгологии, главный научный сотрудник

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морских биологических исследований имени А.О. Ковалевского Российской академии наук**

Защита состоится 14 сентября 2017 г. в 15.30 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.084.09 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» по адресу: 236022, г. Калининград, ул. Зоологическая, д. 2, ауд. 121, e-mail: tikuznetsova@kantiana.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Балтийского федерального университета имени И. Канта (ул. Университетская, 2) и на сайте <http://www.kantiana.ru/postgraduate/dis-list/209201/>.

Автореферат разослан _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.г.н.

Кузнецова Татьяна Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Под первичной продукцией (ПП) понимают количество органических веществ, новообразованных из минеральных соединений за определенное время в ходе автотрофных процессов. Не менее половины ПП Земли создается в Мировом океане планктонными организмами, способными к фотосинтезу. Многократно используя в экосистеме, «первичная» энергия переходит с одного трофического уровня сообществ на другой, обеспечивая её функционирование и определяя продуктивность.

Особый интерес к исследованиям динамики и распределения ПП в Балтийском море связан с проблемой её роста вследствие интенсификации хозяйственной деятельности человека и увеличения поступления биогенных элементов с территории водосборного бассейна в 1960-1980-х гг., а также с негативными явлениями, сопряженными с этим увеличением. Существенное сокращение сбросов в море азота и фосфора большинством стран региона в 1990-х гг. не изменило ситуацию и не привело к ожидаемому снижению уровня ПП (HELCOM, 2014). Это связывают с длительным обновлением вод, высвобождением фосфора из бескислородных осадков, широким распространением азотфиксирующих синезеленых водорослей, ростом температуры воды и с глобальными изменениями климата.

Количественные оценки и данные о распределении ПП в российском секторе Гданьского бассейна Балтийского моря ранее отсутствовали. Поэтому такое исследование здесь является актуальной научной задачей и необходимо для понимания экологических и биохимических процессов, формирующих экосистему Балтийского моря.

Цель работы – выявить закономерности распределения ПП в российском секторе Гданьского бассейна Балтийского моря и определить наиболее важные геоэкологические факторы, формирующие эти закономерности.

В процессе достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Выявить сезонную изменчивость вертикального распределения и осредненных по слою максимума ПП продукционных характеристик фитопланктона.

2. Изучить среднемноголетние сезонные карты распределения абсолютных и удельных величин ПП фитопланктона.

3. Проследить временную изменчивость трофического статуса рассматриваемой акватории за период наблюдений и в голоцене.

Научная новизна. Предложены региональные алгоритмы: 1) определения толщины фотического слоя по глубине видимости диска Секки; 2) оценки пространственного распределения ПП на основании данных по температуре воды; 3) описания сезонной динамики ПП в столбе воды по концентрации хлорофилла «а». По среднемноголетним величинам ПП в верхнем 10-м слое выделены участки акватории, характеризующиеся разными природными (температура, соленость, глубина, рельеф и форма береговой линии) и антропогенными (концентрации основных биогенных элементов) факторами. Отмечена роль удельного содержания углерода в клетках фитопланктона в формировании первичной продукции. Показана возможность регионального применения результатов вычисления величин первичной палеопродукции фитопланктона по содержанию органического углерода (C_{org}) в донных осадках.

Защищаемые положения:

1. В российском секторе Гданьского бассейна Балтийского моря по данным измерений ПП *in situ* толщина фотического слоя незначительно изменяется в течение года, тогда как по данным гидрооптических наблюдений непрямым методом толщина слоя, в котором потенциально возможен фотосинтез, меняется кратно. Для корректировки определения нижней границы фотического слоя непрямым методом предложен региональный регрессионный алгоритм.

2. Повышенные величины ПП в теплый период года характерны для береговой зоны. Стимулирование фотосинтеза здесь связано с интенсивным перемешиванием и поступлением биогенных элементов с материковым

стоком с северного побережья Самбийского п-ва. Приток тепла с глубины и снижение мутности вод обуславливают относительное увеличение продукции фитопланктона зимой. Форма береговой линии и рельеф дна обуславливают неоднородности горизонтального распределения первичной ПП в береговой зоне. Температура является индикатором вод с разной продуктивностью фитопланктона.

3. Характер сезонных изменений ПП обусловлен изменчивостью концентраций нитратов в фотическом слое. Около четверти (21-27%) ежегодной величины ПП производится в период короткого весеннего максимума, достигающего пика в апреле, преимущественно динофлагеллятами. Около половины ежегодной величины ПП (43-49%) создается зелеными и синезелеными водорослями в период продолжительного летнего максимума, достигающего пика в июле и отмечающегося на месяц раньше, чем считалось.

4. Трофический статус рассматриваемой акватории ($237 \text{ гСм}^{-2}\text{год}^{-1}$) соответствует верхнему уровню, установленному для мезотрофных вод ($100\text{-}250 \text{ гСм}^{-2}\text{год}^{-1}$), не изменился за период наблюдений и находится в пределах естественных колебаний продуктивности Гданьского бассейна Балтийского моря на протяжении голоцена ($180\pm 121 \text{ гСм}^{-2}\text{год}^{-1}$).

Практическая значимость. Материалы диссертации могут быть использованы для информационного обеспечения морского природопользования в юго-восточной части Балтийского моря. В прибрежных районах, находящихся под сильным влиянием материкового стока, величины ПП служат индикатором антропогенного воздействия. Оценки ПП традиционно необходимы для определения промыслового потенциала и прогноза допустимого вылова рыб без ущерба для экосистемы. Также в диссертационной работе оптимизировано использование диска Секки для определения толщины фотического слоя в изучаемом районе.

Личный вклад автора. Проанализирован большой объем зарубежной и отечественной литературы по первичной продуктивности Балтийского моря и связанным с ней показателям функционирования экосистемы моря.

Выполнены измерения ПП, параметров бактериопланктона, относительной прозрачности воды, суммарной освещенности за день в 24 экспедициях на научно-исследовательских судах и большом количестве выходов на маломерных судах, проанализированы полученные данные и сделаны выводы.

Апробация работы. Материалы диссертации были представлены на международных и национальных конференциях: «Baltic Sea Science Congress 5, 6, 8» (Сопот, 2005; Ростов, 2007; Санкт-Петербург, 2010), «The Baltic Sea Geology 10» (Санкт-Петербург, 2010), «2nd Baltic Green Belt Forum» (Паланга, 2010), на Школах по морской геологии «Геология морей и океанов» (Москва, 2005, 2007, 2009, 2011, 2015), ECSA 42 «Estuarine ecosystems: structure, function and management» (Светлогорск – Калининград, 2007), «Комплексное управление, индикаторы развития, пространственное планирование и мониторинг прибрежных регионов юго-восточной Балтики» (Калининград, 2008), «Современные проблемы альгологии» (Ростов-на-Дону, 2008), 15-ая конференция по промысловой океанологии, посвященная 150-летию со дня рождения академика Н.М. Книповича (Калининград, 2011).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 26 работ, из них 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 3 раздела в монографиях, 5 статей в научных сборниках и 15 докладов в материалах международных и российских научных конференций.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 3 приложений, содержит 159 страниц текста, 56 рисунков и 26 таблиц. Список литературы включает 317 наименований, в том числе 102 отечественных, 215 на английском языке и 3 электронных ресурса.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и основные задачи исследования, раскрыта научная новизна,

практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1 разделе 1.1** дана общая схема распределения ПП в Мировом океане и охарактеризованы взаимосвязи ПП с условиями внешней среды. В **разделе 1.2** приведена краткая физико-географическая характеристика Балтийского моря и обзор научных исследований его ПП. **Раздел 1.3** посвящен Гданьскому бассейну, который является одним из наиболее эвтрофированных районов Балтийского моря.

В **Главе 2 раздел 2.1** указан район исследований и объем фактического материала.

В основу диссертации положены материалы сезонных исследований, проводившихся в российском секторе Гданьского бассейна Балтийского моря в 2003-2015 гг., главным образом, в рамках программы экологического мониторинга ООО «ЛУКОЙЛ-КМН» района расположения нефтедобывающей платформы D6 (рис. 1). Для детального изучения вертикального распределения и сезонного хода ПП в период с апреля 2008 г. по апрель 2009 г. были выполнены ежемесячные экспозиции проб *in situ* на поплавковой станции 24 (глубина 35 м, n=13). Согласно классификации, разработанной для Гданьского залива (Andrulewicz et al., 2004), район с глубинами от 20 до 40 м характеризуется поочередным влиянием прибрежных вод (район с глубинами до 20 м) и вод открытого моря (район с глубинами более 40 м). Дополнительные измерения ПП *in situ* выполнены в береговой зоне (n=1) и в наиболее мористой части акватории (n=3). В целом, в работе представлены результаты 372 станций, на которых измерено 1124 пробы ПП.

Для оценки первичной палеопродукции Гданьского бассейна в голоцене в 609 см части колонки донных осадков POS-3037007 отобрано 65 проб для определения C_{org} . Стратиграфическое расчленение колонки опиралось на литологическое описание данных гранулометрического, спорово-пыльцевого анализов и датировки по ^{14}C и ^{210}Pb (Григорьев и др., 2009). Колонка отобрана в центральной части Гданьской впадины (54°49,34' с.ш.; 19°11,1' в.д.)

сотрудниками ВСЕГЕИ. Также материал для исследования взят в 2 колонках: 45 проб в колонке ПШ-5483 (55°29,43' с.ш.; 19°30,90' в.д.) и 16 проб ПШ-5457 (55°13,99' с.ш.; 19°23,95' в.д.), отобранных в Гданьской впадине сотрудниками АО ИО РАН.

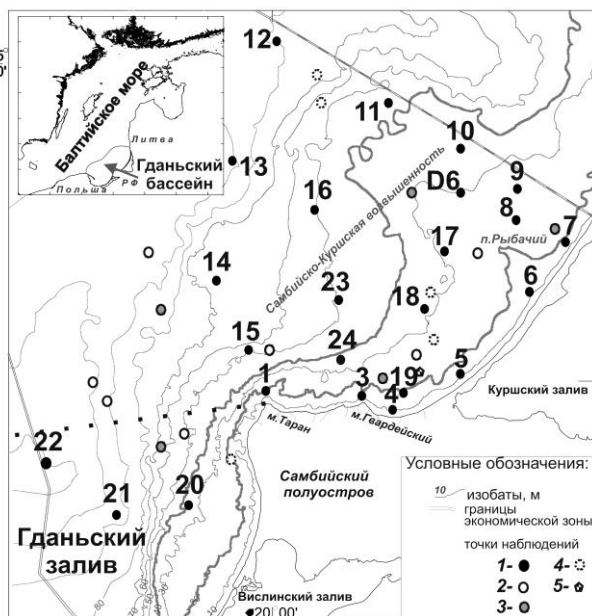


Рис.1 Расположение станций наблюдений в 2003-2015 гг.:

- 1 – станции экологического мониторинга нефтедобывающей платформы D6,
- 2 – точки наблюдений в 88 рейсе НИС «Профессор Штокман»,
- 3 – в 103 рейсе НИС «Профессор Штокман»,
- 4 – в рейсе МТРК «Ассаной»,
- 5 – в период съемки на «Норд-3»

В разделе 2.2 подробно описана методика измерения ПП с помощью радиоуглеродной модификации скляночного метода (Stemann Nielsen, 1952; Кудрявцева и др., 2011). Радиоактивность фильтров определена на сцинтилляционных счетчиках «Mark-2» и «Rackbeta» в ИГКЭ и ИНМИ РАН. При вычислении интенсивности фотосинтеза в пробах, которые инкубировались на палубе в проточном инкубаторе, использовали коэффициент K_c , учитывающий влияние ослабления света с глубиной на интенсивность фотосинтеза, и коэффициент K_v , учитывающий распределение фитопланктона в толще в воды (Кузнецов, Дубинина, 1989).

Методика вычисления первичной палеопродукции по содержанию C_{org} изложена в разделе 2.3. Содержание C_{org} определялось методом сухого сжигания с помощью экспресс-анализатора углерода «АН-7529» в АО ИО РАН (Люцарев, 1986). Величины первичной палеопродукции рассчитаны по формуле, предложенной в работе (Knies et al., 2008). Необходимые для

вычисления данные по палеоуровню моря позаимствованы из работ (Uscinowicz, 1999; Uscinowicz, Miotk-Szpiganowicz, 2003), данные по плотности осадка – из работы (Emelyanov, 2002).

Дополнительные методы наблюдений, результаты которых использованы в диссертации, описаны в **разделе 2.4**. Гидрофизические, гидрохимические, гидробиологические показатели определялись специалистами ИО РАН и АтлантНИРО, микробиологические – совместно с ИНМИ РАН (Hobbie et al., 1977; Методы..., 1978; Методика..., 1990).

Гидрооптические наблюдения ограничивались измерениями относительной прозрачности воды диском Секки (D, м). В 2006-2009 гг. наземный люксметр ТКА-ЛЮКС (диапазон измерений 400-700 нм) использовался для учета светового потока, пришедшего к поверхности моря в течение дня (Тооминг, Гуляев, 1967). Глубина фотической зоны рассчитывалась математически путем преобразования известного закона ослабления света в столбе воды Бугера-Ламберта с учетом поправки на альбедо 6%. Коэффициент экстинкции находили по эмпирическому соотношению $k=1,44/D$ (Holmes, 1970).

Регрессионный анализ применялся для поиска статистической взаимосвязи между различными показателями состояния морской среды (**раздел 2.5**).

Глава 3 посвящена анализу пространственного распределения ПП. В **разделе 3.1** рассматривается сезонный ход её вертикального распределения.

Наибольшие величины ПП зафиксированы в поверхностном слое в октябре 2006 г. на ст. 3 и в июле 2008 г. в точке ежемесячных измерений ПП *in situ* на ст. 24 (797 и 763 мгС·м⁻³·сут⁻¹). Здесь в верхнем 5-м слое в течение года создавалось около 71±12% ПП в столбе воды, а верхний 10-м слой заключал в себе 89±6% ПП в столбе воды. Наибольшая концентрация хлорофилла «а» (от 1,23 до 19,9 мг/м³) и основная биомасса фитопланктона (от 9 до 3804 мгС/м³) также отмечались в пределах верхнего 10-м слоя. Их профили, в основном, совпадали. Соответственно, наибольшие удельные скорости ПП относительно биомассы фитопланктона (0,1-2,4 сут⁻¹) и

суточные ассимиляционные числа (САЧ, $1,4-95 \text{ мгС} \cdot \text{мг} \cdot \text{Хл}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$) соответствовали верхнему 5-м слою «оптимального» фотосинтеза.

Нижняя граница фотического слоя в точке ежемесячных наблюдений в течение всего года находилась на стандартных горизонтах 15 или 20 м. На глубже лежащем горизонте 25 м фотосинтез не был зафиксирован.

Сезонный ход толщины фотического слоя по данным измерений ПП *in situ* отличался от сезонного хода расположения «световой» глубины, определяющей слой, в котором возможен фотосинтез, и соответствующей 1 или 0,1 % (Vollenweider, 1969; Anderson, 1969) проникающей в воду фотосинтетически активной радиации (ФАР). Кроме энергетических характеристик светового поля на толщину фотического оказывают влияние другие факторы. В частности, зимой создаются благоприятные оптические условия для фотосинтеза позволяющие свету проникать на большие глубины. Достаточным для этого уровень облученности становится в конце гидрологической зимы. Однако в первой половине марта 2009 г. фотосинтез фитопланктона фиксировался только в нестабильном верхнем 20-м слое, вовлеченном в конвективное перемешивание при температуре максимальной плотности воды ($2,4 \text{ }^\circ\text{C}$). В конце холодных зим в Балтийском море «the spring overturn» вызывает бурное развитие мелкоклеточных видов диатомовых водорослей (Wasmund et al., 1998). Наоборот, в периоды интенсивных «цветений» фитопланктона фотосинтез отмечался на глубинах с уровнем облученности, соответствующей $0,02 \pm 0,01\%$ солнечной радиации в диапазоне ФАР. При высоких скоростях ассимиляции в процессе перемешивания клетки фитопланктона опускаются на глубины с минимальными количествами света и некоторое время сохраняют жизнеспособность.

Связь между толщиной фотического слоя и данными диска Секки выражается через переходный коэффициент m , величины которого изменяются от 1 до 10, но чаще всего используется коэффициент 3, общий для мутных вод (Koenings et al., 1991; Padialet al., 2008). По данным поплавковой станции в зимние месяцы m -коэффициент был равен 1,5-2,1, наоборот, во время пиков «цветений» фитопланктона он составлял 5,7-6.

Отсюда следует, что применение любого фиксированного коэффициента для вычисления толщины фотического слоя приводит к переоценке или к недооценке смоделированных значений фотического слоя (Luhtala, Tolvanen, 2013). В отличие о фиксированных коэффициентов регрессионный алгоритм обеспечивает более качественную подгонку модели ко всему диапазону данных и позволяет подбирать переходный коэффициент для любых месяцев и участков изучаемого района:

$$m=6,76(\pm 0,39)-0,49(\pm 0,06)\cdot D \quad (1)$$

$$(R^2=0,83; n=16; SE=0,65; F=67; p=1\cdot 10^{-6}),$$

где D – глубина видимости диска Секки, m ; m – переходный коэффициент между относительной прозрачностью воды и толщиной фотического слоя.

В разделе 3.2 рассматривается горизонтальное распределение ПП в верхнем 10-м слое и его связь с гидрологическими и гидрохимическими условиями.

В конце зимы в береговой зоне наблюдаются минимальные величины ПП ($4,6\pm 4,3$ мгС·м⁻³·сут⁻¹) и скорость фотосинтеза ($0,04\pm 0,06$ сут⁻¹ и $0,69\pm 0,33$ мгС·мгХл⁻¹·сут⁻¹). В открытых морских районах продукция фитопланктона возрастает. Это связано с существенным снижением мутности воды и с увеличением её температуры вследствие притока тепла с глубины (Морозов и др., 2007). Наибольшие абсолютные ($4,9\pm 6,3$ мгС·м⁻³·сут⁻¹) и удельные величины ПП ($2,1\pm 2,3$ мгС·мгХл⁻¹·сут⁻¹ и $0,46\pm 0,54$ сут⁻¹) отмечаются в северо-восточной части исследуемого района над склоном п.Рыбачий и Самбийско-Куршской возвышенности. Турбулентное перемешивание в тени подводного поднятия, обусловленное интенсификацией течений вследствие перепада высот, стимулирует развитие диатомовых водорослей.

В зимний период наибольшие концентрации азота и фосфора ($8,26\pm 2,92$ и $0,88\pm 0,16$ мкг-ат/л) отмечаются в наименее соленых водах, примыкающих к плотно населенному северному побережью Самбийского п-ва. Приток биогенных элементов с побережья в другие сезоны менее выражен из-за интенсивного биологического потребления. Очевидно, что материковый сток является важным источником биогенных элементов для изучаемого района.

По сравнению с азотом фосфаты распределены относительно равномерно, что свидетельствует о преобладании процессов осенне-зимнего перемешивания в пополнении их запасов.

Весной в пределах дуги Самбийский п-ов – Куршская коса действует крупномасштабная система сходящихся течений, обусловленная наибольшей повторяемостью северных и северо-западных ветров (Бабаков, 2003). Воды с относительно повышенной ПП ($75 \pm 53 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$) и скоростью фотосинтеза ($0,30 \pm 0,42 \text{ сут}^{-1}$ и $30 \pm 24 \text{ мгС} \cdot \text{мгХл}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$) ориентированы по направлению господствующего переноса. На свале глубин у м.Таран и над северным склоном п.Рыбачий абсолютные ($29 \pm 18 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$) и удельные ($11 \pm 14 \text{ мгС} \cdot \text{мгХл}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$ и $0,12 \pm 0,12 \text{ сут}^{-1}$) величины ПП заметно снижаются, что совпадает со снижением среднемноголетней температуры верхнего 10-м слоя. Эти участки акватории прогреваются медленнее вследствие больших глубин и относительно часто возникающего апвеллинга (повторяемость до 20%), обусловленного преобладанием северных ветров (Lehmann et al., 2012). Подъем холодных вод приводит к увеличению ПП в зонах контакта относительно теплых обедненных биогенами вод района сочленения полуострова и косы и относительно холодных соленых обогащенных биогенами вод района м.Таран и п.Рыбачий.

Летом наибольшие величины ПП ($187 \pm 86 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$) и САЧ ($41 \pm 26 \text{ мгС} \cdot \text{мгХл}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$) наблюдаются в относительно теплых и пресных водах, примыкающих к северному побережью Самбийского п-ва. Несмотря на высокую биомассу фитопланктона и концентрацию хлорофилла в пределах всей береговой зоны, в районе п.Рыбачий отмечается снижение ПП ($144 \pm 73 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$) и скорости фотосинтеза ($30 \pm 22 \text{ мгС} \cdot \text{мгХл}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$). По-видимому, это обусловлено сразу несколькими причинами. Во-первых, район плато находится на удалении от источников биогенов на побережье Самбийского п-ва. Во-вторых, на интенсивность фотосинтеза неблагоприятно влияет ускорение вдольбереговых течений («эффект порога»), поскольку синезеленые и зеленые водоросли предпочитают спокойные воды. В-третьих, при благоприятной ситуации в районе плато возникает апвеллинг

(повторяемость до 10%), который оказывает негативное влияние на физиологическое состояние представителей пресноводного по происхождению комплекса видов, особенно интенсивно развивающихся в береговой зоне.

В условиях теплой осени высокие величины ПП ($165 \pm 110 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$) отмечаются в береговой зоне от основания Куршской косы до м.Таран. В условиях холодной осени величины ПП ($19 \pm 16 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$) близки к невысоким значениям, наблюдаемым на остальной части акватории. Для осеннего периода характерны наибольшие чистые скорости фотосинтеза, особенно в относительно теплой глубоководной части акватории ($0,74 \pm 1,01 \text{ сут}^{-1}$ и $25 \pm 49 \text{ мгС} \cdot \text{мгХл}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$).

На основании данных по среднемноголетнему распределению ПП в верхнем 10-м слое российский сектор Гданьского бассейна был разделен на пять подрайонов (рис. 2). В каждом из них были проанализированы среднемноголетние величины ПП и показателей состояния морской среды, а также корреляционные связи между ними. Сравнение с результатами подобного анализа для точек, сгруппированных по батиметрическому принципу, показало, что корреляционные связи между рассмотренными показателями в выделенных по распределению ПП географических районах значительно выше (табл. 1).

В районе сочленения Самбийского п-ва и Куршской косы благодаря вогнутой форме береговой линии возникает «эффект полузамкнутой бухты». Главным фактором, ограничивающим ПП в этом районе, является температура воды. Относительно замедленный водообмен препятствует выносу биомассы фитопланктона. Интенсивное перемешивание за счет небольших глубин и вихреобразование у основания Куршской косы способствуют более быстрому возвращению биогенов в фотический слой (Gurova, Chubarenko, 2012). Сток с плотно населенного северного побережья Самбийского п-ва и апвеллинг, в случае его возникновения в соседних районах, обуславливают дополнительный приток биогенов.

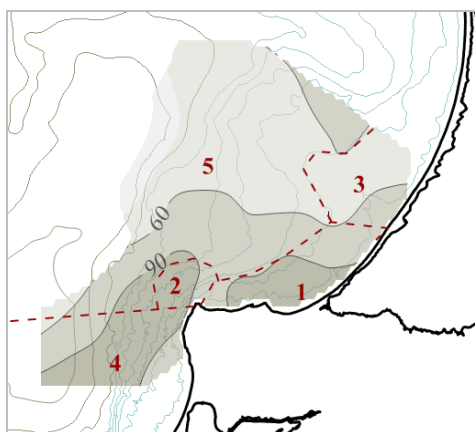


Рис. 2. Группировка станций по среднегодовым величинам ПП в верхнем 10-м слое ($\text{мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$):

- 1 – Самбийско-Куршская «бухта»,
- 2 – м.Таран,
- 3 – п.Рыбачий,
- 4 – Гданьский залив,
- 5 – открытое море

Табл.1. Корреляционная матрица ПП и показателей состояния морской среды

Показатель	Вся акватория	0-20 м	20-40 м	Более 40 м	Открытое море	Гданьский залив	м.Таран	п.Рыбачий	Самбийско-Куршский
температура	0,66	0,66	0,67	0,74	0,77	0,54	0,73	0,68	0,61
соленость	нк	нк	нк	нк	нк	нк	-0,50*	нк	нк
нитраты	нк	нк	-0,48	-0,52	-0,56	-0,58	нк	нк	нк
минеральный азот	нк	нк	нк	нк	нк	-0,48	нк	нк	нк
органический азот	нк	нк	нк	нк	нк	0,77	нк	нк	нк
фосфаты	нк	нк	нк	нк	-0,51	нк	нк	нк	нк
органический фосфор	нк	нк	нк	0,78	0,77	0,89	нк	нк	нк
хлорофилл «а»	нк	нк	нк	нк	0,49	нк	нк	нк	нк
биомасса фитопланктона	0,45	нк	нк	0,56	0,60	0,55	нк	нк	нк
биомасса зоопланктона	нк	нк	нк	нк	нк	нк	нк	нк	нк
биомасса бактерий	нк	нк	нк	нк	нк	нк	нк	нк	нк
продукция бактерий	0,50	нк	0,51	0,56	0,53	0,60	0,56	0,58	нк

Примечание: нк – нет корреляции, * нелинейный характер взаимосвязи

В районе м.Таран ПП находится в сильной зависимости от гидрометеорологической обстановки, что подтверждается сильной положительной связью ПП с температурой воды и высокой степенью взаимосвязи с соленостью, которая отмечается только в случае сильных градиентов, например, в устьях рек (Wielgat-Rychert et al., 2013). Под влиянием нагона относительно пресных и продуктивных вод с юга ПП возрастает. Наоборот, вследствие преобладания ветров, обуславливающих нагон относительно холодных и соленых вод открытого моря, или при сгонных ветрах, обуславливающих подъем холодных вод, соленость

увеличивается, а температура фотического слоя снижается. Это оказывает отрицательное действие на измеряемые величины ПП. После прекращения нагона интенсивность фотосинтеза снова увеличивается за счет увеличения температуры воды, а в период затухания апвеллинга также за счет поступления биогенных элементов.

Сочетание интенсивных течений вдоль западного побережья Самбийского п-ва, резкого разворота береговой линии и рельефа дна порождает в районе м.Таран зону повышенной вихревой активности (Бабаков, 2003). Прохождение синоптических вихрей вызывает локальные неоднородности характеристик фотического слоя и изменения уровня продуктивности вод (Виноградов, 2008). Наличие сравнительно короткоживущих неоднородностей определяет общий уровень продуктивности отдельных районов.

В *районе п.Рыбачий* ПП сдерживается, а на его склоне увеличивается вследствие прямого действия гидродинамического фактора («эффект порога»). Весной и летом «островной эффект» дает нефтедобывающая платформа. Повышение ПП вниз по течению от острова или подводной горы неоднократно сообщалось в работах, проведенных в разных районах Мирового океана (Сорокин, 1987; Завьялов и др., 2008).

Наиболее тесная положительная связь между температурой и ПП отмечается в *открытом море*, где верхний 10-м слой в теплый период года из-за больших глубин прогревается слабее, чем прибрежные мелководные участки. Вследствие удаления от источников биогенов, расположенных на суше, и с замедлением вертикального обмена распределение ПП существенно зависит от концентрации нитратов и фосфатов. Зависимость ПП от концентрации фосфатов проявляется в районе с глубинами более 40 м, тогда как зависимость от концентрации нитратов – в районе с глубинами более 20 м.

В *Гданьском заливе* значимой корреляции ПП с концентрацией фосфатов не установлено. В последние десятилетия отмечалось избыточное поступление фосфора по отношению к азоту (Łysiak-Pastuszak et al., 2004).

Обилие фосфора стимулирует фиксацию атмосферного азота, и этим, по-видимому, объясняется высокая степень корреляции ПП с органическим азотом в заливе. Наоборот, в открытых районах Гданьского бассейна, расположенных севернее залива, концентрация фосфатов ограничивает ПП, поэтому значимая связь между ПП и органическим азотом отсутствует. И поэтому в этих двух районах пространственные различия концентрации органического фосфора тесно связаны с ПП.

В наиболее удаленных от побережья открытых районах российского сектора Гданьского бассейна с продукцией фитопланктона тесно связаны его биомасса и концентрация хлорофилла «а». В районах с глубинами менее 40 м отсутствие корреляции ПП с концентрациями органических форм азота и фосфора, хлорофилла «а» и биомассой фитопланктона свидетельствует об их высоком содержании и небольших пространственных различиях наблюдаемых значений. Это следствие адвекции вод из соседних высокопродуктивных районов и высокой концентрации растворенного органического углерода в береговой зоне.

Важным результатом изучения и анализа распределения ПП в российском секторе Гданьского бассейна является выявление её тесной связи с температурой верхнего 10-м слоя, которая может служить индикатором вод с разной продуктивностью фитопланктона. Простая эмпирическая модель с достаточной для практических целей точностью передает связь между двумя показателями и вариабельность величин ПП:

$$\lg \text{ПП} = 1,44(\pm 0,05) \cdot \lg T + 0,25(\pm 0,06) \quad (2)$$
$$(R^2 = 0,66; F = 64,8; SE = 0,423; p = 2 \cdot 10^{-81}; n = 349),$$

где ПП – средняя в верхнем 10-м слое первичная продукция, $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$, T – средняя в верхнем 10-м слое температура, °C.

Можно предположить, что температура является самостоятельным фактором, влияющим на интенсивность фотосинтеза в периоды зимнего и ранневесеннего прогрева вод и в случае возникновения апвеллинга.

Глава 4 посвящена изучению разномасштабной временной изменчивости ПП.

Внутригодовые изменения продукции фитопланктона в российском секторе Гданьского бассейна рассмотрены в **разделе 4.1** на примере поплавковой станции (ст. 24). Они соответствуют типичной схеме сезонной динамики ПП мезотрофных морей и водоемов умеренных широт и описываются кривой с двумя максимумами. Первый, короткий весенний максимум ПП (21-27% ежегодной величины ПП в столбе воды) отмечается в апреле. Второй, более продолжительный летний максимум ПП (43-49% ежегодной величины ПП в столбе воды) отмечается с конца июня до сентября и достигает пика в июле, на месяц раньше, чем считалось (Renk, 1990; Kaszmarek et al., 1997).

Зимой в изучаемом районе отмечается недостаток азота относительно фосфора, что означает, что развитие фитопланктона потенциально лимитируется азотом. Это подтверждается достаточно тесной обратной корреляционной связью годового хода ПП и концентрации нитратов ($R^2=0,59$). Учет концентрации аммонийного азота вместе с концентрациями его окисленных форм характеризуется худшей корреляционной взаимосвязью ($R^2=0,42$).

Кривые, описывающие сезонные изменения ПП и концентрации хлорофилла «а» на поплавковой станции, в целом, совпадали, что обусловлено тесной взаимосвязью этих показателей. Поэтому внутригодовая динамика ПП в исследуемом районе может быть описана на основании концентрации хлорофилла «а»:

$$\text{ПП} = 163,94(\pm 16,92) \cdot \text{Хл} \llbracket \text{а} \rrbracket \quad (3)$$

$$(\text{R}^2=0,89; n=13; \text{SE}=486; \text{F}=94; p=1 \cdot 10^{-6}),$$

где Хл«а» – концентрация хлорофилла «а» в верхнем 10-м слое, мг/м³; ПП – искомая величина первичной продукции в столбе воды, мгС·м⁻²·сут⁻¹.

Однако из-за некоторого временного разрыва между максимумами ПП и концентрации хлорофилла «а» необходима коррекция полученных из уравнения величин ПП относительно её реальных значений *in situ*:

$$\text{ПП} = 0,76(\pm 0,15) \cdot \text{ПП}_{in\ situ} + 219,33(\pm 206,68) \quad (4)$$

$$(\text{R}^2=0,70; n=13; \text{SE}=502; \text{F}=26; p=3 \cdot 10^{-4}),$$

где $ПП_{in situ}$ – первичная продукция в столбе воды *in situ*, $мгС \cdot м^{-2} \cdot сут^{-1}$.

Сезонная динамика биомассы фитопланктона в верхнем 10-м слое существенно отличается от сезонной динамики концентрации хлорофилла «а» в том же слое ($R^2=0,36$). Это происходит из-за выедания водорослей зоопланктоном и изменений удельного содержания хлорофилла «а» в биомассе фитопланктона в течение года, которое, в целом, снижается от зимы к лету. Однако при неблагоприятных для развития водорослей условиях, таких как недостаток биогенных элементов в конце весны, удельное содержание хлорофилла «а» в биомассе фитопланктона возрастает. Кроме того, заметное влияние на него оказывает биомасса зеленых водорослей, содержащих наибольшее количество углерода в клетках по сравнению с остальными группировками фитопланктона (Menden-Deuer, Lessard, 2000). За период ежемесячных наблюдений между биомассой зеленых водорослей и удельным содержанием хлорофилла «а» выявлена достаточно тесная обратная связь ($R^2=0,72$).

На поплавковой станции зеленые водоросли (52 вида) имели наибольшее значение в видовом составе фитопланктона. Существенный вклад в видовое разнообразие вносили динофлагелляты (30 родов), диатомовые (28 видов) и синезеленые (18 видов) водоросли. Наименьшее число видов наблюдалось в апреле и в мае в условиях биогенного лимитирования ПП, в сентябре при существенном увеличении солености вследствие апвеллинга. Наибольшее число видов отмечалось в июне в конце весенне-летнего минимума ПП, во второй половине августа, в октябре и в декабре после штормов.

В исследуемом районе в период весеннего «цветения» главными продуцентами биомассы фитопланктона, по-видимому, являются динофлагелляты. В апреле 2008 и 2009 гг. в точке ежемесячных наблюдений они составляли 75-77 % общей биомассы фитопланктона. Динофлагелляты, предпочитающие стратификацию для начала интенсивной вегетации и способные к вертикальным миграциям в поисках биогенных элементов, в 1990-е гг. интенсивно развивались и абсолютно доминировали в биомассе фитопланктона юго-восточной части Балтийского моря (Wasmund et al.,

2017). Можно предположить, что доля динофлагеллят в общей биомассе фитопланктона оказывает существенное влияние на величину весеннего максимума ПП, поскольку в их клетках содержится в 2,9-3,6 раз больше углерода, чем в клетках диатомовых водорослей (Menden-Deuer, Lessard, 2000).

В разделе 4.2 по ежегодной величине ПП в столбе воды оценен трофический статус российского сектора Гданьского бассейна, рассмотрены его пространственные различия и межгодовые изменения.

Согласно трофической классификации Балтийского моря (Wasmund et al., 2001) по ежегодной величине ПП в столбе воды ($237 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$) изучаемый район соответствует верхнему уровню, установленному для мезотрофных вод ($100\text{-}250 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$). При этом к основанию Куршской косы и к густонаселенному северному побережью Самбийского п-ва примыкают воды, достигающие эвтрофного уровня ($250\text{-}450 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$). Развитие фитопланктона здесь стимулируется биогенными элементами, приносимыми стоком с материка. Значительная часть их пула имеет антропогенное происхождение. В район м.Гвардейский отведен канализационный коллектор городов, расположенных на побережье. В периоды весеннего половодья и паводков поставщиком биогенов являются сельскохозяйственные угодья на территории водосборного бассейна малых рек северного побережья Самбийского п-ва.

Межгодовые изменения ПП оценивались по наиболее полному ряду, полученному в июле, когда на фоне устойчивой стратификации вод в течение длительного времени отмечаются повышенные величины ПП, а её пространственное распределение характеризуется наибольшей однородностью. Статистически значимой тенденции к изменению ПП за время наблюдений выявить не удалось. Это справедливо также для многолетних изменений средней концентрации хлорофилла «а» в верхнем 10 м слое и концентрации поверхностного хлорофилла «а».

В начальный период наблюдений заметное увеличение зимних концентраций фосфатов в фотическом слое было вызвано особенно крупным

затоком 2003 г., после которого происходили небольшие затоки с меньшими эффектами. Вторая половина периода наблюдений отличалась пониженными зимними температурами воздуха (Стонт, 2014). Кроме того, в последние десятилетия для всего Балтийского моря, в т.ч. для исследуемого района, характерна тенденция к повышению температуры поверхности моря в весенне-осенний период (Voss et al., 2012). Поэтому после крупного затока постепенное снижение запасов фосфатов в верхнем слое нивелировалось увеличением глубины проникновения зимней конвекции во второй половине периода исследований и продолжающимся ростом температуры воды. Это способствовало сохранению ПП приблизительно на одном уровне в течение периода наблюдений.

Раздел 4.3. Результаты расчета показали хорошую сопоставимость величины ПП ($205 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$), определенную по содержанию $C_{\text{орг}}$ в донных осадках Гданьской впадины возрастом 29 лет, с уровнем ПП ($183\text{-}225 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$) в период, когда эти осадки были накоплены (Renk, 1993; Witket al., 1999). На данном этапе это дает возможность применения результатов вычисления ПП на основании содержания $C_{\text{орг}}$ в донных осадках для изучения палеопродуктивности Гданьского бассейна. Согласно выполненным вычислениям диапазон изменений ПП на протяжении голоцена составил $43\text{-}417 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ ($180 \pm 121 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$). Отсюда вытекает, что в современную постлиториновую стадию развития моря трофический статус исследуемой акватории находится в пределах его естественных колебаний, обусловленных природными факторами.

В **Заключении** выполнено краткое обобщение результатов, полученных в ходе исследований, и сделаны главные **выводы** проделанной работы:

1. В российском секторе Гданьского бассейна Балтийского моря слой «оптимального» фотосинтеза лежит в диапазоне глубин 0-5 м. В верхнем 10-м слое создается $89 \pm 6\%$ интегральной ПП. Толщина фотического слоя мало изменяется в течение года. Численное соотношение между глубиной видимости диска Секки и толщиной фотического слоя снижается с увеличением относительной прозрачности воды и, наоборот, увеличивается

со снижением относительной прозрачности воды. Региональный регрессионный алгоритм обеспечивает наиболее качественную связь между толщиной фотического слоя и относительной прозрачностью воды.

2. На основании данных по среднемноголетнему распределению ПП в верхнем 10-м слое вод выделены участки акватории, характеризующиеся разными природными (температура, соленость, глубина, рельеф и форма береговой линии) и антропогенными (концентрации основных биогенных элементов) факторами: район м.Таран, район сочленения Самбийского п-ва и Куршской косы, район п.Рыбачий, открытое море и российская часть Гданьского залива. Выделенные районы характеризуются лучшими корреляционными связями ПП и показателей состояния морской среды, по сравнению с результатами регрессионного анализа в районах, выделенных по батиметрическому принципу. Наиболее тесно ПП связана с уровнем прогрева вод. Температура может использоваться как индикатор вод с разной продуктивностью фитопланктона.

3. В российском секторе Гданьского бассейна отмечается низкое молярное N:P-соотношение, а также статистически значимая взаимосвязь годового хода ПП и концентрации нитратов. Около четверти (21-27%) ежегодной величины ПП образуется в период её короткого весеннего максимума, достигающего пика в апреле, преимущественно динофлагеллятами. Почти половина ежегодной величины ПП (43-49%) создается зелеными и синезелеными водорослями в период продолжительного летнего максимума, достигающего пика в июле и отмечающегося на месяц раньше, чем считалось. Сезонные изменения ПП в столбе воды с достаточной точностью могут быть описаны на основании данных по концентрации хлорофилла «а» в верхнем 10-м слое.

4. Ежегодные величины ПП ($237 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$) исследуемого района близки к верхнему уровню, установленному для мезотрофных вод ($100\text{-}250 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$). Воды, примыкающие к густонаселенному северному побережью Самбийского п-ва, достигают эвтрофного уровня ($250\text{-}450 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$). Существенная часть биогенных элементов, приносимых стоком с материка и

малыми рекам северного побережья Самбийского п-ва, имеет антропогенное происхождение и стимулирует развитие фитопланктона в этом районе. Достоверные тренды многолетних изменений трофического статуса выявлены не были. Сохранению ПП приблизительно на одном уровне способствовало постепенное снижение концентрации фосфатов в морских водах после крупного затора 2003 г., которое компенсировалось увеличением глубины проникновения зимней конвекции во второй половине периода исследований и ростом температуры поверхности моря в теплый период года.

5. Современный трофический статус акватории российского сектора Гданьского бассейна Балтийского моря находится в пределах его естественных колебаний в голоцене ($43-417 (180 \pm 121) \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$), обусловленных природными факторами.

В **Приложении 1 и 2** представлены среднегодовые величины ПП и показателей состояния морской среды для групп станций, выделенных по батиметрическому принципу и по среднегодовым величинам ПП. В **Приложении 3** показана корреляционная матрица между ПП и показателями состояния морской среды в точке ежемесячных наблюдений.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю к.г.-м.н. В.В. Сивкову, глубоко признательна д.б.н. Н.В. Пименову за помощь в освоении и совершенствовании методов исследований, к.г.-м.н. А.В. Егорову за ценные рекомендации, к.б.н. С.В. Александрову за добрые советы. Автор благодарна своим коллегам по лаборатории и экспедициям. Отдельная благодарность ООО «ЛУКОЙЛ-КМН» и ООО «МВБ» за предоставленные материалы.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Кудрявцева Е.А., Пименов Н.В., Александров С.В., Кудрявцев В.М. Первичная продукция и хлорофилл «а» в юго-восточной части Балтийского моря в 2003-2007 гг. // *Океанология*. – 2011. – Т. 51. – № 1. – С. 33-41.

2. Кудрявцева Е.А., Саввичев А.С., Александров С.В., Канапацкий Т.А., Пименов Н.В. Бактериопланктон Гданьского бассейна Балтийского моря // Микробиология. – 2012. – Т. 81. – № 3. – С. 377-388.

3. Кудрявцева Е.А., Сивков В.В. Использование диска Секки для определения толщины фотического слоя в юго-восточной Балтике по данным измерений первичной продукции *in situ* // Ученые записки Российского гидрометеорологического университета. – 2016. – № 45. – С. 91-99.

Работы в других изданиях:

1. Кудрявцев В.М., Кудрявцева Е.А. Продукционно-деструкционные процессы у морского побережья Куршской косы // Проблемы изучения и охраны природного и культурного наследия национального парка «Куршская коса»: сб. научных статей. – Калининград: Изд-во РГУ им. И. Канта, 2007. – Вып. 5. – С. 118-129.

2. Александров С.В., Кудрявцева Е.А., Буканова Т.В. Использование спутниковых и судовых измерений хлорофилла «а» и первичной продукции для оценки экологического состояния и биологической продуктивности Балтийского моря // Ученые записки РГО (Калининградское отделение) [Электронный ресурс]. – 2008. – Т.7 – Часть 1. – С. В1-В11 (CD-ROM версия).

3. Кудрявцева Е.А., Пименов Н.В. Первичная продукция в российском секторе юго-восточной части Балтийского моря в 2003-2008 гг. // Геология, география и экология океана: Материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Д.Г.Панова. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. – С. 186-190.

4. Kudryavtzeva E. Late Holocene organic carbon accumulation in the Gdansk Deep: paleogeographical application // The Baltic Sea Geology-10. The 10th International Marine Geological conference. – SPb.: Press.VSEGEI, 2010. – P. 62-65.

5. Александров С.В., Кудрявцева Е.А. Хлорофилл «а» и первичная продукция фитопланктона // Нефть и окружающая среда Калининградской области. – Калининград: Терра Балтика, 2012. – Т. 2. – С. 358 – 372.

Кудрявцева Елена Андреевна

**РОЛЬ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ
ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА
ГДАНЬСКОГО БАССЕЙНА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Подписано в печать 19.06.2017
Формат 60×90 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 1,5
Тираж 100 экз. Заказ 140

Издательство Балтийского федерального университета им. И.Канта
236022, г. Калининград, ул. Гайдара, 6