

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи
УДК 551.464.38(265.518)

КИВВА Кирилл Константинович

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПЕРВИЧНОГО ПРОДУЦИРОВАНИЯ
В БЕРИНГОВОМ МОРЕ

Специальность 25.00.28 – океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва-2017

Работа выполнена на кафедре океанологии географического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Научный руководитель **ПОЛЯКОВА Антонина Владимировна**
*кандидат географических наук, доцент
кафедры океанологии*

Официальные оппоненты **МАККАВЕЕВ Петр Николаевич**
*доктор географических наук, заведующий
лабораторией биогидрохимии,
ФГБУН Институт океанологии имени
П.П. Ширшова РАН (г. Москва)*

ФАЩУК Дмитрий Яковлевич
*доктор географических наук, ведущий научный
сотрудник лаборатории гидрологии,
ФГБУН Институт географии РАН (г. Москва)*

Ведущая организация **ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева ДВО РАН**
(г. Владивосток)

Защита состоится **30 марта 2017 г. в 15 ч. 00 мин.** на заседании диссертационного совета Д 501.001.68, созданного на базе Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, ГЗ, МГУ, географический факультет, 18 этаж, ауд. 1801.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Фундаментальной научной библиотеки Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (119991, Москва, Ломоносовский проспект, 27, А8) и на сайте МГУ (<http://istina.msu.ru/dissertations/35961514/>). Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения) просим направлять по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, ГЗ, МГУ, географический факультет, ученому секретарю диссертационного совета Д 501.001.68, e-mail: science@geogr.msu.ru, факс: +7 495 9328836.

Автореферат разослан «___» февраля 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук, профессор



Савенко В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Берингово море – важный для России в экономическом отношении водоем. На сегодняшний день в море ежегодно добывается около 0,7 млн т морепродуктов Россией и около 2,1 млн т США – это около 15 и 40 % общего вылова указанных стран соответственно. Высокая биопродуктивность моря связана с особенностями структуры и динамики его вод. В глубоких слоях моря наблюдаются максимальные для Мирового океана концентрации минеральных форм основных биогенных элементов (Сапожников и др., 1995; Whitley, Luchin, 1999). За счет перемешивания и апвеллингов богатые биогенными элементами воды периодически поступают в поверхностный слой, обеспечивая минеральным питанием фитопланктон и формируя мощную кормовую базу для развития организмов более высоких трофических уровней.

Особенности гидрологического режима и биологии Берингова моря позволяют частично или полностью отнести его к арктическому региону (Флинт, 2014; Luchin et al., 2002; Mecklenburg, Steinke, 2015). В полярных районах климатические изменения проявляются наиболее ярко (IPCC, 2007). При этом их обитатели обладают менее выраженными способностями к приспособлению в условиях меняющейся среды. Недавние исследования показали, что в связи с климатическими изменениями в Беринговом море происходят значительные «перестановки» в его экосистемах (Grebmeier et al., 2006).

Пользователям Берингова моря – в первую очередь России и США – важно знать состояние систем моря и уметь его прогнозировать. Поэтому продукционно-деструкционные процессы, представляющие собой один из ключевых системообразующих механизмов, становятся приоритетным направлением исследований. Прямое изучение этих процессов требует больших материальных и трудовых затрат, организации экспедиций, обеспеченных специальным оборудованием. Гидрохимические исследования, выполняемые на

более регулярной основе, позволили накопить массовый материал по содержанию в водах моря минеральных форм основных биогенных элементов и растворенного кислорода. Значения этих параметров дают представление о протекании продукционно-деструкционных процессов, а количественные оценки их изменчивости в весенне-летний сезон дают информацию об интенсивности продуцирования первичного органического вещества.

Изученность

Некоторые работы уже ставили своей целью обобщение всех имеющихся материалов по гидрохимии моря (Проект «Моря»..., 2001; Garcia et al., 2013; Panteleev et al., 2013), однако все они ограничивались описанием распределений средних сезонных значений по его акватории. Ни одна из них не была нацелена на восстановление сезонного хода гидрохимических параметров в пределах моря. Кроме того, с момента проведения последних таких обобщений накоплено значительное количество новых данных, в том числе, по растворенному минеральному азоту, часто не рассматриваемому в предыдущих исследованиях. Таким образом, с учетом накопленного материала качественно нового уровня и более высокой точности определения назрела необходимость более детального обобщения.

Цель исследования – выявление закономерностей пространственно-временной изменчивости гидрохимических параметров с максимально возможным разрешением как основы оценки биопродуктивности Берингова моря. Для достижения цели последовательно решены следующие **задачи**:

1. Создание новой, максимально полной базы гидролого-гидрохимических данных, оценка их качества и исключение заведомо ошибочных и сомнительных значений.

2. Анализ полученной базы данных и расчет средних значений гидрохимических параметров для летнего сезона (июль-сентябрь) в узлах регулярной широтно-долготной сетки на горизонтах 10 и 50 м.

3. Районирование Берингова моря и прилегающей части Тихого океана на основе пространственного распределения растворенного в воде кислорода и

минеральных форм основных биогенных элементов за летний сезон (июль-сентябрь) с учетом особенностей гидрологической структуры вод моря.

4. Анализ гидрохимических данных по выделенным районам с целью восстановления сезонного хода растворенного в воде кислорода и минеральных форм основных биогенных элементов.

5. Оценка средней многолетней сезонной убыли минеральных форм кремния, азота и фосфора (ΔSi , ΔN и ΔP соответственно) и нетто (чистой) продукции сообщества в выделенных районах Берингова моря и прилегающей части Тихого океана на основе расчетных данных.

Объект исследования – верхний слой 0-100 м Берингова моря и прилегающей части Тихого океана.

Предмет исследования – сезонная пространственно-временная изменчивость полей минеральных форм основных биогенных элементов и растворенного кислорода.

Данные и методы исследования

В работе использованы как архивные, так и современные гидрохимические данные по исследуемой акватории, находящиеся в открытом доступе, а также материалы съемок ФГБНУ «ВНИРО» (ВНИРО) и ФГБНУ «ТИНРО-Центр» (ТИНРО). База данных была проверена на наличие ошибочных и сомнительных значений. Проводилось осреднение данных за летний сезон (июль-сентябрь) по сферическим трапециям $1^\circ \times 2^\circ$ по широте и долготе соответственно, кластерный анализ (КА) полученного распределения, районирование исследуемой акватории на основе экспертной оценки результатов КА. Для выделенных районов вычислялись средние месячные значения рассматриваемых параметров на горизонтах с шагом 1 м и их интегральные разности между наиболее ранним весенним и наиболее поздним летним месяцами с достаточным количеством данных.

Научная новизна

1. Создана новая база гидролого-гидрохимических данных для Берингова моря и прилегающей части Тихого океана.

2. Впервые проведено районирование исследуемой акватории на основе анализа распределения среднемноголетних значений температуры и гидрохимических параметров.

3. Впервые получена информация о среднемноголетнем сезонном ходе дефицита/избытка растворенного кислорода (ΔO_2), кремния силикатов, азота нитратов и фосфора фосфатов для наиболее обеспеченных данными районов моря.

4. Впервые оценены стехиометрические соотношения потребления минеральных форм основных биогенных элементов для районов Берингова моря, показаны и объяснены причины их пространственной изменчивости.

5. Впервые получены величины среднемноголетней нетто продукции сообщества для районов исследуемой акватории. Выполнена новая оценка вклада локальных апвеллингов в первичную продуктивность Берингова моря.

Положения, выносимые на защиту

1. В пределах исследуемой акватории выделено 13 океанологических районов. Полученное районирование покрывает всю исследуемую акваторию и отражает особенности физических, биогидрохимических и – в значительной степени – биологических процессов в ее пределах. Оно позволяет проводить обоснованный анализ временных изменений биогидрохимических параметров.

2. Восстановлен сезонный ход концентраций кремния силикатов, азота нитратов, фосфора фосфатов и дефицита/избытка растворенного в воде кислорода (ΔO_2) в слое 0-100 м для наиболее обеспеченных данными районов.

3. В северном, центральном и прибрежном районах восточного шельфа Берингова моря первичное продуцирование ограничивается минеральным азотом. В глубоководных районах моря ограничение первичного продуцирования минеральными формами основных биогенных элементов в среднемноголетнем аспекте не наблюдается.

4. В пределах исследованной акватории соотношения потребления $\Delta Si:\Delta N$, $\Delta Si:\Delta P$ и $\Delta N:\Delta P$ меняются в широких пределах ($\approx 1-3$, 19-36 и 10-17

соответственно), что отражает отличия между районами в составе сообщества фитопланктона, а также в степени ограничения первичного продуцирования.

5. Нижний предел среднегодовой нетто продукции сообщества в наиболее обеспеченных данными и не подверженных влиянию апвеллингов районах составляет от $26 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ в приалеутском районе Тихого океана до $81 \text{ г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ в западном шельфовом районе Берингова моря. На примере Корякского шельфа показано, что за счет эпизодического локального апвеллинга годовая нетто (чистая) первичная продукция увеличивается на 20-80 $\text{г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$.

Теоретическая и практическая значимость работы

Полученное районирование может быть использовано для осреднения и статистического анализа научной информации различных типов, в частности, при мониторинге состояния среды обитания и запаса промысловых объектов, при управлении их выловом, а также может служить основой для исследований реакции Берингова моря на изменение климата. Новые оценки среднегодовой годовой нетто продукции сообщества для ряда районов Берингова моря и прилегающей части Тихого океана могут быть использованы для уточнения роли исследованного региона в глобальном круговороте углерода. В работе показана теоретическая возможность ограничения первичного продуцирования в глубоководных районах Берингова моря лабильным железом. Разработанный подход к обобщению гидролого-гидрохимических данных может быть использован при выполнении подобных исследований для других акваторий Мирового океана.

Личный вклад автора

1. Непосредственное участие автора в экспедициях ТИНРО в Берингово море в качестве руководителя гидрохимических исследований в 2010 и 2012 гг.

2. Создана база данных; выполнена проверка на наличие ошибочных и сомнительных значений.

3. Составлены и реализованы на языке FORTRAN авторские алгоритмы для анализа данных.

4. Выполнен анализ данных; визуализированы, интерпретированы и обобщены результаты.

Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались автором на международных и отечественных конференциях и семинарах: XX Ежегодной встрече Северотихоокеанской организации по морским наукам (PICES, Хабаровск, 2011); II научно-практической конференции молодых ученых ВНИРО (Москва, 2011); XIX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2011); Конференции Международного полярного года (IPY, Монреаль, Канада, 2012); XXII Ежегодной встрече PICES (Нанаймо, Канада, 2013); IV научно-практической конференции молодых ученых с международным участием ВНИРО (Москва, 2013); II Международной конференции по исследованию океана (IORC, Барселона, Испания, 2014); XXIII Ежегодной встрече PICES (Йосу, Южная Корея, 2014); I международной конференции молодых ученых ПИНРО (Мурманск, 2014); Ежегодной встрече Международного географического союза (IGU, Москва, 2015); XXIV Ежегодной встрече PICES (Циндао, Китай, 2015); Арктической неделе научного саммита (ASSW, Фэрбенкс, США, 2016); VII конференции молодых ученых ТОИ ДВО РАН (Владивосток, 2016); XXV Ежегодной встрече PICES (Сан-Диего, США, 2016). Материалы диссертации были представлены на Коллоквиуме лаборатории гидрохимии ВНИРО (Москва, 2016) и Коллоквиуме лаборатории промышленной океанографии ТИНРО (Владивосток, 2016).

По теме диссертации опубликовано **22 работы**, в том числе **3 статьи** в научных журналах из перечня российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, 3 статьи в прочих журналах и сборниках и 16 тезисов и статей в сборниках материалов научных конференций. Обобщение литературных данных (глава 2) вошло в рецензируемый доклад Рабочей группы Арктического Совета – Программы по мониторингу и оценке состояния Арктики (АМАР).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и обозначений и списка литературы. Общий объем диссертации 297 страниц, она содержит 41 рисунок и 6 таблиц. Список использованной литературы включает 409 наименований, 312 из которых – иностранные публикации.

Благодарности. Автор благодарит сотрудников лаборатории промысловой океанографии ТИНРО за предоставление данных рейсов 2008-2013 гг. и выражает искреннюю признательность всем сотрудникам лабораторий гидрохимии и климатических основ биопродуктивности ВНИРО за многочисленные консультации и предложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы исследования, указаны цель и задачи работы, предмет защиты. Отражена научная новизна и практическая значимость исследования, в краткой форме описаны данные и методы, использованные в работе. Сформулированы положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов, отмечена теоретическая и практическая значимость работы. Представлены сведения о личном вкладе автора и апробации работы.

В **первой главе** обобщены сведения о протекании продукционно-деструкционных процессов в морских экосистемах, охарактеризована роль основных биогенных элементов (минеральных соединений кремния, азота и фосфора) в них и выделены типы первичной продукции (ПП).

ПП принято подразделять на типы в зависимости от (а) источника минерального питания фитопланктона, (б) учета или игнорирования дыхания микроводорослей или всех организмов системы в целом, и (в) результирующего эффекта в экосистеме. В соответствии с этими принципами выделяют (а) «новую» продукцию и продукцию «вторичной переработки» органического вещества («рециклинга»), (б) валовую (совокупную) ПП, нетто (чистую) ПП

или ПП за вычетом дыхания фитопланктона, нетто продукцию сообщества (НПС) или ПП за вычетом дыхания всех организмов системы, и (в) продукцию, переходящую на более высокие трофические уровни в пелагиали, оседающую в подповерхностные слои или захораниваемую в донных осадках. Убыль биогенного элемента в минеральной форме в каком-либо объеме воды позволяет оценить НПС в данном объеме, выраженную в единицах этого элемента. Для перевода полученных значений в единицы углерода необходимо использовать соответствующий эмпирический коэффициент, получаемый из стехиометрических соотношений химических элементов, участвующих в продукционных процессах. Как для лабораторных культур различных видов фитопланктона, так и для реальных сообществ фитопланктона Мирового океана, C:N-соотношения меняются в значительно меньших пределах, чем C:P-соотношения (Geider, La Roche, 2002; Ho et al., 2003). Исходя из того, что истинные стехиометрические соотношения часто неизвестны, использование убыли минерального азота при оценке НПС позволяет получить наиболее надежный результат.

Вторая глава посвящена обобщению литературных данных по гидрометеорологическим условиям и первичному продуцированию в Беринговом море и прилегающей части Тихого океана. В ней приводится краткая история океанологических исследований региона и его физико-географическая характеристика. Отдельное внимание уделяется ледовому режиму, приливным явлениям, водным массам, циркуляции вод и фронтальным системам исследуемой акватории (рисунок 1).

На юго-восточном шельфе моря и вдоль Алеутских островов важная роль в формировании физического облика акваторий принадлежит приливам (Foreman et al., 2006). Характер глубоководной области и западного шельфа моря определяется, главным образом, непериодическими течениями. Северный шельф, где ледяной покров держится в среднем 150-180 дней в году, в большей степени, чем другие области моря, обладает чертами арктических акваторий (Frey et al., 2015). Юго-восточный шельф моря разделяется на три района

фронтальными зонами, образующимися за счет совместного действия ветрового и приливного перемешивания, а также адвекции вод глубоководной части моря (Coachman, 1986). На западном шельфе фронтальные зоны часто сливаются в одну фронтальную систему (Верхунов, 1994).

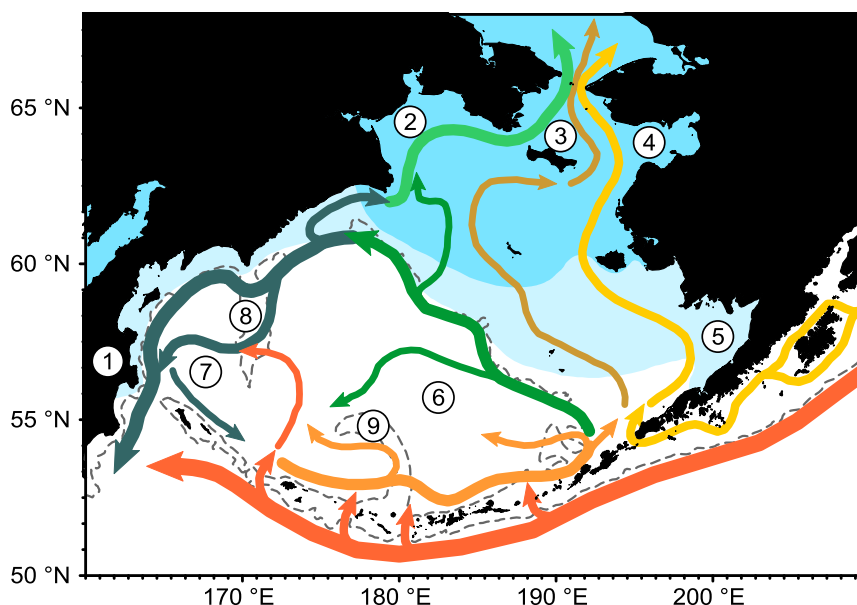


Рисунок 1. Схематическое обобщение литературных данных о циркуляции вод Берингова моря и прилегающей части Тихого океана. Пунктир – изобата 2000 м. Синей заливкой отмечено распространение льда в апреле и в мае. 1 – п-ов Камчатка, 2 – Анадырский зал., 3 – бассейн Чирикова, 4 – зал. Нортон, 5 – Бристольский зал., 6 – Алеутская котловина, 7 – Командорская (Камчатская) котловина, 8 – хр. Ширшова, 9 – хр. Бауэрс.

Наиболее заметная временная изменчивость физических, химических и биологических процессов в Беринговом море наблюдается в весенний и осенний периоды. Причем, основные физические и биологические процессы в различных частях моря в это время протекают асинхронно. Это объясняется географическими особенностями частей моря: влиянием Тихого или Северного Ледовитого океана, орографией берегов, рельефом дна и т.д.

В составе фитопланктона весной преобладают автотрофные диатомовые водоросли, а летом основу сообщества составляют миксотрофные динофлагелляты (Sukhanova et al., 1999). По всей видимости, значительная часть органического вещества, синтезируемого диатомовыми водорослями во время весеннего «цветения» фитопланктона, не потребляется в поверхностном слое, а погружается в нижележащие слои или – в шельфовых районах – на дно.

В пределах Берингова моря существуют несколько областей периодического подъема богатых биогенными элементами подповерхностных вод на поверхность: Корякский шельф, бассейн Чирикова, каньон Беринга (Nihoul et al., 1993; Hansell et al., 1989). Подобные процессы наблюдаются также в проливах Алеутской островной дуги (Mordy et al., 2005) и в каньонах восточного свала глубин: Жемчуга, Прибылова и Первенца (Сапожников и др., 2009).

«Зеленый пояс», окаймляющий глубоководную часть моря по периметру вдоль бровки шельфа, объединяет наиболее продуктивные области (Springer et al., 1996). Его формирование связано с турбулентным перемешиванием глубинных и поверхностных, а также шельфовых и «океанических» вод за счет неустойчивости струйных течений, их взаимодействия с рельефом дна и приливными течениями. Высокая ПП может быть характерна также для районов локальных апвеллингов (Сапожников и др., 2011).

В **третьей главе** приведено описание использованных в работе данных, методов и подходов к их анализу.

Основу собранной в рамках диссертационной работы базы данных составила информация Массива данных по Мировому океану (WOD) Национального океанографического центра данных США (NODC). Он содержит значения гидролого-гидрохимических параметров, полученные в многочисленных экспедициях с 1932 по 2009 гг. База была существенно дополнена данными проекта по исследованию экосистемы Берингова моря (BEST-BSIERP) 2008-2010 гг., НИС «Mirai» Японского агентства по морским наукам и технологиям (JAMSTEC) 1999-2012 гг., а также материалами съемок ВНИРО 1991-1993 гг. и ТИНРО 2008-2013 гг (Матвеев, Басюк, 2013).

Химические определения во всех недавних рейсах проводились по стандартным методикам. Данные рейсов последних двадцати лет были выбраны в качестве эталонных. Отбраковка заведомо ошибочных значений выполнялась вручную в программной среде Ocean Data View (Schlitzer, 2015) с учетом возможных особенностей вертикальных профилей рассматриваемых

параметров. Для анализа данных разработан ряд авторских программ, реализованных на языке FORTRAN. В основу оценки годовой нетто продукции сообщества положена методика Кодиспотти с соавторами (Codispoti et al., 2013).

Значения температуры (T), солености (S), растворенного кислорода (O_2) и его дефицита/избытка относительно растворимости (ΔO_2), кремния силикатов ($Si-SiO_3^{2-}$), азота нитратов ($N-NO_3^-$) и фосфора фосфатов ($P-PO_4^{3-}$) за летний сезон (июль-сентябрь) по горизонтам 10, 50 и 100 м осреднялись для узлов регулярной сетки. В качестве узлов выбраны центры сферических трапеций («квадратов») $1^\circ \times 2^\circ$ по широте и долготе соответственно. Расстояние от станции с наблюдениями до центра «квадрата» не учитывалось. При отсутствии значений параметра на горизонтах 10 или 50 м и наличии значений в интервалах 0-9, 11-21 и 34-48, 52-71 м проводилась линейная интерполяция значений на горизонт 10 или 50 м соответственно. Летний сезон каждого года рассматривался как отдельный интервал времени; значения осреднялись внутри каждой сферической трапеции за каждый из сезонов с наблюдениями, а затем вычислялось среднее многолетнее. Количество лет с наблюдениями приводится на рисунке 2.

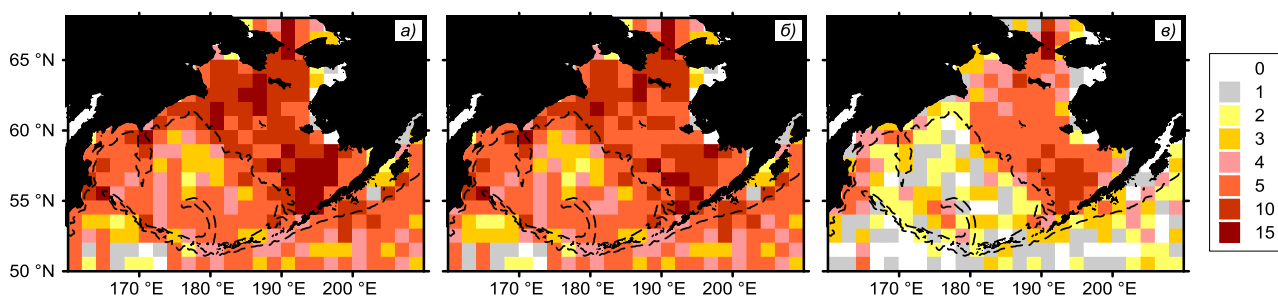


Рисунок 2. Количество лет с наблюдениями T (а), O_2 (б) и $Si-SiO_3^{2-}$ (в) за июль-сентябрь.

Районирование исследуемой акватории получено после экспертной оценки результатов кластерного анализа (КА) распределения среднемноголетних значений T , O_2 , $Si-SiO_3^{2-}$ и $P-PO_4^{3-}$ за летний сезон на горизонтах 10 и 50 м в узлах регулярной сетки. Для КА использована программа Девиса и Сампсона (Девис, 1977) с незначительными изменениями. В качестве меры сходства (различия) групп выбрано евклидово расстояние. Исходные данные стандартизировались, группы объединялись попарно.

Значения каждого параметра для вновь сформированной группы вычислялись осреднением параметров объединенных объектов (групп).

Пространственное сезонное осреднение данных для районирования выполнено за летний сезон для горизонтов 10 и 50 м по ряду причин. В пределах этого сезона временная изменчивость физических и химических параметров минимальна, а исследуемая акватория покрыта данными лучше, чем в другие сезоны. Распределение анализируемых параметров летом представляет собой результат действия физических, биохимических и биологических процессов в весеннее время и косвенно отражает как зимние условия вертикального перемешивания, так и интенсивность весеннего прогрева и продукционных процессов. Горизонты 10 и 50 м относятся к стандартным горизонтам, поэтому в собранной базе данных для них содержится много фактических значений параметров. Распределение параметров на 10 м отражает состояние верхнего квазиоднородного слоя, где прогрев и продукционные процессы наиболее активны. Горизонт 50 м обычно лежит под слоем сезонного термоклина (Хен и др., 2015), приблизительно соответствует глубине компенсации, где продукционные процессы уравниваются деструкционными, и поэтому распределение параметров на 50 м в первом приближении отражает состояние водной толщи до весенней трансформации химических соединений.

Для наиболее обеспеченных данными районов рассчитаны среднегодовые месячные значения T , S , O_2 , ΔO_2 , $Si-SiO_3^{2-}$, $N-NO_3^-$ и $P-PO_4^{3-}$, а также азота нитритов ($N-NO_2^-$) и аммонийного азота ($N-NH_4^+$). Данные станций линейно интерполировались на горизонты с шагом 1 м. Условием уместности интерполяции было $z_2 \leq 2 \cdot z_1 + 15$, где z_1 и z_2 – соседние горизонты. В противном случае программа переходила к поиску следующей пары горизонтов для интерполяции. Каждый месяц каждого года рассматривался как отдельный интервал времени; значения параметров осреднялись для каждого метрового

горизонта каждого отдельного месяца, а затем для данного горизонта вычислялось среднее месячное значение всех лет наблюдений.

Сезонная убыль биогенного элемента X (ΔX) определена как интегральная разность наиболее раннего весеннего и наиболее позднего летнего вертикальных профилей элемента X , интегрирование выполнено методом трапеций. Расчет проводился по формуле:

$$\Delta X = \sum_0^{z_0} [X_2(z) - X_1(z)] \quad (1),$$

где X_1 и X_2 – средняя многолетняя концентрация элемента X в минеральной форме на горизонте z весной и летом соответственно, z_0 – первый горизонт нулевого изменения концентрации элемента X от весны к лету; Σ – суммирование по горизонтам от поверхности до z_0 .

Для расчета НПС в $\text{г С м}^{-2} \text{г}^{-1}$ использована сезонная убыль общего минерального азота (N – сумма $N\text{-NO}_3^-$, $N\text{-NO}_2^-$ и $N\text{-NH}_4^+$, мкмоль л^{-1}):

$$\text{НПС}_{(N)} = K \cdot \Delta N \quad (2),$$

где K – эмпирический коэффициент, получаемый из молярного стехиометрического соотношения $C:N$. В данной работе за отсутствием надежных оценок $C:N$ -соотношения продукционно-деструкционных процессов в Беринговом море использовано соотношение Редфилда, $K = 0,0795$.

По существующим оценкам латеральные адвективные процессы могут изменить концентрацию минеральных форм биогенных элементов в поверхностном слое открытой части Берингова моря не более чем на 10 % (Yasunaka et al., 2015). Атмосферные осадки в течение года поставляют на поверхность Берингова моря также не более 10 % от поверхностных концентраций минеральных форм биогенных элементов (Krishnamurthy et al., 2010). Таким образом, точность полученных в данной работе оценок составляет примерно 20 %.

В четвертой главе охарактеризовано и проанализировано полученное распределение среднемноголетних значений T , S , O_2 , ΔO_2 , Si-SiO_3^{2-} , $N\text{-NO}_3^-$ и $P\text{-PO}_4^{3-}$ на горизонтах 10, 50 и 100 м за летний сезон, приведены результаты

группировки узлов регулярной сетки с помощью кластерного анализа, а также выделены районы в пределах исследуемой акватории.

Полученные в ходе работы схемы среднемноголетних концентраций минеральных форм основных биогенных элементов, растворенного кислорода и ΔO_2 на горизонтах 10, 50 и 100 м в Беринговом море и прилегающей части Тихого океана за летний период (июль-сентябрь) показали существование общих для указанных параметров градиентных зон. Это косвенно подтверждает наличие относительно обособленных морских экологических районов, особенности физических, химических и биологических процессов в которых формируют области относительно однородного пространственного распределения океанологических характеристик в летнее время.

Кластерный анализ распределения среднемноголетних значений температуры, растворенного кислорода, кремния силикатов и фосфора фосфатов на горизонтах 10 и 50 м в сферических трапециях $1^\circ \times 2^\circ$ («квадратах») за летний период позволил разделить их на 14 групп.

Для Берингова моря и некоторых других регионов Северной Пацифики характерна существенная межгодовая изменчивость в сезонном ходе температуры и химических параметров деятельного слоя (Лучин, Савельев, 1999; Ono et al., 2002). В некоторых случаях полученные нами значения не вполне отвечают средним многолетним, поскольку основываются на данных лишь одного или двух лет наблюдений. В связи с низкой обеспеченностью некоторых «квадратов» данными, выделение районов в пределах рассматриваемой акватории проводилось на основе критической экспертной оценки результатов КА. Присоединение «квадрата» с малым количеством данных к какому-либо району выполнено с учетом особенностей физической структуры вод исследуемой акватории и количества лет с наблюдениями. Кроме того, при проведении границ применялся принцип географической компактности районов. В результате выделено 13 океанологических районов (рисунок 3). Названия районов приведены в таблице 1.

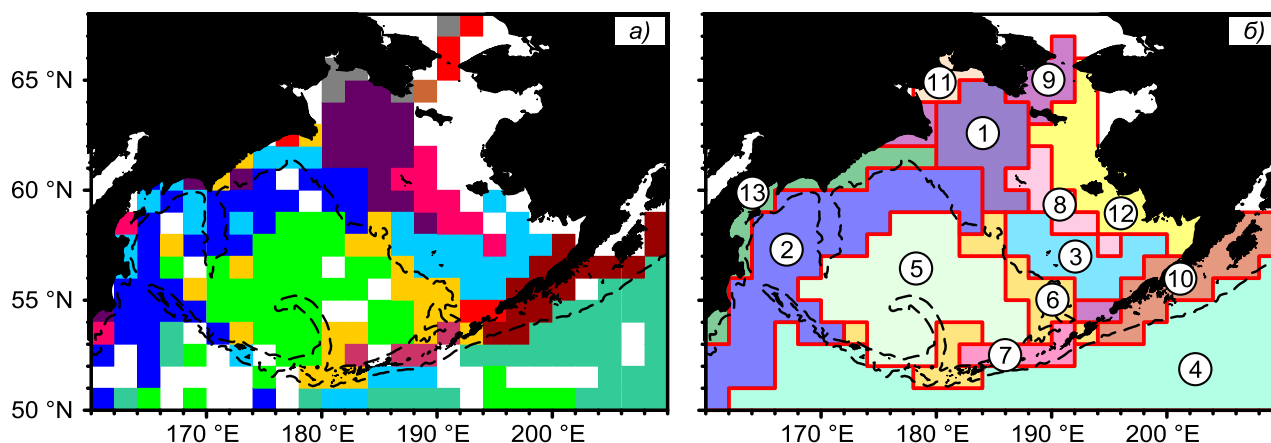


Рисунок 3. Результат группировки узлов регулярной сетки (а) и районирование Берингова моря на ее основе (б). Названия районов указаны в таблице 1.

Таблица 1.

Океанологические районы Берингова моря и прилегающей части Тихого океана

№ района	Название района	Основные формирующие факторы
1	Северный шельфовый	Ледовый режим, циркуляция вод шельфа
2	Западный глубоководный	Восточно-камчатское течение, турбулентное перемешивание, обмен вод с шельфом
3	Юго-восточный шельфовый	Водообмен с глубоководной частью моря
4	Приалеутский Тихого океана	Аляскинское струйное течение
5	Центральный глубоководный	Отсутствие выраженных течений, отсутствие ограничения ПП основными биогенными элементами
6	Юго-восточный склоновый	Алеутское северное склоновое течение, Берингоморское склоновое течение, турбулентное перемешивание
7	Алеутский	Поступление тихоокеанских вод и приливное перемешивание в проливах
8	Центральный шельфовый	Фронтальные системы и двухслойная структура вод
9	Район локальных апвеллингов	Поступление подповерхностных вод в поверхностные слои
10	Аляскинский шельфовый	Аляскинское прибрежное течение
11	Анадырский	Холодная придонная водная масса, поступление большого количества органического вещества в придонный слой
12	Восточный прибрежный шельфовый	Однородная структура вод, материковый сток
13	Западный шельфовый	Водообмен с глубоководной частью моря, шельфовые процессы

Пятая глава посвящена анализу внутригодовой изменчивости T , S , ΔO_2 , $Si-SiO_3^{2-}$, $N-NO_3^-$ и $P-PO_4^{3-}$ в наиболее обеспеченных данными районах и обсуждению отличий между ними.

В целом во всех районах Берингова моря сезонная динамика гидрохимических параметров обладает схожими чертами. В течение года в слое 0-100 м наблюдается переход от зимней однородной гидрохимической структуры к летней двухслойной, а затем, в среднем в ноябре – вновь к однородной. Однако темпы изменения рассматриваемых параметров, значения и сроки наступления их экстремумов для разных районов отличаются.

В северных районах Берингова моря (№№ 1, 2, 8 и 12) формирование устойчивой структуры вод начинается в среднем в апреле и связано с появлением распресненной за счет таяния льда водной массы (примеры на рисунке 4, а и б). В южных районах устойчивая стратификация начинает развиваться в мае за счет прогрева поверхностного слоя. Эти отличия определяют сроки начала весеннего цветения и температурные условия его протекания.

В летнее время в районах 1, 2, 3, 5 и 6 (таблица 1) наблюдается нарушение процесса накопления минеральных форм биогенных элементов в подповерхностном слое (50-100 м). Это происходит за счет диффузионного обмена и турбулентного перемешивания его с верхним слоем, обедненным питательными солями в связи с вегетацией фитопланктона (примеры на рисунке 5, г, д, з, к, л).

Среднегодовалый сезонный ход минеральных форм основных биогенных элементов показал практически ежегодное ограничение первичного продуцирования в северном (№ 1), центральном (№ 8) и прибрежном (№ 12) районах восточного шельфа Берингова моря минеральным азотом (рисунок 5, з, и) или минеральным кремнием (рисунок 5, е). В то же время в глубоководных районах ограничение первичного продуцирования минеральными формами основных биогенных элементов не наблюдается. Вероятно, там первичное продуцирование ограничивается микробиогенными элементами (железом).

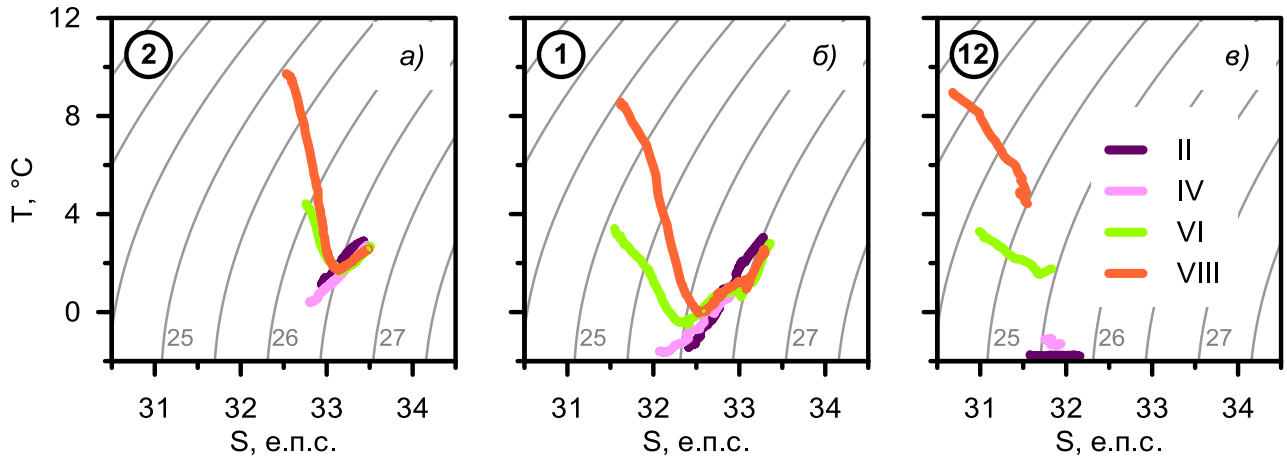


Рисунок 4. T,S-диаграммы слоя 0-200 м (0-дно), построенные по среднемуголетним данным за февраль (II), апрель (IV), июнь (VI) и август (VIII) для районов западного глубоководного (а), северного шельфового (б) и внутреннего восточного шельфа (в). Номера районов указаны в кружках. Серые линии и подписи – условная плотность (кг м^{-3}).

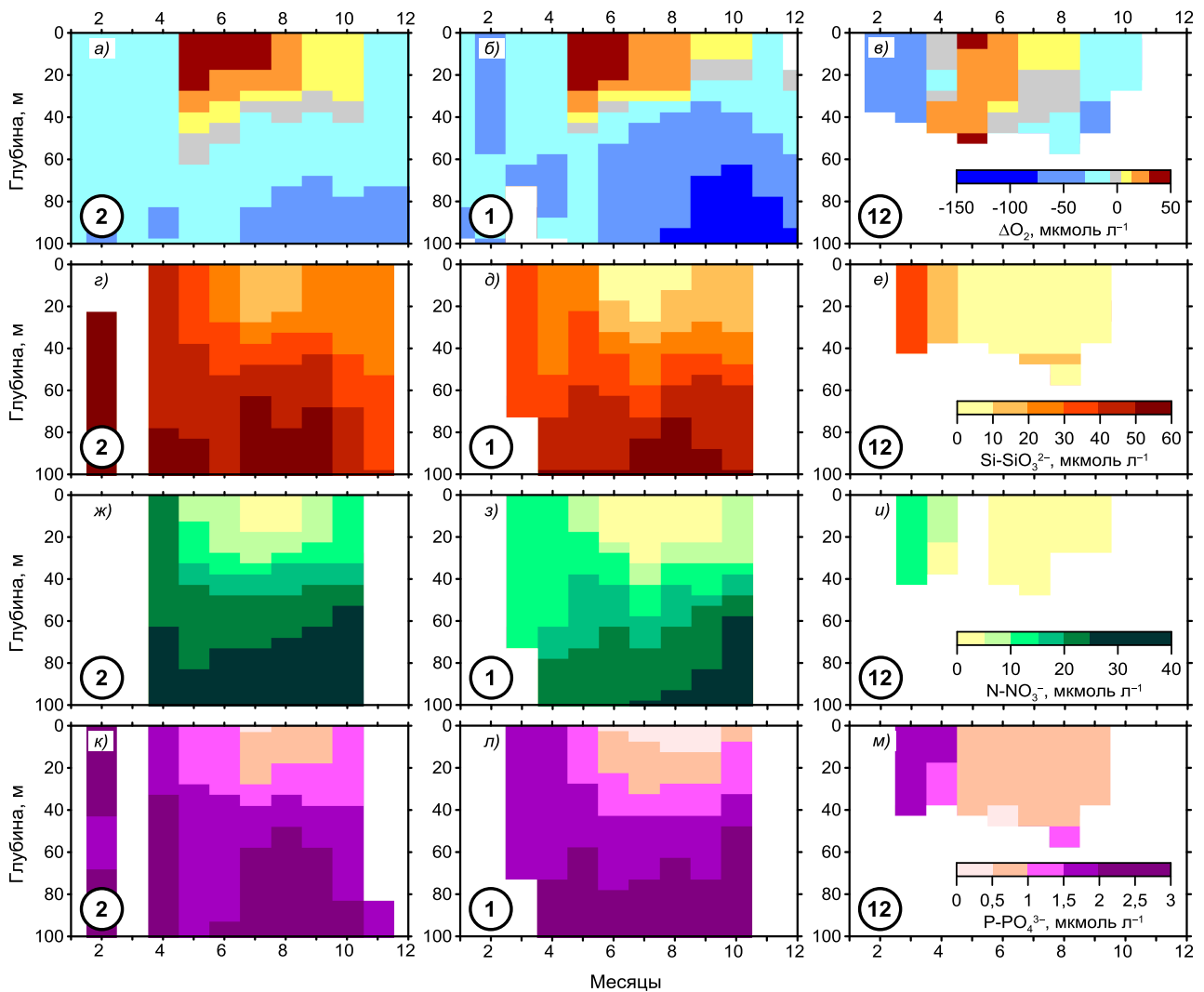


Рисунок 5. Среднеголетний сезонный ход ΔO_2 (а, б, в), Si-SiO_3^{2-} (г, д, е), N-NO_3^- (ж, з, и) и P-PO_4^{3-} (к, л, м) в слое 0-100 м, $\mu\text{кмоль л}^{-1}$, в районах западном глубоководном (№ 2), северном шельфовом (№ 1) и внутреннем восточном шельфа (№ 12). Белый цвет – отсутствие данных или количество лет с измерениями менее 2 (3 в случае ΔO_2).

В шестой главе представлены результаты расчетов среднесезонной сезонной убыли минеральных форм основных биогенных элементов, нетто продукции сообщества, среднесезонных соотношений потребления элементов фитопланктоном $\Delta\text{Si}:\Delta\text{N}:\Delta\text{P}$, выполнен анализ их пространственной изменчивости, приведена оценка вклада локальных апвеллингов в первичную продуктивность Берингова моря.

Сезонная убыль кремния силикатов, азота нитратов, общего минерального азота и фосфора фосфатов (ΔSi , $\Delta\text{N-NO}_3^-$, ΔN и ΔP соответственно) приводится в таблице 2. Полученные значения дают основания для оценок молярного соотношения $\Delta\text{Si}:\Delta\text{N}:\Delta\text{P}$ (таблица 3).

Таблица 2.

Сезонная убыль Si-SiO_3^{2-} , N-NO_3^- , общего минерального азота (N) и P-PO_4^{3-}

№ района	Месяцы	ΔSi , ммоль м ⁻²	$\Delta\text{N-NO}_3^-$, ммоль м ⁻²	ΔN , ммоль м ⁻²	ΔP , ммоль м ⁻²
1	III–VII	1264,4	379,2	346,7	39,4
2	IV–VII	1326,6	677,9	658,8	48,1
3	IV–VIII	705,0	578,9	391,2	34,0
4	III–VII	615,2	327,5	—	23,9
5	V–IX	596,9	362,8	369,4	24,9
6	IV–VIII	724,9	721,0	709,9 ⁽¹⁾	41,9
8	V–VII	989,3	317,7	340,0	35,2
10	V–VII	188,2	—	—	14,0
12	III–VI	1495,2	623,4	669,0	52,8
13	IV–VII	2167,8 ⁽²⁾	1188,2 ⁽²⁾	1023,1 ⁽²⁾	78,4 ⁽²⁾

Примечания.

⁽¹⁾ Данные по N-NO_2^- и N-NH_4^+ за август отсутствуют; использованы средние июльские профили N-NO_2^- и N-NH_4^+ , но августовский профиль N-NO_3^- .

⁽²⁾ Весенние профили Si, N и P получены по данным только одного года, а летний профиль общего минерального азота – по данным только двух лет наблюдений.

В целом для приалеутского района Тихого океана (№ 4), центрального глубоководного (№ 5), внешнего (№ 3) и центрального (№ 8) шельфовых районов Берингова моря характерны относительно низкие уровни сезонной убыли Si, N и P. Для районов глубоководного западного (№ 2), внутреннего шельфового (№ 12) и юго-восточного свала глубин (№ 6) Берингова моря характерны относительно высокие значения этих параметров (таблица 2). Северный шельфовый район (№ 1) несколько выбивается из указанной

закономерности, поскольку в его пределах наблюдаются относительно высокая сезонная убыль Si-SiO_3^{2-} , но низкая убыль минерального азота и фосфора.

Таблица 3.

Среднемноголетние молярные соотношения сезонной убыли Si-SiO_3^{2-} , общего минерального азота (N) и P-PO_4^{3-}

№ района	Месяцы	$\Delta\text{Si}:\Delta\text{P}$	$\Delta\text{Si}:\Delta\text{N}$	$\Delta\text{N}:\Delta\text{P}$
1	III–VII	32	3,6	9
2	IV–VII	28	2,0	14
3	IV–VIII	21	1,8	12
4	III–VII	26	1,9 ⁽¹⁾	14 ⁽¹⁾
5	V–IX	24	1,6	15
6	IV–VIII	17	1,0 ⁽²⁾	17 ⁽²⁾
8	V–VII	28	2,9	10
10	V–VII	13	—	—
12	III–VI	26	2,2	11
13	IV–VII	28 ⁽³⁾	2,1 ⁽³⁾	13 ⁽³⁾

Примечания.

⁽¹⁾В районе № 4 значения $\Delta\text{Si}:\Delta\text{N}$ и $\Delta\text{N}:\Delta\text{P}$ оценены по $\Delta\text{N-NO}_3^-$.

⁽²⁾Использованы средние июльские профили N-NO_2^- и N-NH_4^+ , но августовский N-NO_3^- .

⁽³⁾Весенние профили Si, N и P получены по данным только одного года, а летний профиль общего минерального азота – по данным только двух лет наблюдений.

$\Delta\text{Si}:\Delta\text{P}$ -соотношение для исследованных районов колеблется в пределах от 13 до 32, в среднем $\Delta\text{Si} = 26,4 \cdot \Delta\text{P}$ ($r^2 = 0,98$). $\Delta\text{Si}:\Delta\text{N}$ -соотношение составляет от ≈ 1 в районе юго-восточного свала глубин Берингова моря до $\approx 3,6$ в северном шельфовом районе моря; в среднем $\Delta\text{Si} = 2,0 \cdot \Delta\text{N}$ ($r^2 = 0,93$). $\Delta\text{N}:\Delta\text{P}$ -соотношение в пределах исследуемой акватории меняется от ≈ 9 в северном шельфовом районе до ≈ 17 в районе юго-восточного свала глубин Берингова моря; в среднем $\Delta\text{N} = 12,8 \cdot \Delta\text{P}$ ($r^2 = 0,98$).

Характерное Si:N-соотношение в клетках диатомей, выращенных в условиях проточной культуры с избытком минерального питания, составляет $0,8 \pm 0,3$ (Sarhou et al., 2005). Более высокие Si:N-соотношения состава диатомей сообщаются для клеток, развивающихся в условиях недостатка минерального азота или лабильного железа (Geider, Roche, 2002; Price, 2005). При недостатке в питании фитопланктона какого-либо элемента, молярные соотношения этого элемента к остальным значительно изменяются. Растворенное железо опосредованно определяет содержание в клетках азота, поскольку необходимо

фитопланктону для создания ферментов, отвечающих за его ассимиляцию. То есть, к основным факторам, определяющим соотношение $\Delta Si:\Delta N:\Delta P$ в Беринговом море следует отнести среднюю долю диатомей в сообществе фитопланктона, а также степень ограничения первичного продуцирования минеральным азотом или лабильным железом.

Учитывая использование «редфилдовского» коэффициента перевода ΔN в единицы C , а также невозможность учесть раннюю вегетацию (надежные данные за март или апрель зачастую отсутствуют), результаты наших расчетов НПС могут быть занижены.

Оценка ПП проводилась с допущением, что вертикальные потоки минеральных форм основных биогенных элементов между слоем 0-100 м и нижележащими слоями в каждом районе пренебрежимо малы. Для районов квазипостоянных апвеллингов такое допущение привело бы к значительному занижению результата, поскольку в их пределах запас минеральных форм биогенных элементов периодически обновляется. Для оценки величин ПП в этих районах необходимо обладать информацией о темпах вертикального потока минеральных форм основных биогенных элементов.

Скорость подъема вод в бассейне Чирикова оценивается в ≈ 4 м сут⁻¹ (Nihoul et al., 1993). Оценка вертикальной скорости в районе Корякского шельфа во время эпизодического апвеллинга выполнена по результатам съемки 2012 г. (рисунок 6). Изотермы, изопикны и изоплеты ΔO_2 и минеральных форм биогенных элементов в прибрежной части разрезов были подняты на 20-60 м по сравнению с их положением в мористой части разрезов. Если предположить, что характерное время развития апвеллинга составляет 10 дней, то средняя скорость подъема вод характеризуется величинами 2-6 м сут⁻¹. Концентрация $N-NO_3^-$ в подповерхностном слое составляет ≈ 10 мкмоль л⁻¹. При скорости подъема вод в 2-4 м сут⁻¹ интенсивность вертикального потока N в локальных апвеллингах Берингова моря – около 20-40 ммоль N м⁻² сут⁻¹ или 280-560 мг N м⁻² сут⁻¹. При условии полного расходования N , поступающего в поверхностный слой, в районах апвеллингов синтезируется порядка 1,8-3,7

г С м⁻² сут⁻¹. Если апвеллинг действует 10-20 дней, то за его счет формируется ПП в размере 18-74 г С. Близкая величина получена в результате оценки ПП по ΔO₂. В районе апвеллинга вдоль Корякского шельфа значения параметра ΔO₂ были >60 мкмоль л⁻¹ в слое мощностью ≈20 м (рисунок 6). Соответственно, общее избыточное количество растворенного кислорода было >1,2 моль O₂ м⁻². Это соответствует синтезу >1,5×1,2 моль С м⁻² (Laws, 1991), или >21,6 г С м⁻². При оценке общей «полезной» продуктивности района апвеллинга эту величину можно прибавить к создаваемой в них НПС.

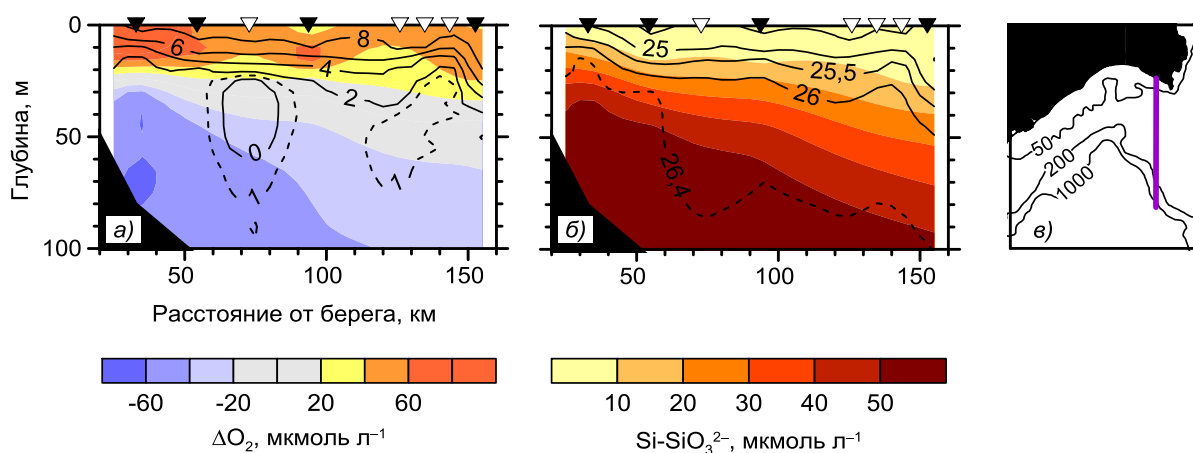


Рисунок 6. Распределение температуры (°С, изолинии, а), ΔO₂ (мкмоль л⁻¹, заливка, а), условной плотности (кг м⁻³, изолинии, б) и Si-SiO₃²⁻ (мкмоль л⁻¹, заливка, б) вдоль разреза у м. Наварин 27-29 июля 2012 г. во время апвеллинга. Белые (черные) треугольники – гидрологические (гидролого-гидрохимические) станции. Положение разреза (в).

В соседних районах НПС (которая может служить первым приближением чистой ПП) оценивается в 28-52 г С м⁻² г⁻¹ (таблица 3). Таким образом, эпизодический апвеллинг увеличивает годовую чистую ПП практически в два раза, а квазипостоянный, как в бассейне Чирикова, – в несколько раз.

Для оценки НПС Алеутского и Анадырского районов (№ 7 и № 11 соответственно) можно использовать значения НПС, полученные для соседних районов, поскольку они имеют схожие черты гидрологического и биологического режима. То есть, в районе Алеустких проливов, вероятно, НПС составляет 50-60 г С м⁻² г⁻¹, а в прибрежной части Анадырского залива 25-30 г С м⁻² г⁻¹. Схема распределения НПС по исследованной акватории приводится на рисунке 7.

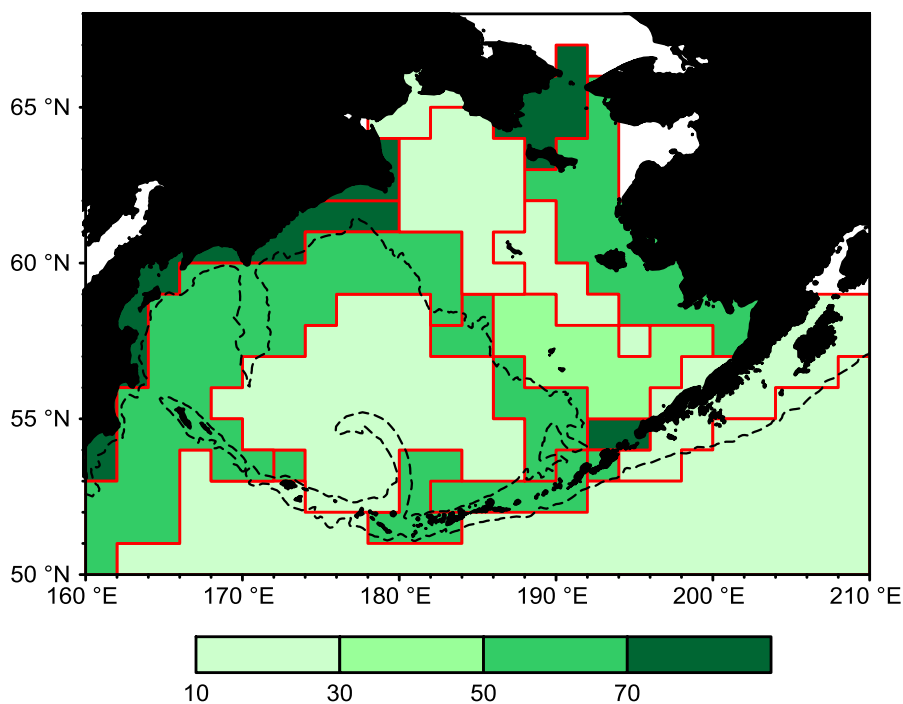


Рисунок 7. Распределение нетто (чистой) продукции сообщества по акватории исследования, $\text{г С м}^{-2} \text{г}^{-1}$, по результатам расчетов и оценок. Пунктир – изобата 2000 м.

В заключении сформулированы основные **выводы**:

1. По средним многолетним значениям температуры воды, концентраций растворенного в воде кислорода, кремния силикатов и фосфора фосфатов на горизонтах 10 и 50 м за летний период (с июля по сентябрь) исследуемая акватория разделена на 13 районов с относительно однородным физическим и биологическим режимом. Полученная схема районирования является первой в своем роде, поскольку, в отличие от других существующих схем, покрывает всю акваторию Берингова моря (а также прилегающую часть Тихого океана) и основана на совместном анализе физических и химических параметров.

2. Выполнен анализ временной изменчивости вертикальных профилей минеральных форм основных биогенных элементов и дефицита/избытка растворенного в воде кислорода относительно растворимости по районам исследуемой акватории. Результаты анализа показали, что между районами существуют заметные различия не только в абсолютных значениях экстремумов рассматриваемых параметров, но и в характере их временной изменчивости.

3. В районах восточного шельфа Берингова моря имеет место ограничение первичного продуцирования минеральным азотом и кремнием, выраженное в различных районах в разной степени и в среднем наблюдающееся, по крайней мере, с июля по сентябрь. В глубоководных районах исследованной акватории в среднемноголетнем аспекте минеральные формы основных биогенных элементов практически не ограничивают первичное продуцирование на протяжении всего вегетационного периода.

4. В пределах исследуемой акватории наибольшее влияние на стехиометрию продукционных (а значит, и деструкционных) процессов оказывает не только состав сообщества фитопланктона, но и степень сдерживания темпов первичного продуцирования за счет недостатка биогенных элементов: главным образом, азота и, возможно, лабильного железа.

5. Полученные в работе оценки нетто (чистой) продукции сообщества показали, что относительно высокопродуктивные зоны сосредоточены вдоль свала глубин – в пределах так называемого «зеленого пояса» Берингова моря, но наибольшая «полезная» продуктивность приурочена к прибрежным шельфовым районам и районам периодического или квазипостоянного подъема подповерхностных вод на поверхность. На примере Корякского шельфа показано, что апвеллинг в его пределах может увеличивать годовую нетто первичную продукцию в этом районе в 1,5-2 раза.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в российских рецензируемых журналах и изданиях

1. **Кивва К.К.**, Чульчечков Д.Н. Океанологические исследования в западной части Берингова моря в июле-ноябре 2012 г. // Океанология – 2014. – Т. 54. – № 4. – С. 574-576.
2. **Кивва К.К.** Оценка первичной продукции Берингова моря с использованием нового подхода // Труды ВНИРО – 2014. – Т. 152. – С. 73-84.

3. Агатова А.И., **Кивва К.К.**, Торгунова Н.И. Пространственно-временная изменчивость органического вещества в водах Берингова моря // *Океанология* – 2015. – Т. 55. – № 2. – С. 204-216.

4. **Кивва К.К.** Выделение экологических районов в Беринговом море на основе океанологических данных // *Труды ВНИРО* – 2016. – Т. 164. – С. 62-74.

Тезисы докладов на научных конференциях

5. **Kivva K.**, Chulchekov D. Evidence of local upwellings in the north-western Bering Sea in 2012 // *Communicating forecasts, uncertainty and consequences of ecosystem change*, North Pacific Marine Science Organization, October 11-20, 2013, Nanaimo, BC, Canada. – P. 163.

6. **Kivva K.K.**, Torgunova N., Agatova A. Spatial and temporal variability of dissolved organic matter in the western Bering Sea // *Communicating forecasts, uncertainty and consequences of ecosystem change*, North Pacific Marine Science Organization, October 11-20, 2013, Nanaimo, BC, Canada. – P. 177.

7. **Кивва К.К.** Оценка первичной продуктивности Берингова моря по гидрохимическим данным 2012 г. // *Современные проблемы и перспективы рыбохозяйственного комплекса. Материалы четвертой научно-практической конференции молодых ученых с международным участием*. М.: Изд-во ВНИРО, 2013. – С. 78-80.

8. **Kivva K.K.** Assessment of primary production in the Bering Sea with new approach // *One planet one ocean. 2nd International ocean research conference*. 16-21 November, 2014, Barcelona, Spain. – P. 82, 298.

9. **Kivva K.K.** New approach for primary productivity assessment in the Bering Sea // *Toward a better understanding of the North Pacific: Reflecting on the past and steering for the future*, North Pacific Marine Science Organization. October 16-26, 2014, Yeosu, Korea. – P. 138.

10. **Кивва К.К.** Оценка первичной продукции Берингова моря с использованием нового подхода // *Проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса на современном этапе. Тезисы докладов I*

международной конференции молодых ученых. 22-24 октября 2014 г. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2014. – С. 81-82.

11. **Kivva K.**, Poliakova A. Primary production features in the north-western Bering Sea // Book of Abstracts. International Geographical Union Regional Conference. Geography, culture and society for future Earth. 17-21 August, 2015, Moscow, Russia. – P. 85.

12. **Kivva K.**, Matveev V. Seasonal nutrient dynamics in the western Bering Sea // Change and Sustainability of the North Pacific. North Pacific Marine Science Organization. October 14-25, 2015, Qingdao, China. – P. 165.

13. **Кивва К.К.** Пространственно-временная изменчивость полей биогенных элементов в Беринговом море // Океанологические исследования: материалы VII конференции молодых ученых, 16-20 мая 2016 г., Владивосток, Россия. – Владивосток: Дальнаука, 2016. – С. 25-28.

14. Khen G.V., Basuk E.O., **Kivva K.**, Matveev V.I. Summer water masses and fish communities in the north-western Bering and western Chukchi Seas in 2003-2010 // PICES-2016. 25 Year of PICES: Celebrating the Past, Imagining the Future. November 2-13, 2016, San Diego, CA, USA. – P. 112.

15. **Kivva K.** Seasonal dynamics of dissolved inorganic nutrients in the Bering Sea // PICES-2016. 25 Year of PICES: Celebrating the Past, Imagining the Future. November 2-13, 2016, San Diego, CA, USA. – P. 289.

