

Среда обитания
водных биологических ресурсов
Диагноз и прогноз условий среды обитания гидробионтов

УДК: 551.46 (265.518)

**Выделение экологических районов в Беринговом море
на основе океанологических данных**

K.K. Кивва

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ
«ВНИРО»), г. Москва

E-mail: kirill.kivva@gmail.com

Вся доступная информация по распределению растворённого кислорода, кремния силикатов, фосфора фосфатов и нитратного азота в Беринговом море собрана в новой базе данных. Осреднение данных за летний сезон (июль—сентябрь) по сферическим трапециям $1 \times 2^\circ$ по широте и долготе показало существование градиентных зон в пределах моря, свидетельствующих о формировании экологических районов, определяемых особенностями физических и продукционно-деструкционных процессов. Кластерный анализ среднемноголетних данных по температуре, растворённому кислороду, кремнию силикатов и фосфору фосфатов для горизонтов 10 и 50 м за летний сезон позволил распределить сферические трапеции по 14 группам, а экспертная оценка его результатов привела к разделению всей акватории моря на 13 экологических районов. Полученная схема районирования отвечает следующим критериям: (а) покрытие всей акватории моря, (б) отражение особенностей физических, химических и — в значительной степени — биологических процессов в пределах районов, (в) строгая обоснованность границ районов. Она может использоваться для осреднения и статистического анализа естественнонаучной информации различных типов, а также послужить основой для управленческих решений по рациональному использованию биологических ресурсов моря.

Ключевые слова: Берингово море, база данных, температура, растворённый кислород, кремний силикатов, фосфор фосфатов, экологическое районирование.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования Берингово моря. Берингово море представляет собой сложный географический объект, обладающий рядом морфологических, климатических и циркуляционных особенностей, определяющих функционирование большого числа уникальных биогеоценозов Северной Пацифики и Арктики. Промежуточные и придонные воды моря исключительно богаты биогенными элементами, накопленными за счёт деструкции органического вещества во время движения водных масс в Тихом океане [Tsunogai et al., 1979; Whitlege and Luchin, 1999], а динамические процессы в пределах моря поставляют эти питательные соли на поверхность и обеспечивают

общий высокий уровень его биологической продуктивности [Кивва, 2014]. Это определяет важное рыбохозяйственное значение Берингова моря [Булатов, 2004]. На его долю приходится до 20% общего вылова морских биологических ресурсов РФ и около 40% общего вылова США. Это море служит пунктом трансформации водных масс Тихого океана перед их поступлением в Северный Ледовитый океан (СЛО). Несмотря на относительно малую величину потока воды через Берингов пролив (около $0,7-1,1 \text{ Св} (10^6 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1})$, по сравнению, например, с потоком атлантических вод через Баренцево море, оцениваемым в $2,6 \pm 0,9 \text{ Св}$), Берингово море является источником заметного количества тепла, пресной воды и биогенных

элементов для СЛО [Torres-Valdés et al., 2013; Wood-gate et al., 2012]. Причём влияние затока берингоморских вод прослеживается в отдельные годы и в Центральной Арктике [Гангнус, Духова, 2011], и даже в проливе Фрама [Falck et al., 2005]. Таким образом, физические, химические и биологические процессы в Беринговом море играют важную роль в формировании экосистем СЛО.

Актуальность выделения районов в пределах моря. В первой половине XX в. экспедиционные исследования моря носили в основном характер гидрологических и гидрографических съёмок, но с 50-х гг. XX в. в Беринговом море выполняются работы по многочисленным междисциплинарным программам, ориентированным на изучение физических, химических и биологических процессов в комплексе.

К настоящему времени накоплен обширный массив данных по пространственно-временной изменчивости океанологических параметров в пределах моря. Современные методы обработки данных, такие как оптимальная интерполяция или восстановление полей с использованием гидродинамических численных моделей, позволили получить распределения физических параметров в Мировом океане, и в Беринговом море в частности, с относительно высоким пространственно-временным разрешением. Выполнение подобных расчётов для химических или биологических параметров пока всё же затруднительно. Это связано с существенно меньшей обеспеченностью акватории Берингова моря соответствующими наблюдениями, а также с низким качеством воспроизведения в модельных расчётах сложных биологических процессов. Поэтому анализ пространственно-временной изменчивости распределений химических и биологических параметров чаще всего выполняют «классическими» статистическими методами. В условиях недостатка данных для восстановления среднемноголетних месячных значений в узлах регулярной сетки с высоким пространственным разрешением целесообразно выполнять осреднения по географическим районам, характеризующимся определенными особенностями физических и биологических процессов в них.

Какие схемы районирования существуют и почему нужна другая? Первыми примерами выделения районов Берингова моря, осно-

ванными на совместном анализе физических и биологических данных, можно считать результаты обобщений В.П. Шунтова [1988] и Л. Коучмена [1990]. В.П. Шунтов [1988] предложил «районы осреднения биостатистической информации» в пределах западной части Берингова моря, границы которых проводились с учётом особенностей рельефа дна, распределения водных масс и циркуляции вод моря [Волченко, 2003]. Однако, эти границы, очевидно были дополнены политическими и другими условными границами — видимо, для удобства планирования учётных рыбохозяйственных съёмок и работы с ихтиологическими данными. Позднее они были незначительно изменены [Волченко, 2003; Шунтов и др., 1993]. Л. Коучмен очертил «приблизительные контуры восьми экосистем Берингова моря» [Коучмен, 1990], частично основанные на схеме районов юго-восточного шельфа [Kinder and Schumacher, 1981]. Его подход был развит в схеме Дж. Пиатта и А. Шпирингера [Piatt and Springer, 2007], в пределах которой приводятся ориентировочные границы уже 14 морских экологических районов, а также И. Ортиз с коллегами [Ortiz et al., 2012], в схеме которых выделено 16 районов восточного шельфа моря. Схема «больших морских экосистем» Арктики (включая Берингово море) Программы защиты арктических морских экосистем Арктического совета [PAME, 2013] предусматривает выделение в пределах Берингова моря четырёх крупных регионов, границы которых выбраны на основе генерального обобщения представлений о биоразнообразии моря.

В основу всех этих схем районирования, по всей видимости, был положен принцип естественных районов (ЕР) океана, которые могут быть определены как природные комплексы, формирующиеся за счёт внешнего и внутреннего обмена веществом и энергией, выражавшиеся в анализируемых параметрах [Муромцев и Гершанович, 1986]. Очевидно, что границы этих ЕР в значительной степени условны, поскольку они часто представлены широкими переходными зонами и определяются динамическими процессами, которым свойственна высокая степень сезонной и межгодовой изменчивости [Гершанович и др., 1990]. Более того, границы вышеперечисленных схем совпадают

лишь в исключительных случаях, что связано с различиями исходных баз данных и недостатками экспертных оценок.

Выделение экологических районов в пределах Берингова моря с использованием статистического аппарата и набора баз данных большого объема к настоящему времени выполнено только для восточного шельфа Берингова моря [Baker and Hollowed, 2014]. В этой работе использованы гранулометрические данные донных отложений (2587 станций) и материалы ежегодных стандартных траловых съемок 1982–2012 гг. по распределению температуры и уловов 126 основных видов нектона. Полученная схема экологических районов представляется полезной для анализа изменений в численности и составе сообщества нектона восточного шельфа моря, но, так же как и все остальные существующие схемы, едва ли применима для анализа физических или химических океанологических данных.

Таким образом, можно заключить, что до сих пор отсутствует районирование Берингова моря, отвечающее следующим критериям. 1. Покрытие всей акватории моря. 2. Анализ физических, химических и биологических данных в комплексе. 3. Строгая обоснованность границ районов.

Цель настоящей работы заключается в выделении в пределах Берингова моря и прилегающей части Тихого океана физико-географических районов на основе кластерного анализа среднемноголетних значений гидрологических и гидрохимических параметров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

База данных. Основой для проведения анализа стала база гидролого-гидрохимических данных, которая составлена автором с использованием следующих источников:

1. Набор данных по Мировому океану (WOD) Национального океанографического центра данных США (NODC), объединяющий в себе, в частности, материалы многих съемок Берингова моря и прилегающей части Тихого океана, выполненных в интервале с 1937 по 2009 г. Массив находится в свободном доступе;

2. Результаты совместных экспедиций ВНИРО и ТИНРО 1990–1993 гг., охвативших месяцы с апреля по ноябрь;

3. Данные летних и осенних траловых учётных съемок ТИНРО 2008–2013 гг., в которых выполнялись гидрохимические исследования;

4. Данные экспедиций японского НИС «Murai» и американского проекта BEST-BSIERP, находящиеся в свободном доступе.

База была собрана в виде коллекции океанографических данных в программной среде Ocean Data View 4 (ODV) [Schlitzer, 2015]. База включала в себя данные по температуре (T), солёности (S), растворённому кислороду (O₂), кремнию силикатов (Si-SiO₃²⁻), азоту нитратов (N-NO₃⁻) и фосфору фосфатов (P-PO₄³⁻). Аномалия потенциальной плотности (σ) и потенциальная температура (θ) относительно поверхности рассчитывались средствами ODV. «Флаги качества» данных WOD, отражающие результаты программной проверки данных на достоверность в NODC, во внимание не принимались. Поиск и отбраковка заранее ошибочных значений проводились вручную в ODV по сферическим трапециям 5 × 5° с использованием вертикальных профилей всех основных параметров и диаграмм типа кремний–азот, азот–фосфор, σ -кремний и т.д. Это позволило не только определить наличие «выбросов» в данных, но и проверить соблюдение закономерностей распределения значений одного параметра относительно другого.

Полученная база данных была экспортирована в текстовый формат и проводилась через процедуру обработки средствами авторского алгоритма, реализованного в Сомпраq Visual Fortran, включавшую в себя следующие этапы проверки данных каждой станции:

1. Станции, содержащие всего один горизонт отбора проб, исключались из анализа;

2. Массив данных WOD включал станции, содержащие малое число горизонтов (2–3) с большим интервалом между ними (100–200 м), значения параметров на которых полностью повторялись, и, следовательно, могли быть недостоверны. Причем количество таких станций превышало 2000, что затрудняло их удаление на стадии ручной отбраковки ошибочных значений. Такие станции обнаруживались алгоритмом и также исключались из анализа;

3. При отсутствии нулевого горизонта и при условии, что первый горизонт располагался

выше 11 м, нулевой горизонт искусственно создавался и заполнялся значениями первого горизонта станции. Такой подход обоснован, поскольку верхний квазиоднородный слой (ВКС) в пределах исследуемой акватории почти всюду во все сезоны года составляет больше 10 м [Хен и др., 2015; Panтелейев et al., 2013];

4. При наличии интерполированных значений они исключались из анализа с сохранением тех данных, на основе которых выполнялась интерполяция;

5. Во многих рейсах температура, солёность или растворённый кислород на станциях были получены зондированием водной толщи, но данные некоторых рейсов в полученных нами файлах могли быть представлены в необработанном виде (без фильтрации и осреднения по метровым горизонтам) и, кроме того, не полностью, а лишь вблизи горизонтов отбора проб. Причем, данные по солёности и растворённому кислороду часто содержали пробелы, которые могли попадать непосредственно на горизонт отбора. В таких случаях данные зондирования усреднялись в интервале ± 1 м от горизонта отбора, и среднее значение приписывалось последнему.

В тех случаях, когда концентрации O_2 на горизонте сопровождались значениями температуры и солёности, рассчитывалась растворимость кислорода при данной температуре и солёности по [Weiss, 1977] и вычислялся дефицит/избыток растворённого кислорода относительно растворимости (ΔO_2 , мк-моль/л). В данной трактовке дефицит растворённого кислорода (отрицательные значения ΔO_2) соответствует «кажущемуся потреблению кислорода» (AOU), связанному с окислением органического вещества, а избыток — насыщению воды кислородом больше 100% при интенсивном фотосинтезе.

Созданный в результате такой обработки файл содержит в себе максимально полную и достоверную информацию по распределению основных гидрологических и гидрохимических параметров в Беринговом море и на прилегающей части Тихого океана, полученную на основе всех доступных нам на текущий момент данных прямых наблюдений, выполненных с 1937 по 2013 г. Суммарно это более 14000 станций с измерениями растворённого кислорода и око-

ло 4000 станций с определениями минеральных форм биогенных элементов.

Анализ данных. Анализ пространственно-го распределения океанологических параметров по акватории Берингова моря проводился за летний сезон (с июля по сентябрь включительно). Использование данных других сезонов для целей этой работы затруднительно в связи с высокой временной изменчивостью и физических, и химических свойств вод Берингова моря во время весеннего прогрева вод, сопровождающегося цветением фитопланктона [Whittledge et al., 1986; Yasunaka et al., 2014], и осеннего охлаждения, сопровождающегося перемешиванием [Лучин, 2007].

Для анализа были выбраны горизонты 10 и 50 м. Горизонт 10 м в большинстве случаев находится в пределах продукционного слоя. Распределение параметров на этом горизонте в летнее время отражает протекание продукционных процессов в весенне-летний период. Горизонт 50 м в летнее время, как правило, находится непосредственно под слоем сезонного термоклина или в его нижней части. На этом горизонте изменения концентраций минеральных форм биогенных элементов и относительного насыщения воды кислородом за счёт производственно-деструкционных процессов в период от начала весеннего цветения до осеннего перемешивания незначительны.

Для станций, на которых не выполнялись наблюдения на 10 или 50 м, проводилась линейная интерполяция данных. Значения каждого параметра интерполировались на горизонт 10 м, если имелись данные в слое 0–9 м и в слое 11–26 м, и на горизонт 50 м — при наличии данных в интервалах 34–48 и 52–76 м. Значения параметров на горизонтах 9–11 и 48–52 м приписывались горизонтам 10 и 50 м, соответственно.

В связи с неравномерностью распределения данных во времени и в пространстве, анализировались средние сезонные распределения параметров на указанных горизонтах. Осреднение проводилось по сферическим трапециям (квадратам) $1 \times 2^\circ$ по широте и долготе, соответственно. Расстояние от станции до центра трапеции не учитывалось. Если для одного и того же сезона какого-либо года имелось несколько значений параметра для рассматриваемых горизонтов, сначала вычислялось их сред-

нее, и уже затем проводилось осреднение по годам. Такой подход позволил в равной степени учесть данные лет с большим и малым числом станций в пределах какой-либо сферической трапеции и минимизировать возможное влияние на конечный результат данных аномальных лет с большим числом наблюдений.

Полученные среднемноголетние распределения основных гидрологических (T , $^{\circ}\text{C}$ и S , е.п.с.) и гидрохимических параметров (O_2 , Si-SiO_3^{2-} , N-NO_3^- и P-PO_4^{3-} , мк-моль/л), а также ΔO_2 (мл/л) в летний сезон показали существование градиентных зон в пределах исследуемой акватории. Это косвенно подтверждает наличие в пределах моря относительно обособленных экологических районов, физические, химические и биологические процессы в которых формируют области относительно однородного распределения океанологических характеристик в летнее время.

Для выделения границ районов применялся кластерный анализ (КА) полученных 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 широтно-долготной сетки $1 \times 2^{\circ}$, соответствующих центрам сферических трапеций, по которым проводилось осреднение данных. То есть, КА выполнялся по пространству координат (T_{10} , O_{10} , Si_{10} , P_{10} , T_{50} , O_{50} , Si_{50} , P_{50}), где T , O , Si , P — средние значения температуры, растворённого кислорода, кремния силикатов и фосфора фосфатов за летний сезон, а индексы 10 и 50 обозначают соответствующие горизонты. Солёность не была включена в анализ, поскольку в летнее время на большей части акватории Берингова моря стратификация определяется главным образом температурой. Азот нитратов также был исключен из численного анализа по причине низкой обеспеченности исследуемой акватории соответствующими данными. В анализе использовались все узлы, для которых имелись значения каждого из рассматриваемых параметров, даже если наблюдения какого-либо параметра проводились лишь однократно. Поскольку для некоторых квадратов океанографические данные имелись лишь за отдельные годы, применение условия наличия данных нескольких лет в каждом квадрате значительно сократило бы их количество для последующего анализа.

При проведении анализа предполагалось, что ни один из параметров не зависит от другого линейно, что в общем случае верно. Основные сезонные изменения концентраций растворённого кислорода, кремния и фосфора определяются продуцированием и разложением ОВ. Температура лишь косвенно влияет на продукционно-деструкционные процессы, которые также лишь в первом приближении описываются линейными стехиометрическими соотношениями, так как зависят от множества факторов [Frigstad et al., 2014; Bonachela et al., 2015]. Относительное содержание растворённого минерального кремния и фосфора на горизонтах 10 и 50 м в летний период зависит как от их концентраций в предвегетационный период, так и от балансовых темпов их взаимной ассимиляции и высвобождения из взвешенной формы, варьирующих в широких пределах и определяемых составом автотрофного сообщества. Таким образом, совместный анализ температуры и гидрохимических параметров в значительной степени учитывает протекание биологических процессов. Группировка узлов сетки проводилась по алгоритму Р.Дж. Сампсона [Davis and Sampson, 1973], в котором реализован агломеративный иерархический КА с евклидовым расстоянием в качестве меры различия групп (метрики) и возможностью стандартизовать матрицу входных данных перед началом анализа. Группы объединялись попарно. Значения каждого параметра для вновь сформированной группы вычислялись простым осреднением параметров объединённых объектов (групп). Пороговое значение метрики было выбрано экспертным способом на основе дендрограммы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

КА позволил объединить сферические трапеции в 14 групп (рис. 1). Географическое распределение сгруппированных с помощью КА узлов регулярной сетки, соответствующих сферическим трапециям, приводится на рис. 2. Часть квадратов не попала в анализ из-за малой глубины места, поэтому мелководные области рассматривались отдельно. В центральной части Берингова моря некоторые сферические трапеции не имели данных по биогенным элементам за летний сезон. В нескольких квад-

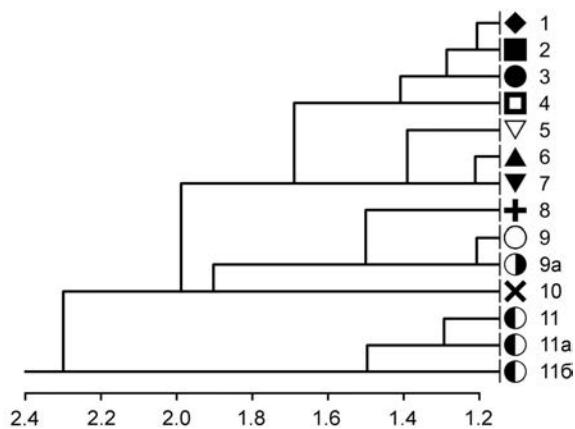


Рис. 1. Дендрограмма группировки узлов регулярной сетки в пределах Берингова моря и прилегающей части Тихого океана

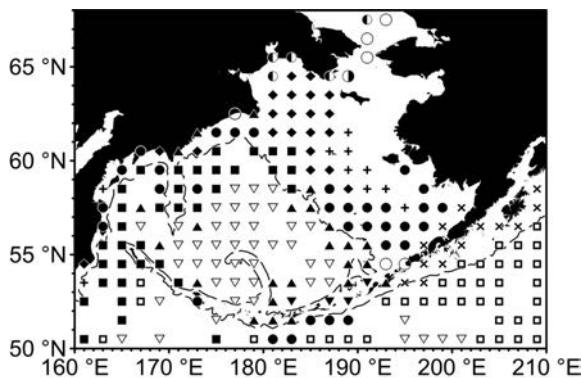


Рис. 2. Распределение сгруппированных кластерным анализом узлов регулярной сетки в пределах Берингова моря и прилегающей части Тихого океана. Прерывистая линия — примерное положение изобаты 2000 м.

Символы каждого из узлов соответствуют символам на рис. 1

ратах приалеутской части Тихого океана нет данных по растворённому кислороду, и во многих — отсутствуют данные по биогенным элементам. Большое количество квадратов глубоководной и западной частей Берингова моря, а также приалеутской части Тихого океана содержит данные по биогенным элементам только за один или два года наблюдений. С этим связана пестрота картины распределения элементов групп в указанных частях исследуемой акватории.

Результаты кластерного анализа. В целом в результате выполнения КА квадраты Берингова моря разделились на несколько крупных кластеров, которые условно соответствовали неретической (см. группы 1–3 на рис. 1 и 2),

океанической (группы 5–7) и мелководной прибрежной областям моря (группы 8, 9 и 11). Многие квадраты, расположенные на западе приалеутской части Тихого океана и находящиеся под влиянием Восточно-Камчатского течения, были отнесены к группе 2, объединившей квадраты западной глубоководной части Берингова моря. Однако, большая часть относящихся к ней квадратов выделились в отдельную группу (№ 4), которая в терминах евклидова расстояния в выбранном пространстве координат ближе к неретическим группам Берингова моря, чем к океаническим.

В пределах неретического кластера Берингова моря выделились три группы: район северной части шельфа, западный глубоководный район и юго-восточный шельфовый район. Такое разделение представляется закономерным, поскольку подтверждается многими предыдущими исследованиями. Например, неретический характер прилегающих к западному шельфу глубоководных районов моря показан ещё в 1950-х гг. Г.И. Семиной [1955] по данным сетного лова фитопланктона. В дальнейшем на более массовом океанологическом материале были показаны относительно малые отличия западного шельфа и прилегающей глубоководной области моря с точки зрения значений температуры и солёности, что объясняется морфометрией шельфа и интенсивностью циркуляции в этой части моря [Верхунов, 1995; Khen, 1999].

Северный шельфовый район отделяется от юго-восточного шельфа многими исследователями. Первый ежегодно покрыт льдом с декабря по май, в то время как в последнем ледяной покров либо не наблюдается, либо держится существенно меньшее время [Frey et al., 2015]. Это определяет различия как в сезонном изменении физических параметров среды, так и в протекании весенних продукционных процессов [Alexander and Niebauer, 1981], что в свою очередь отражается на летних концентрациях минеральных форм биогенных элементов.

Океаническая область Берингова моря в результате КА была разделена на три группы: глубоководный район, район восточного свала глубин, и район Алеутских островов. Все они характеризуются высокими концентрациями минеральных форм биогенных элементов в фотическом слое в летнее время. При этом в глу-

боководном районе это связано не только с возобновлением запаса биогенных элементов во время зимнего перемешивания, но и с низкой продуктивностью, по всей видимости, ограниченной микробиогенными элементами [Aguilar-Islas et al., 2007]. Эту область моря можно отнести к региону с высокими концентрациями биогенных элементов и низким уровнем хлорофилла [Banse and English, 1999]. В районах свала глубин и проливов Алеутской островной дуги высокие концентрации минеральных форм биогенных элементов поддерживаются благодаря турбулентному перемешиванию за счёт интенсивных течений (Алеутского северного и Берингоморского склонового) или приливного перемешивания в проливах [Mordy et al., 2005; Ladd, 2014; Tanaka et al., 2014]. Это обстоятельство также определяет их отличие от глубоководного района по температуре и растворённому кислороду.

К прибрежной мелководной области Берингова моря были отнесены квадраты, относящиеся к району средней области восточного шельфа, и некоторые квадраты в бассейне Чирикова, у корякского побережья и в пр. Унимак. Средняя (центральная) область восточного шельфа выделяется многими исследователями как район, ограниченный прибрежным фронтом с северо-востока и средним шельфовым фронтом с юго-запада [Coachman, 1986; Piatt and Springer, 2007]. Эта область характеризуется ярко выраженной двуслойной структурой, формируемой за счёт ветрового перемешивания поверхностного слоя и приливного перемешивания придонного слоя, что обеспечивает высокую степень стратификации водной толщи [Coachman, 1986]. При этом скорости течений в этом районе низкие [Stabeno et al., 2016], поэтому турбулентное вертикальное перемешивание затруднено, и поверхностные воды лишены притока биогенных элементов в летнее время. Прибрежный район открытой части Тихого океана к югу от п-ва Аляска в выбранной системе координат оказался наиболее близок к прибрежному району Берингова моря.

Кроме того, к мелководной области моря условно были отнесены квадраты прибрежной части Анадырского залива, которые в выбранной системе координат были наиболее далеки от всех остальных районов моря (см. рис. 1).

Это связано с очень низкими среднемноголетними концентрациями растворённого кислорода на горизонте 50 м в летнее время в этом районе. По всей видимости, кислород в придонном слое в северной части Анадырского залива в больших количествах расходуется на окисление поступающего сюда органического вещества [Агатова и др., 2015]. В этом районе также наблюдается денитрификация в придонном слое [Кивва и Чульчеков, 2014].

Выделение экологических районов на основе кластерного анализа. Для Берингова моря и некоторых других регионов Северной Пацифики была показана существенная межгодовая изменчивость в сезонном ходе температуры и химических параметров деятельного слоя [Лучин и Савельев, 1999; Andreev and Watanabe, 2002; 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. Поэтому, принимая во внимание низкую обеспеченность некоторых квадратов данными, выделение районов в пределах рассматриваемой акватории проводилось на основе критической экспертной оценки результатов КА с учётом количества лет с наблюдениями в каждом квадрате. Присоединение квадрата с малым количеством данных к какому-либо району проводилось с учётом особенностей физической структуры вод исследуемой акватории. Кроме того, при выделении границ применялся принцип географической компактности районов.

Полученная схема районов приводится на рис. 3. Нумерация районов соответствует номерам групп, полученным в результате КА (см. рис. 1 и 2, таблица). Схема содержит ряд отличий от географического распределения групп квадратов (см. рис. 2).

Все мелководные участки восточного шельфа (<50 м), не включенные в КА, были отнесены к прибрежному шельфовому району (см. рис. 3, № 12). Такой район выделяется всеми исследователями восточного шельфа. Он характеризуется гомогенной структурой водной толщи, относительным распреснением за счёт материкового стока и относительно низкими концентрациями биогенных элементов [Danielson et al., 2011].

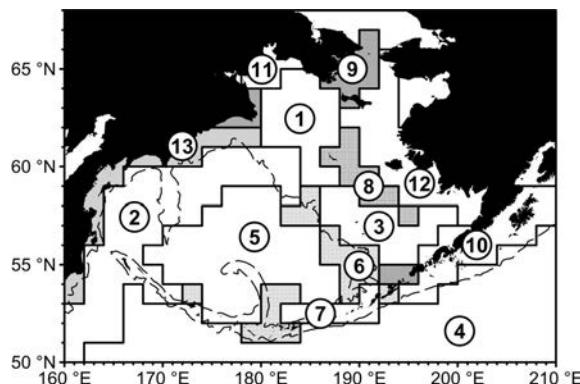


Рис. 3. Схема расположения выделенных районов Берингова моря и прилегающей части Тихого океана. Прерывистая линия — примерное положение изобаты 2000 м. Номера районов такие же, как в таблице

Все квадраты, примыкающие к западному шельфу, были объединены в один район (№ 13). К сожалению, вдоль западного шельфа Берингова моря исследования проводились редко, а пространственная и времененная изменчивость физических и химических характеристик в этой части моря высокая [Khen, 1999]. Кроме того, пространственное разрешение использованной в данной работе регулярной сетки не позволяет анализировать особенности узкого шельфа. Детальное районирование этой части моря остается задачей будущих исследований.

Приалеутская часть Тихого океана объединена в один район, поскольку, по всей видимости, она полностью находится под влиянием тёплого и солёного Аляскинского струйного течения. В нашем анализе это проявилось в восточной части выделенного района, но слабо проявилось в западной, что также связано с малой обеспеченностью района данными. Возможно, более плотное покрытие района данными в будущем позволит разделить его на два.

Район, объединивший в себе западную часть бассейна Чирикова, шельф вокруг м. Наварина и область пр. Унимак характеризуется максимальным поступлением подповерхностных вод в фотический слой. Топографический апвеллинг в бассейне Чирикова отмечался во многих работах [Коучмен и Шигаев, 1992; Уитледж и др., 1992; Дудков, 2010; Hansell et al., 1989; Nihoul et al., 1993; Springer and McRoy, 1993]. Апвеллинг вдоль корякского побережья упоминается в нескольких работах [Хен, 1989; Маркина и Хен, 1990]. В летние месяцы су-

ществование апвеллинга в районе м. Наварина и в западной части Анадырского залива показано Вангом с коллегами [Wang et al., 2009] по результатам численного моделирования циркуляции вод моря. Формирование апвеллинга, по их мнению, происходит за счёт крупномасштабного экмановского переноса. Кроме того, подчёркивается, что этот апвеллинг проявляется и в спутниковых данных по температуре. Позднее натурные наблюдения позволили показать поступление подповерхностных вод на поверхность вдоль корякского шельфа и в западной части Анадырского залива [Kivva and Chulchekov, 2013].

Пролив Унимак представляет собой основной путь проникновения тёплых и относительно пресных вод Аляскинского прибрежного течения в Берингово море. Однако эти воды характеризуются меньшими концентрациями минеральных форм биогенных элементов, чем поверхность воды Берингова моря. Относительно высокие концентрации минеральных форм биогенных элементов к западу и к северу от пр. Унимак объясняются поступлением подповерхностных вод на поверхность в результате действия приливных и непериодических течений в каньоне Беринга [Stabeno et al., 2002].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения настоящей работы была собрана новая, наиболее полная и достоверная база гидролого-гидрохимических данных для Берингова моря, которая позволила получить новые средние многолетние значения гидрологических и гидрохимических параметров в узлах регулярной сетки $1 \times 2^\circ$ за летний сезон. Кластерный анализ полученных значений и экспертная оценка его результатов привели к разделению всей акватории Берингова моря на 13 океанологических районов. В работе показано, что для каждого из выделенных районов характерен относительно идентичный гидрологический и гидрохимический режим, обусловленный особенностями физических и продукционно-деструкционных процессов. Для выделенных районов приводится диапазон полученных среднемноголетних значений температуры, кремния силикатов, фосфора фосфатов и растворённого кислорода на горизонтах 10 и 50 м. Полученное районирование будет использовано для восста-

Таблица. Экологические районы Берингова моря

| № | Название района | Диапазоны среднемноголетних значений [*] | | | | Основные формирующие факторы |
|----|--|---|------------------------|--------------------|-----------------------|---|
| | | T, °C | Si, мкM/л | P, мкM/л | O ₂ , мл/л | |
| 1 | Северный шельфовый район моря | 6,2–7,9 –1,3–1,7 | 2,5–11,3 23,8–50,8 | 0,3–0,6 1,5–2,3 | 7,1–7,8 6,2–7,8 | Ледовый режим [Frey et al., 2015], циркуляция вод шельфа [Stabeno et al., 2016] |
| 2 | Западный глубоководный район моря | 7,2–11,0 1,5–4,2 | 2,9–29,8 27,8–66,0 | 0,2–1,3 1,4–2,3 | 6,4–7,5 6,8–7,6 | Восточно-камчатское течение [Маркина, Хен, 1990], турбулентное перемешивание [Panteleev et al., 2012], обмен вод с шельфом [Верхунов, 1995] |
| 3 | Юго-восточный шельф | 7,2–8,6 0,3–5,5 | 5,4–17,9 14,4–44,3 | 0,4–0,9 1,2–1,8 | 6,8–7,5 6,2–7,3 | Водообмен с глубоководной частью моря [Stabeno et al., 2016] |
| 4 | Приалеутский район Тихого океана | 7,8–11,9 3,7–6,4 | 3,0–50,6 9,2–54,1 | 0,7–1,9 1,4–2,1 | 6,2–7,2 6,2–7,4 | Аляскинское струйное течение [Reed, 1984; Stabeno, Reed, 1994] |
| 5 | Центральный глубоководный район моря | 7,0–9,2 2,8–5,5 | 13,0–48,5 28,0–71,0 | 1,0–1,9 1,5–2,5 | 6,6–7,4 6,6–7,5 | Ламинарный режим течений [Panteleev et al., 2012], ограничение первичной продукции растворенным железом [Aguilar-Islas et al., 2007] |
| 6 | Район южного и восточного свала глубин | 6,7–8,6 3,3–6,0 | 12,7–38,8 34,7–64,0 | 0,6–1,7 1,6–2,1 | 6,7–7,3 6,0–6,8 | Алеутское северное склоновое течение, Берингоморское склоновое течение [Ladd, 2014], турбулентное перемешивание [Ladd et al., 2012; Panteleev et al., 2012] |
| 7 | Район алеутских проливов | 6,3–7,7 4,6–5,8 | 22,9–60,0 34,4–57,0 | 1,6–2,0 1,6–2,3 | 6,3–6,6 5,5–5,9 | Поступление тихоокеанских вод и приливное перемешивание в проливах [Mordy et al., 2005; Stabeno et al., 2005] |
| 8 | Район центральной шельфовой области моря | 5,3–7,6 –1,3–2,2 | 4,1–8,7 11,6–21,4 | 0,4–0,6 0,8–1,4 | 7,1–7,4 7,2–7,9 | Фронтальные системы и двухслойная структура вод [Coachman, 1986] |
| 9 | Районы локальных апвеллингов | 3,4–7,5 0,2–5,6 | 18,1–28,1 21,7–49,8 | 0,8–1,5 0,8–2,5 | 7,1–7,6 6,0–7,4 | Поступление подповерхностных вод в поверхностные слои [Сапожников и др., 2009] |
| 10 | Район шельфа п-ва Аляска | 8,6–11,1 5,2–8,5 | 5,2–19,1 9,8–27,8 | 0,4–0,7 0,6–1,6 | 6,7–7,1 5,5–6,7 | Аляскинское прибрежное течение [Stabeno et al., 2002] |
| 11 | Внутренний район зал. Анадырский | 4,3–5,3 –1,7–1,1 | 11,7–15,7 0,3–65,0 | 0,7–1,3 2,4–2,9 | 7,5–7,7 4,9–5,6 | Холодная придонная водная масса [Гладышев, Хен, 1999], поступление большого количества ОВ в придонный слой [Кивва, Чульчеков, 2014] |
| 12 | Внутренний район восточного шельфа моря | — | — | — | — | Гомогенная структура вод, материковый сток [Danielson et al., 2011] |
| 13 | Западный шельф моря | 5,7–10,1 1,4–3,7 | 4,1–40,8 5,8–64,8 | 0,2–1,3 1,0–2,1 | 6,5–8,0 5,7–7,3 | Водообмен с глубоководной частью моря, шельфовые процессы [Верхунов, 1995; Khen, 1999] |

Примечание. * Приводятся диапазоны среднемноголетних значений указанных параметров за летний сезон для горизонтов 10 и 50 м — в первой и второй строках ячейки таблицы, соответственно. Для района 12 значения не приводятся, поскольку их расчёт для проведения КА не производился (глубина меньше 50 м).

новления сезонного хода гидрохимических параметров и его межгодовой изменчивости в различных районах моря. Результаты работы представляются полезными для выявления закономерностей изменчивости биогеоценозов Берингова моря на климатических масштабах времени.

Автор благодарит сотрудников лаборатории промысловой океанографии ФГБНУ «ТИНРО-Центр», многолетний труд которых привёл к накоплению значительного материала по гидрологии и гидрохимии западной части Берингова моря в 2008–2014 гг., и лично В.И. Матвеева, С.П. Дудкова, А.С. Важкову и Д.Н. Чульчекова. Отдельная благодарность Г.В. Хену и Ю.И. Зуенко за организацию этих работ. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00388 мол_а.

ЛИТЕРАТУРА

- Агатова А.И., Кивва К.К., Торгунова Н.И. 2015. Пространственно-временная изменчивость органического вещества в водах Берингова моря // Океанология. Т. 55. № 2. С. 204–216.
- Булатов О.А. 2004. Минтай (*Theragra chalcogramma*) Берингова моря: размножение, запасы и стратегия управления промыслом. Дисс. ... док. биол. наук. М.: ВНИРО. 379 с.
- Верхунов А.В. 1994. Термохалинны характеристики шельфовых фронтов в западной части Берингова моря // Океанология. Т. 34. № 3. С. 356–369.
- Верхунов А.В. 1995. Роль гидролого-гидрохимических процессов на шельфе Берингова моря в формировании биопродуктивности // Комплексные исследования экосистемы Берингова моря: Сб. науч. трудов. М.: Изд-во ВНИРО. С. 52–79.
- Волченко И.В. 2003. Морфометрические характеристики стандартных биостатистических районов для биоценологических исследований рыболовной зоны России на Дальнем Востоке // Известия ТИНРО. Т. 132. С. 27–42.
- Гангнус И.А., Духова Л.А. 2011. Особенности пространственной изменчивости содержания минеральных форм кремния, азота и фосфора в Российском секторе Арктического бассейна // Материалы XV конференции по промысловой океанологии, посвященной 150-летию со дня рождения академика Н.М. Книповича. 12–17.09.2011. Калининград, Атлант-НИРО. С. 86–88.
- Гершанович Д.Е., Елизаров А.А., Сапожников В.В. 1990. Биопродуктивность океана. — М.: Агропромиздат. 237 с.
- Гладышев С.В., Хен Г.В. 1999. Трансформация придонных осолоненных вод Анадырского залива летом осенью 1995 г. // Метеорология и гидрология. № 6. С. 66–74.
- Дудков С.П. 2010. Межгодовые изменения пространственного соотношения типов вертикальных стратификаций вод на северо-западном шельфе Берингова моря летом 2005–2008 гг. // Известия ТИНРО. Вып. 162. С. 306–323.
- Кивва К.К. 2014. Оценка первичной продуктивности Берингова моря с использованием нового подхода // Труды ВНИРО. Т. 152. С. 73–84.
- Кивва К.К., Чульчеков Д.Н. 2014. Океанологические исследования в западной части Берингова моря в июле–ноябре 2012 г. // Океанология. Т. 54. № 4. С. 574–576.
- Коучмен Л.К. 1990. Экосистема Берингова моря: основные характеристики и перспективы дальнейших исследований // Исследования экосистемы Берингова моря. Вып. 2. Л.: Гидрометеоиздат. С. 20–28.
- Коучмен Л.К., Шигаев В.В. 1992. Шельфовая экосистема: физические аспекты её изучения // Исследование экосистем Берингова и Чукотского морей. СПб.: Гидрометеоиздат. С. 37–63.
- Лучин В.А., Савельев А.В. 1999. Межгодовая и долгопериодная изменчивость вод западной части Берингова моря // Метеорология и гидрология. № 5. С. 91–98.
- Маркина Н.П., Хен Г.В. 1990. Основные элементы функционирования пелагических сообществ в связи с новыми данными о течениях Берингова моря // Известия ТИНРО. Т. 111. С. 79–93.
- Муромцев А.М., Гершанович Д.Е. 1986. Естественные районы Мирового океана // Биотопическая основа распределения морских организмов. М.: Наука. С. 90–108.
- Семина Г.И. 1955. О двух зональных группировках фитопланктона на примере Берингова моря // Докл. АН СССР. Т. 101. № 2. С. 363–366.
- Сапожников В.В., Иванова О.С., Лапин С.А., Мордасова Н.В. 2009. Океанологические предпосылки возникновения локальных апвеллингов в Беринговом море и их выделение по гидролого-гидрохимическим параметрам // Вопросы промысловой океанологии. Вып. 6. № 2. С. 157–172.
- Хен Г.В. 1989. Сезонная и межгодовая изменчивость вод Берингова моря в связи с экологией промысловых объектов: Дисс. ... канд. геог. наук. Владивосток. 150 с.
- Хен Г.В., Басюк Е.О., Матвеев В.И. 2015. Параметры верхнего квазиоднородного слоя и слоя скачка температуры и хлорофилла-а в западной глубоководной части Берингова моря летом и осенью 2002–2013 гг. // Известия ТИНРО. Т. 182. С. 115–131.
- Уитледж Т.Е., Горелкин М.Е., Черняк С.М. 1992. Содержание биогенных элементов в 1988 г. // Исследование экосистем Берингова и Чукотского морей. СПб.: Гидрометеоиздат. С. 75–92.
- Шунтов В.П. 1988. Численность и распределение морских птиц в восточной части дальневосточной экономики // Известия ТИНРО. Т. 162. С. 115–131.

- мической зоны СССР в осенний период. 1. Морские птицы западной части Берингова моря // Зоологический журнал. Т. 67. Вып. 10. С. 1538–1548.
- Шунтов В.П., Волков А.Ф., Темных О.С., Степанова Е.П.* 1993. Минтай в экосистемах дальневосточных морей. Владивосток. ТИНРО. 426 с.
- Aguilar-Islas A.M., Hurst M.P., Buck K.N., Sohst B., Smith G.J., Lohan M.C., Bruland K.W.* 2007. Micro- and macronutrients in the southeastern Bering Sea: Insight into iron-replete and iron-depleted regimes // *Prog. Oceanogr.* V. 73. P. 99–126.
- Alexander V., Niebauer H.J.* 1981. Oceanography of the eastern Bering Sea ice edge zone in spring // *Limnol. Oceanogr.* V. 26. P. 1111–1125.
- Andreev A., Watanabe S.* 2002. Temporal changes in dissolved oxygen of the intermediate water in the subarctic North Pacific // *Geophys. Res. Lett.* V. 29. P. 29–32.
- Baker M.R., Hollowed A.B.* 2014. Delineating ecological regions in marine systems: Integrating physical structure and community composition to inform spatial management in the eastern Bering Sea // *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* V. 109. P. 1–26.
- Banse K., English D.C.* 1999. Comparing phytoplankton seasonality in the eastern and western subarctic Pacific and the western Bering Sea // *Prog. Oceanogr.* V. 43. P. 235–288.
- Bonachela J.A., Klausmeier C.A., Edwards K.F., Litchman E., Levin S.A.* 2015. The role of phytoplankton diversity in the emergent oceanic stoichiometry // *J. Plankton Res.* fbv087.
- Coachman L.* 1986. Circulation, water masses, and fluxes on the southeastern Bering Sea shelf // *Cont. Shelf Res.* V. 5. P. 23–108.
- Danielson S., Eisner L., Weingartner T., Aagaard K.* 2011. Thermal and haline variability over the central Bering Sea shelf: Seasonal and interannual perspectives // *Cont. Shelf Res.* V. 31. P. 539–554.
- Davis J.C., Sampson R.J.* 1973. Statistics and data analysis in geology. New York: John Wiley and Sons. 550 p.
- Falck E., Kattner G., Budus G.* 2005. Disappearance of Pacific Water in the northwestern Fram Strait // *Geophys. Res. Lett.* V. 32. L14619.
- Frey K.E., Moore G.W.K., Cooper L.W., Grebmeier J.M.* 2015. Divergent patterns of recent sea ice cover across the Bering, Chukchi, and Beaufort seas of the Pacific Arctic Region. *Prog. // Oceanogr.* V. 136. P. 32–49.
- Frigstad H., Andersen T., Bellerby R.G.J., Silyakova A., Hessen D.O.* 2014. Variation in the seston C: N ratio of the Arctic Ocean and pan-Arctic shelves // *J. Mar. Syst.* V. 129. P. 214–223.
- Hansell D. A., Goering J.J., Walsh J.J., McRoy C.P., Coachman L.K., Whittlestone T.E.* 1989. Summer phytoplankton production and transport along the shelf break in the Bering Sea // *Cont. Shelf Res.* V. 9. P. 1085–1104.
- Kinder T.H., Schumacher J.D.* 1981. Hydrographic structure over the continental shelf of the southeastern Bering Sea // *The Eastern Bering Sea shelf: oceanography and resources.* V. 1. Department of Commerce, USA. P. 31–52.
- Khen G.V.* 1999. Hydrography of the western Bering Sea shelf water // *Dynamics of the Bering Sea: A Summary of Physical, Chemical, and Biological Characteristics, and a Synopsis of Research on the Bering Sea.* North Pacific Marine Science Organization (PICES). Univ. of Alaska Sea Grant. P. 161–176.
- Kivva K., Chulchekov D.* 2013. 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.
- Ladd C.* 2014. Seasonal and interannual variability of the Bering Slope Current // *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* V. 109. P. 5–13.
- Ladd C., Stabeno P.J., O'Hern J.E.* 2012. Observations of a Pribilof eddy // *Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* V. 66. P. 67–76.
- Mordy C.W., Stabeno P.J., Ladd C., Zeeman S., David P., Salo S.A., Hunt G.L.* 2005. Nutrients and primary production along the eastern Aleutian Island Arc-hipelago // *Fish. Oceanogr.* V. 14. P. 55–76.
- Nihoul J.C.J., Adam P., Brasseur P., Deleersnijder E., Djenidi S., Haus J.* 1993. Three-dimensional general circulation model of the northern Bering Sea's summer ecohydrodynamics // *Cont. Shelf Res.* V. 13. P. 509–542.
- Ono T., Tadokoro K., Midorikawa T., Nishioka J., Saino T.* 2002. Multi-decadal decrease of net community production in western subarctic North Pacific // *Geophys. Res. Lett.* V. 29. P. 3–6.
- Ortiz I., Weisse F., Greig A.* 2012. Marine regions boundary data for the Bering Sea shelf and slope. UCAR/NCAR—Earth Observing Laboratory / Computing, Data, and Software Facility. Dataset. doi, 10, D6DF6P6C. PAME. 2013. Large Marine Ecosystem (LMEs) of the Arctic area — Revision of the Arctic LME Map, 15th of May 2013. PAME International Secretariat. Akureyri, Iceland. — 24 p.
- Panteleev G., Luchin V., Nezlin N.P., Kikuchi T.* 2013. Seasonal climatologies of oxygen and phosphates in the Bering Sea reconstructed by variational data assimilation approach // *Polar Sci.* V. 7. P. 214–232.
- Panteleev G., Yaremchuk M., Luchin V., Nечаев D., Kukuchi T.* 2012. Variability of the Bering Sea circulation in the period 1992–2010 // *J. Oceanogr.* V. 68. P. 485–496.
- Piatt J.F., Springer A.M.* 2007. Marine ecoregions of Alaska // *Spes R.B. (Ed.) Longterm Ecological Change in the Northern Gulf of Alaska.* Elsevier, Amsterdam. P. 522–526.
- Reed R.* 1984. Flow of the Alaskan Stream and its variations // *Deep Sea Res. Part A. Oceanogr. Res.* V. 3. P. 369–386.
- Schlitzer R.* 2015. *Ocean Data View*, odv.awi.de. Springer A., McRoy C. 1993. The paradox of pelagic food webs

- in the northern Bering Sea-III. Patterns of primary production // *Cont. Shelf Res.* V. 13. P. 575–599.
- Stabeno P., Reed R. 1994. Circulation in the Bering Sea basin observed by satellite-tracked drifters: 1986–1993 // *J. Phys. Oceanogr.* V. 24. P. 848–854.
- Stabeno P.J., Danielson S.L., Kachel D.G., Kachel N.B., Mordy C.W. 2016. Currents and transport on the Eastern Bering Sea shelf: An integration of over 20 years of data // *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* In press.
- Stabeno P.J., Kachel D.G., Kachel N.B., Sullivan M.E. 2005. Observations from moorings in the Aleutian Passes: Temperature, salinity and transport // *Fish. Oceanogr.* V. 14. P. 39–54.
- Stabeno P.J., Reed R.K., Napp J.M. 2002. Transport through Unimak Pass, Alaska // *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* V. 49. P. 5919–5930.
- Tanaka T., Yasuda I., Onishi H., Ueno H., Masujima M. 2014. Observations of current and mixing around the shelf break in Pribilof Canyon in the Bering Sea // *J. Oceanogr.* V. 71. P. 1–17.
- Torres-Valdés S., Tsubouchi T., Bacon S., Naveira-Garabato A.C., Sanders R., McLaughlin F. A., Petrie B., Kattner G., Azetsu-Scott K., Whittlestone T.E. 2013. Export of nutrients from the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res. Ocean.* V. 118. P. 1625–1644.
- Tsunogai S., Kusakabe M., Iizumi H., Koike I., Hattori A. 1979. Hydrographic features of the deep water of the Bering Sea — the sea of silica // *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers.* V. 26(6). P. 641–659.
- Wang J., Hu, H., Mizobata K., Saitoh S. 2009. Seasonal variations of sea ice and ocean circulation in the Bering Sea: A model-data fusion study // *J. Geophys. Res.* V. 114. C02011.
- Weiss R.F. 1970. The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater // *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts.* V. 17. No. 4. P. 721–735.
- Whittlestone T.E., Reeburgh W.S., Walsh J.J. 1986. Seasonal inorganic nitrogen distributions and dynamics in the southeastern Bering Sea. *Cont. Shelf Res.* V. 5. P. 109–132.
- Whittlestone T.E., Luchin V.A. 1999. Summary of chemical distributions and dynamics in the Bering Sea // Dynamics of the Bering Sea. University of Alaska Sea Grant, Fairbanks, AK. P. 217–249.
- Woodgate R. A., Weingartner T.J., Lindsay R. 2012. Observed increases in Bering Strait oceanic fluxes from the Pacific to the Arctic from 2001 to 2011 and their impacts on the Arctic Ocean water column // *Geophys. Res. Lett.* V. 39. L24603.
- Yasunaka S., Nojiri Y., Nakaoka S., Ono T., Whitney F. A., Telszewski M. 2014. Mapping of sea surface nutrients in the North Pacific: Basin-wide distribution and seasonal to interannual variability. *J. Geophys. Res. Ocean.* V. 119. P. 7756–7771.
- REFERENCES**
- Agatova A.I., Kivva K.K., Torgunova N.I. 2015. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' organicheskogo veshchestva v vodakh Beringova morya [Spatiotemporal variability of organic matter in the waters of the Bering Sea] // *Okeanologiya.* T. 55. № 2. S. 204–216.
- Bulatov O.A. 2004. Mintay (*Theragra chalcogramma*) Beringova morya: razmnozhenie, zapasy i strategiya upravleniya promyslom. [Walleye Pollock (*Theragra chalcogramma*) of the Bering Sea: reproduction, stocks, and strategy of fisheries management] Diss. ... dok. biol. nauk. M.: VNIRO. 379 s.
- Verkhunov A.V. 1994. Termokhalinnye kharakteristiki shel'fovkh frontov v zapadnoy chasti Beringova morya [Thermohaline characteristics of the shelf fronts in the western Bering Sea] // *Okeanologiya.* T. 34. № 3. S. 356–369.
- Verkhunov A.V. 1995. Rol' gidrologo-gidrokhimicheskikh processov na shel'fe Beringova morya v formirovani bioproduktivnosti [The role of hydrological and hydrochemical processes in the formation of bioproductivity on the Bering Sea shelf] // *Kompleksnye issledovaniya ekosistemy Beringova morya: Sb. nauch. Tr.* M.: Izd-vo VNIRO. S. 52–79.
- Volvenko I.V. 2003. Morfometricheskie kharakteristiki standartnykh biostatisticheskikh rayonov dlya biocenologicheskikh issledovanii rybolovnoy zony Rossii na Dal'nem Vostoke [Morphometric characteristics of standard biostatistical regions for biocenological researches of Russian fishing zone on Far East] // *Izvestiya TINRO.* T. 132. S. 27–42.
- Gangnus I.A., Dukhova L.A. 2011. Osobennosti prostranstvennoy izmenchivosti soderzhaniya mineral'nykh form kremniya, azota i fosfora v Rossiyskom sektore Arktycheskogo basseyna [Features of spatial variability of dissolved inorganic silica, nitrogen, and phosphorus in the Russian sector of Arctic basin] // *Materialy XV konferentsii po promyslovoy okeanologii, posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhdeniya akademika N.M. Knipovicha.* 12–17.09.2011. Kaliningrad, AtlantNIRO. S. 86–88.
- Gershonovich D.E., Elizarov A.A., Sapozhnikov V.V. 1990. Bioproduktivnost' okeana [Bioproductivity of the ocean]. M.: Agropromizdat. 237 s.
- Gladyshev S.V., Khen G.V. 1999. Transformaciya pridonnykh osoloneniykh vod Anadyrskogo zaliva letom-osen'yu 1995 g. [Transformation of bottom salty waters of the Gulf of Anadyr in summer-fall, 1995] // *Meteorologiya i gidrologiya.* № 6. S. 66–74.
- Dudkov S.P. 2010. Mezhgodovye izmeneniya prostranstvennogo sootnosheniya tipov vertikal'nykh stratifikaciy vod na severo-zapadnom shel'fe Beringova morya letom 2005–2008 gg. [Interannual variability of spatial arrangement of the types of vertical thermohaline structure on the northwestern shelf of the Bering Sea in summer-autumn, 2005–2008] // *Izvestiya TINRO.* Vyp. 162. S. 306–323.
- Kivva K.K. 2014. Otsenka pervichnoy produktivnosti Beringova morya s ispol'zovaniem novogo podkhoda [Assessment of primary production in the Bering Sea with new approach] // *Trudy VNIRO.* T. 152. S. 73–84.
- Kivva K.K., Chul'chekov D.N. 2014. Okeanologicheskie issledovaniya v zapadnoy chasti Beringova morya v

- iyule-noyabre 2012 g. [Oceanological Surveys in the Western Part of the Bering Sea] // Okeanologiya. T. 54. № 4. S. 574–576.
- Coachman L.K.* 1990. Ekosistema Beringova morya: osnovnye kharakteristiki i perspektivnye dal'neyshikh issledovaniy [Ecosystem of the Bering Sea: main characteristics and perspectives of future research] // Issledovaniya ekosistem Beringova morya. Vyp. 2. L.: Cidrometeoizdat. S. 20–28.
- Coachman L.K., Shigaei V.V.* 1992. Shel'fovaya ekosistema: fizicheskie aspekty eyo izucheniya [Shelf ecosystem: physical aspects of its investigation] // Issledovanie ekosistem Beringova i Chukotskogo morey. SPb.: Cidrometeoizdat. S. 37–63.
- Luchin V.A., Savel'ev A.V.* 1999. Mezhgodovaya i dolgoperiodnaya izmenchivost' vod zapadnoy chasti Beringova morya [Inter-annual and long-period variability of waters of the western Bering Sea] // Meteorologiya i gidrologiya. № 5. S. 91–98.
- Markina N.P., Khen G.V.* 1990. Osnovnye ehlementy funkcionirovaniya pelagicheskikh soobshchestv v svyazi s novymi dannymi o techeniyakh Beringova morya [Main elements of pelagic communities functioning in relation to new data on currents in the Bering Sea] // Izvestiya TINRO. T. 111. S. 79–93.
- Muromcev A.M., Gershmanovich D.E.* 1986. Estestvennye rayony Mirovogo okeana [Natural regions in the world ocean] // Biotopicheskaya osnova raspredeleniya morskikh organizmov. M.: Nauka. S. 90–108.
- Semina G.I.* 1955. O dvukh zonal'nykh gruppirovakh fitoplanktona na primere Beringova morya [On two zonal groups of phytoplankton, case study of the Bering Sea] // Dokl. AN SSSR. T. 101. № 2. S. 15–30.
- Sapozhnikov V.V., Ivanova O.S., Lapin S.A., Mordasova N.V.* 2009. Okeanologicheskie predposyalki voznoveniya lokal'nykh apvellingov v Beringovom more i ikh vydelenie po gidrologo-gidrokhimicheskikh parametram [Oceanological preconditions of the appearance of local apvellingov in the Bering Sea and their determination in hydrological-hydrochemical parameters] // Voprosy promyslovoi okeanologii. Vyp. 6. № 2. S. 157–172.
- Khen G.V.* 1989. Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' vod Beringova morya v svyazi s ehkologiyey promyslovkh ob'ektorov [Seasonal and inter-annual variability of the Bering Sea waters in relation to the ecology of commercial fish]: Diss. ... kand. geogr. nauk. Vladivostok. 150 s.
- Khen G.V., Basyuk E.O., Matveev V.I.* 2015. Parametry verkhnego kvazidnorodnogo sloya i sloya skachka temperatury i klorofill-a v zapadnoy glubokovodnoy chasti Beringova morya letom i osen'yu 2002–2013 gg. [Parameters of the upper mixed layer and thermocline layer and chlorophyll-a in the western deep basin of the Bering Sea in summer and fall of 2002–2013] // Izvestiya TINRO. Tom 182. S. 115–131.
- Whitledzh T.E., Gorelkin M.E., Chernyak S.M.* 1992. Sozderzhanie biogennykh ehlementov v 1988 g. [Nutrients concentrations in 1988] // Issledovanie ekosistem Beringova i Chukotskogo morey. SPb.: Cidrometeoizdat. S. 75–92.
- Shuntov V.P.* 1988. Chislennost' i raspredelenie morskikh ptic v vostochnoy chasti dal'nevostochnoy ehkonomiceskoy zony SSSR v osenniy period. 1. Morskie pticy zapadnoy chasti Beringova morya [Seabirds abundance and distribution in the eastern part of far-eastern economic zone of the USSR in fall. 1. Seabirds of western Bering Sea] // Zoologicheskiy zhurnal. T. 67. Vyp. 10. S. 1538–1548.
- Shuntov V.P., Volkov, A.F., Temnykh, O.S., Stepanova E.P.* 1993. Mintay v ekosistemakh dal'nevostochnykh morey [Walleye Pollock in ecosystems of the far-eastern seas]. Vladivostok. TINRO. 426 s.

Поступила в редакцию 21.04.2016 г.
Принята после рецензии 25.07.2016 г.

Delineation of ecological regions in the Bering Sea based on oceanographic data

K.K. Kivva

Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSI «VNIRO»)

All available data on dissolved oxygen, silicate, phosphate, and nitrate in the Bering Sea is collected in single data set. Averaging of summer data to $1 \times 2^\circ$ regular latitude-longitude grid bins revealed gradient zones in the sea. Gradients illustrate existence of ecological regions in the sea governed by physical and production-respiration processes. Cluster analysis of multiannual mean values of summer temperature, dissolved oxygen, silicate, and phosphate at 10 and 50 m allowed aggregation of grid bins into 14 groups. Expert assessment of results of cluster analysis allowed delineating the Bering Sea into 13 ecological regions. Resulted region delineation satisfies criteria of (a) coverage of the entire Bering Sea; (b) general representation of physical, chemical, and, at some degree, biological processes within regions; and (c) detailed foundation of the regions margins. Presented delineation may be used for averaging and statistical analysis of natural science data of numerous types and serve as a base for management decisions on sustainable use of natural resources of the sea.

Key words: Bering Sea, data base, temperature, dissolved oxygen, silica silicate, phosphorus phosphate, ecological regions.