

УДК 551.464:629.124.68(268.56)

ВОДНЫЕ МАССЫ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧУКОТСКОГО МОРЯ В АВГУСТЕ 2019 ГОДА И ИХ ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

© 2023 г. К. В. Кодрян¹*, К. К. Кивва¹, В. Л. Зубаревич², А. П. Педченко¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт
рыбного хозяйства и океанографии, Москва, Россия

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*e-mail: angelloka@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.08.2022 г.

После доработки 07.09.2022 г.

Принята к публикации 12.09.2022 г.

Проанализированы гидролого-гидрохимические данные, полученные в августе 2019 г. в Чукотском море во время трансарктической экспедиции на НИС “Профессор Леванидов”. Выделено 6 основных водных масс (ВМ): аляскинская и анадырская прибрежная (АПВ), сибирская прибрежная (СПВ), водная масса, формирующаяся при таянии льда (ТЛВ), беринговоморская летняя (БЛВ), остаточная зимняя (ОЗВ) и атлантическая (АВ) водные массы; описаны их особенности. Выявлено, что для ВМ Чукотского моря характерна высокая изменчивость гидрохимических параметров, в особенности для БЛВ, ОЗВ и АВ. В пределах южного полигона отмечены высокие значения концентраций аммонийного азота в придонном слое, достигающие 12.6 μM . Выделены трансформированные атлантические воды на глубине 117–137 метров, отличающиеся характерными для них значениями солености (от 34.17 до 35.70), но высоким содержанием минерального кремния (93–97 μM), низкими значениями концентраций растворенного кислорода при высоких значениях дефицита кислорода (240–270 μM) и нехарактерно низких значениях величины избытка фиксированного минерального азота относительно фосфора (N^*) (до $-24.0 \mu\text{M}$). Отмечено, что атлантические воды, выделенные на глубинах более 140 м, таких гидрохимических особенностей не имели.

Ключевые слова: Чукотское море, водные массы, структура вод, кремний, фосфор, азот нитратный, азот аммонийный, растворенный кислород, пространственное распределение, денитрификация

DOI: 10.31857/S0030157423020077, **EDN:** NSGIBR

ВВЕДЕНИЕ

Чукотское море – единственная акватория, через которую в Северный Ледовитый океан (СЛО) поступают и в которой трансформируются водные массы тихоокеанского происхождения [23], несущие в СЛО значительное количество минеральных форм основных биогенных элементов [26]. Благодаря этому Чукотское море в целом обладает очень высокой продуктивностью [6, 11, 32]. Средняя величина годовой чистой первичной продукции (ПП) фитопланктона в западной части моря составляет 470 г С/м² год, а в некоторых районах моря превышает 700 г С/м² год [27]. При этом суммарная чистая ПП с учетом вегетации подледных водорослей может быть значительно выше [10].

Как и всем арктическим морям, Чукотскому морю свойственны заметные изменения, связанные с ростом температуры, сокращением площади распространения ледового покрова и его мощности, особенно в течение теплого сезона. При

этом существующие оценки изменения условий среды показывают, что многие последствия климатического воздействия в Чукотском море более ярко выражены, чем в других районах СЛО [9]. Здесь отмечено изменение величины годовой ПП, перераспределение областей наиболее высокой продукции органического вещества (ОВ) в пространстве и сдвиги в сезонной динамике развития сообществ фитопланктона [9, 10] на фоне увеличения поступления относительно теплых, соленых и богатых минеральными питательными веществами тихоокеанских вод в Чукотское море [39], что приводит к постепенному изменению и биоценозов моря. Этот процесс получил название “пацификация”, поскольку по совокупности характеристик условия среды в отдельных районах Чукотского моря становятся близкими к таковым в Беринговом море [31]. Причем подобные изменения наблюдаются не только в пределах Чукотского моря, но и во всем тихоокеанском секторе СЛО.

Таким образом, Чукотское море является важным в экологическом отношении регионом, подверженным существенным изменениям в последние несколько десятилетий. Исследования ВНИРО последних лет показали, что продолжающаяся бореализация моря может привести к росту его рыбохозяйственного значения [4].

Следует отметить, что океанография и, в частности, гидрохимия западной части Чукотского моря (ЗЧМ) на данный момент остается относительно слабо изученной. Комплексные национальные и международные экспедиции, включающие океанографические наблюдения, в Чукотском море охватывали только его восточную часть [19, 25, 28, 40]. Подобных работ в ЗЧМ проводится существенно меньше, и о многих особенностях распределения гидрохимических параметров приходится судить по отрывочным данным. Обобщение материалов наблюдений за последние 20 лет показало, что в ЗЧМ гидрохимические определения проводили только в нескольких экспедициях проекта RUSALCA (2004, 2006, 2009, 2010, 2012 гг.) [29, 30], в единичных рейсах Росгидромета (например, проект “Трансарктика”, 2019 год [1]), а также в ходе нескольких рыбохозяйственных съемок Тихоокеанского филиала ФГБНУ “ВНИРО” (2010, 2018 и 2020 гг; данные не опубликованы). Поэтому обширные гидролого-гидрохимические работы, выполненные ФГБНУ “ВНИРО” на НИС “Профессор Леванидов” в ЗЧМ в августе 2019 года, позволяют существенно дополнить имеющуюся информацию о распределении и изменчивости ВМ и некоторых важнейших химических соединений в пределах исследованной акватории.

Поступление, распространение, трансформация и смешение ВМ играют ключевую роль в формировании облика биотопа. В Чукотское море поступают три ВМ тихоокеанского происхождения: теплая и относительно пресная аляскинская прибрежная водная масса (АПВ), берингоморская шельфовая водная масса и анадырская шельфовая водная масса. При смешении последние две образуют берингоморскую или берингоморскую летнюю водную массу (БЛВ) [7, 12, 30]. Следует отметить, что, по всей видимости, в Анадырском заливе, могут формироваться воды, и по температуре, и по солености очень близкие к АПВ [7, 15]. К сожалению, в настоящее время информации об объеме и особенностях распространения данной ВМ в Чукотском море относительно мало. Для надежного выделения ее в отдельную ВМ необходимо обладать информацией о специфических трассерах (например, о концентрации изотопа кислорода O^{18}). Поэтому в рамках данной статьи мы будем объединять ее с аляскинской прибрежной ВМ и для обозначения этих вод использовать аббревиатуру АПВ.

Из Восточно-Сибирского моря в Чукотское море поступает опресненная материковым стоком сибирская прибрежная водная масса (СПВ), имеющая характерный диапазон температуры от 2.0 до 4.5°C и соленость до 30.5 [7, 30]. Также в пределах Чукотского моря выделяют тихоокеанскую зимнюю воду (ЗВ), формирующуюся в Беринговом и Чукотском морях при льдообразовании в полыньях, в частности, у острова Врангеля. ЗВ обладает низкой температурой (ниже $-1.6^{\circ}C$) и относительно высокой соленостью (от 30.5 до 33.6). Трансформированная за счет сезонного нагрева и перемешивания ЗВ получила название остаточной тихоокеанской зимней водной массы (T от -1.6 до $0^{\circ}C$) [30]. Отдельно выделяют ВМ, ежегодно образующуюся в процессе таяния льда (ТЛВ) [7, 30]. По классификации [3] ей соответствует летняя модификация арктической поверхностной воды Арктического бассейна. В Чукотском море она занимает верхние 10–20 м водной толщи в северной части, имеет относительно низкую температуру (ниже $2^{\circ}C$) и соленость (ниже 32). В северной части Чукотского моря глубже ≈ 150 м может наблюдаться относительно теплая (T выше $-1.26^{\circ}C$) и соленая (S выше 33.6) трансформированная атлантическая водная масса (АВ). Данная ВМ распространяется вдоль материкового склона из западной части Арктики и достигает северной части Чукотского шельфа [29, 38].

Концентрация минеральных форм биогенных элементов в ЗВ и ОЗВ обычно выше, чем в других ВМ Чукотского моря, так как они находятся в тесном контакте с осадками, где происходит разложение ОВ. При длительном контакте с осадками в данных ВМ также формируется минимум кислорода. СПВ обычно выделяется по более высокой концентрации минерального кремния, чем в ТЛВ и АПВ, поскольку имеет вклад материкового стока [30].

Основная цель данной работы – анализ структуры вод российской (западной) части ЧМ и ее гидролого-гидрохимических особенностей летом 2019 г. Задачи исследования включают выделение ВМ по данным СТД-зондирований с учетом гидрохимических параметров, статистический анализ гидрологических и гидрохимических параметров ВМ, выделение характерных и нехарактерных особенностей в распределении ВМ исследуемой акватории.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа основана на данных трансарктической экспедиции ФГБНУ “ВНИРО” на НИС “Профессор Леванидов” [4]. В ЧМ экспедиция работала с 11 по 29 августа 2019 года. Гидролого-гидрохимические работы выполняли на 55 станциях в два этапа (рис. 1). С 11 по 19 августа 2019 года исследовали южную мелководную часть моря, где

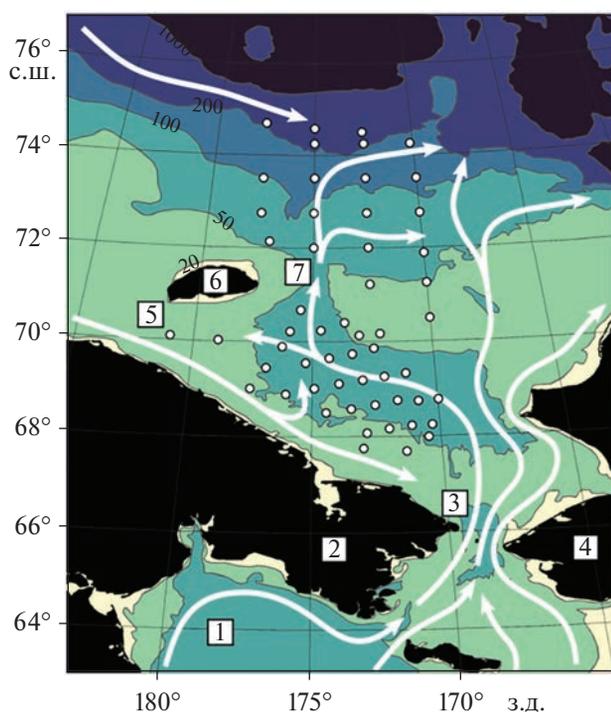


Рис. 1. Схема расположения гидролого-гидрохимических станций НИС «Профессор Леванидов» в Чукотском море. Стрелками обозначены основные течения [30 с дополнениями]. Цифрами обозначены: 1 – Анадырский залив, 2 – Чукотский полуостров, 3 – Берингов пролив, 4 – полуостров Сьюард, 5 – пролив Лонга, 6 – остров Врангеля, 7 – каньон Геральда.

глубины в среднем составляли около 50 м. С 23 по 29 августа работы проводили в северной части моря за пределами изобаты 70 м, наибольшая глубина на полигоне была 252 м. Несколько гидрологических станций были выполнены без гидрохимии; их данные использованы только при построении *TS*-диаграммы.

СТД-зондирования выполняли зондом SBE 19plus V2 SeaCAT Profiler, откалиброванным перед началом рейса. Отбор проб на гидрохимический анализ производили пробоотборником SBE 32 Carousel Water Sampler с кассетой из 12 батометров Нискина емкостью 1.7 л.

Содержание в пробах растворенного кислорода, азота нитритов, азота нитратов, аммонийного азота, растворенного неорганического фосфора, растворенного кремния определяли в судовой гидрохимической лаборатории непосредственно после отбора. Пробы на биогенные элементы отбирали в пластиковые бутылки объемом 0.5 л, на растворенный кислород – в калиброванные склянки. Растворенный в воде кислород определяли методом Винклера (титрование пробы 0.02 N раствором тиосульфата натрия) с помощью цифровой бюретки «Biotrate» (Biohit). Все определения биогенных элементов выполняли по стандарт-

ным методикам [5]. Колориметрирование проводили на спектрофотометре Shimadzu UV-1601PC.

Помимо измеренных параметров в качестве трассеров ВМ в работе использованы расчетные параметры. Величина избытка (недостатка) фиксированного минерального азота относительно фосфора рассчитана по формуле:

$$N^*(\mu\text{M}) = ([\text{NO}_3^-] + [\text{NO}_2^-] + [\text{NH}_4^+]) - 16[\text{PO}_4] + 2.9,$$

где $[\text{NO}_3^-]$, $[\text{NO}_2^-]$, $[\text{NH}_4^+]$ и $[\text{PO}_4]$ – концентрации нитратного, нитритного, аммонийного азота и минерального фосфора в μM соответственно [18, 20, 22]. Данный параметр характеризует отклонение концентрации минерального азота от значения, стехиометрически предсказанного с использованием среднего для Мирового океана соотношения N : P. В частности, он отражает наличие и степень выраженности процессов денитрификации, приводящих к переходу части фиксированного минерального азота в свободную форму, но не затрагивающих напрямую цикл фосфора. Для Чукотского моря характерны отрицательные значения N^* : чем ниже значение, тем больше вклад денитрификации в формирование гидрохимического облика ВМ.

Кажущееся потребление кислорода (КПК, англ. apparent oxygen utilization) рассчитано как разность между растворимостью кислорода при данных значениях температуры и солёности по Вейсу и измеренной концентрацией растворенного кислорода. КПК отражает потребление растворенного кислорода на окисление органического вещества (положительные значения, дефицит кислорода) или выделение кислорода в воду в процессе фотосинтеза (отрицательные значения, пересыщение воды кислородом) и позволяет косвенно судить о степени выраженности этих процессов.

Для получения дополнительной информации о происхождении поверхностных вод рассчитали траектории их движения. В качестве источника информации о скорости течений использовали массив данных COPERNICUS-GLOBCURRENT (https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/MULTIOBS_GLO_PHY_REP_015_004) с пространственным разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ по широте и долготе и шагом по времени 1 сутки. Данный массив получен методом репроцессинга альтиметрической компоненты скорости и модельного Экмановского переноса. Интерполяцию зональную и меридиональную компонент скорости на каждом шаге расчета выполняли методом кригинга. Расчет проводили для каждой станции назад во времени до 1 июня 2019 года или до момента пересечения траекторией берега.

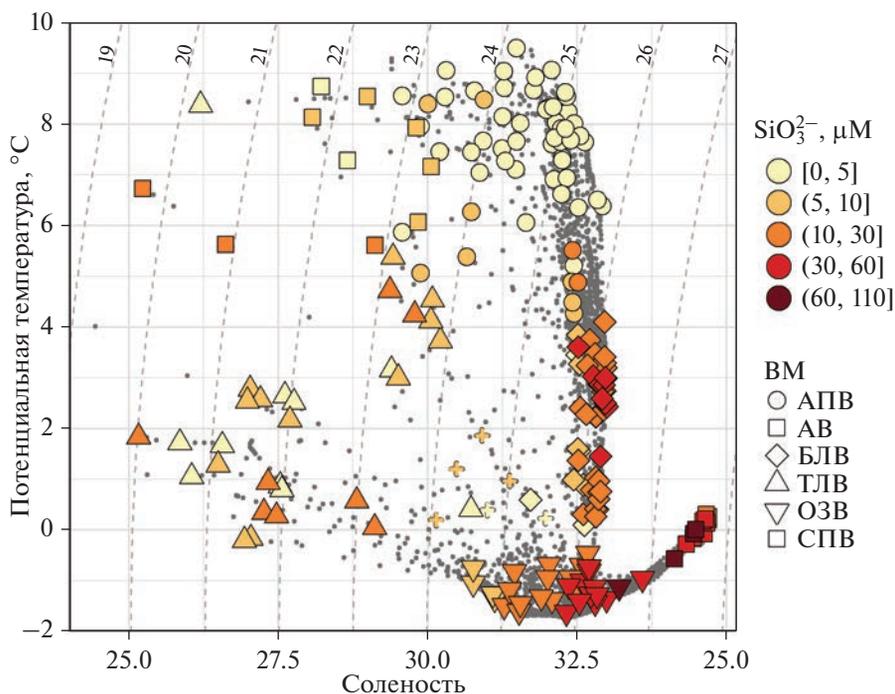


Рис. 2. *TS*-диаграмма. Серые точки – все наблюдавшиеся значения в рейсе в 2019 г. Крупные символы соответствуют пробам воды, в которых проводили определение гидрохимических параметров; цвет символа соответствует концентрации минерального растворенного кремния. Форма символа отражает водную массу.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Водные массы

В поверхностном слое (верхние 10–20 м) в южной части акватории Чукотского моря преобладала относительно теплая АПВ, а в северной – ТЛВ (рис. 2, 3). АПВ характеризовалась соленостью в диапазоне 29.67–32.92, температурой от 4.25 до 9.45 °С и содержанием кремния от 0.3 до 20.5 μМ, медианное значение 1.18 μМ. В августе 2019 года эта водная масса распространялась на север до 73° с.ш. В придонном слое АПВ была обнаружена только на нескольких южных станциях в пределах прибрежной области шельфа.

СПВ встречалась на поверхности в районах, располагающихся вблизи пролива Лонга и к юго-востоку от острова Врангеля (рис. 3). СПВ характеризовалась диапазоном температуры от 1.89 до 8.64 °С и соленостью от 25.17 до 30.06.

Следует отметить наличие на нескольких станциях к северо-востоку от острова Врангеля поверхностных вод, термохалинные характеристики которых не позволяют отнести их ни к одной из ВМ, описанных в литературе. Эти воды имели соленость до 29.7 и содержание кремния от 8 до 10 μМ, что соответствует СПВ, однако более высокую температуру: 5.32–8.60 °С (рис. 2). Кроме того, они располагаются на большом удалении от прибрежной части Восточно-Сибирского моря, где чаще всего наблюдались СПВ [34]. Расчет тра-

екторий движения воды показал, что поверхностные ВМ на этих станциях принесены из района к востоку от о. Врангеля и, несмотря на низкую соленость и высокое содержание кремния, не могли относиться к СПВ, поступающей в Чукотское море из Восточно-Сибирского. Поэтому эти воды мы отнесли к теплой модификации ТЛВ. Таким образом, ТЛВ в августе 2019 г. имела широкий диапазон температуры (от –0.23 до 8.25 °С). Диапазон солености в ТЛВ составил от 25.16 до 30.72.

В южной части Чукотского моря в придонном слое (глубины 20–50 м) преобладала БЛВ. Только на некоторых станциях западной части шельфа вблизи о. Врангеля придонные воды имели характеристики ОЗВ (рис. 3). При этом в северной части Чукотского моря на станциях с глубиной до 130 м в придонном слое преобладала именно ОЗВ.

БЛВ характеризовалась соленостью от 31.72 до 33.00, температурой от 0.9 до 4.1 °С, и значениями кремния от 3.2 до 35.9 μМ (медианное значение 22.5 μМ). Она распространялась на север так же, как и АПВ, до 73° с.ш., но в придонном слое (рис. 3). ОЗВ отличалась от БЛВ более низкой температурой (ниже 0 °С), соленостью от 30.60 до 33.65, более высокой концентрацией кремния – вероятно, из-за контакта с осадками (от 6.7 до 97.2 μМ, медианное значение 29.5 μМ).

На трех станциях на горизонтах 32–80 м при глубине 160–252 м наблюдалась вода с температу-

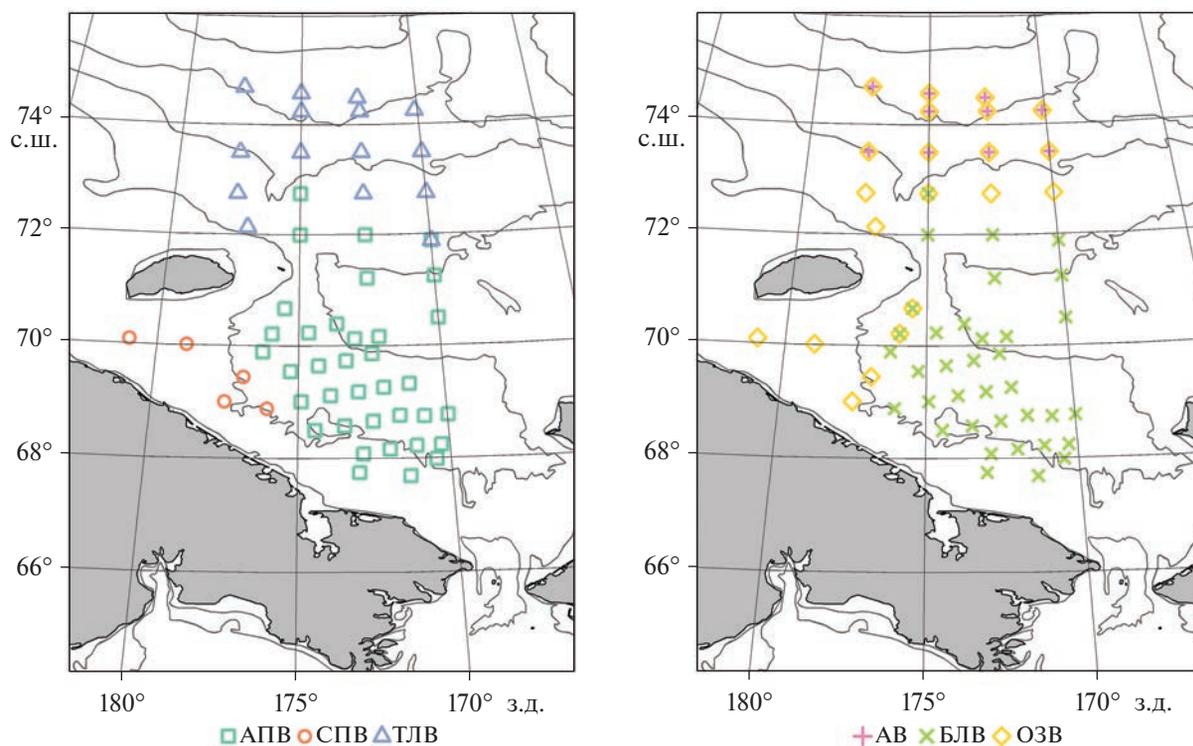


Рис. 3. Распространение водных масс по акватории Чукотского моря в слое над сезонным пикноклином (слева) и под ним (справа) в августе 2019 г. Учтены только горизонты отбора проб.

рой ниже -1.6°C (до -1.64°C), что по классификации ВМ [30] соответствует ЗВ. Однако в данной статье для расчета статистических параметров мы объединили эти воды с ОЗВ.

Отдельно следует отметить, что на одной станции с глубиной 66 м к северу от о. Врангеля в придонном слое наблюдалась очень высокая концентрация кремния ($97.2\ \mu\text{M}$), приуроченная к водам с характеристиками ОЗВ. Эти воды также отличались более низким значением насыщения воды кислородом (37%) по сравнению со станциями, где в придонном слое воды имели характеристики БЛВ. Наличие ОЗВ в северной части Чукотского моря в этот сезон отмечалось и ранее [17, 35]. Сформироваться они могли в результате сильного выхолаживания при образовании полыньи в районе о. Врангеля [29].

На самых глубоких станциях полигона обнаружена водная масса атлантического происхождения. Соленость этих вод находилась в диапазоне от 34.17 до 35.70, а значения температуры составляли от -0.49 до 0.32°C . На трех станциях к северу и северо-востоку от о. Врангеля модификация этой ВМ была обнаружена в придонном слое на 117–137 м, что является нехарактерно близким к поверхности расположением АВ: обычно относительно теплые и соленые атлантические воды наблюдаются на горизонтах глубже 150 м [8]. На этих станциях данная ВМ имела очень высокое

содержание минерального кремния ($93.4\text{--}97.3\ \mu\text{M}$), а также низкое содержание растворенного кислорода ($89.2\text{--}124.9\ \mu\text{M}$) и насыщение воды кислородом (25–34%). В то же время АВ на горизонтах глубже 140 м не имела такой высокой концентрации кремния ($17.3\text{--}53.0\ \mu\text{M}$) и абсолютное и относительное содержание кислорода в этих водах также было выше ($147.18\text{--}245.3\ \mu\text{M}$ и 42–68%, соответственно).

Значения статистик основных океанологических и гидрохимических параметров (медиана, перцентили 5 и 95), характерные для описанных ВМ в 2019 г., обобщены в табл. 1. Рисунок 4 более подробно иллюстрирует изменчивость параметров в пределах выделенных ВМ.

ВМ верхнего слоя водной толщи (АПВ, СПВ, ТЛВ) имели схожие значения концентрации биогенных элементов, в особенности нитратов, содержание которых в поверхностных водах всюду было близко к нулевым значениям (рис. 4). Некоторые различия отмечались в содержании кремния и фосфора: для ТЛВ и СПВ медианное значение содержания кремния было 8.4 и 9.2 μM , а фосфора — около 0.7 μM в обоих случаях. В то же время содержание кремния и фосфора в водах АПВ было заметно ниже (медианные значения 1.2 и 0.4 μM соответственно) (таблица 1). По всей видимости, в Чукотском море азот является биогенным элементом, лимитирующим развитие

Таблица 1. Значения статистик основных океанологических и гидрохимических параметров водных масс Чукотского моря в августе 2019 г. (вверху ячейки медиана, внизу – перцентили 5 и 95)

Параметры/ Водные массы	СПВ	ТЛВ	АПВ	БЛВ	ОЗВ	АВ
Температура, °С	6.86 (2.64; 8.54)	1.25 (-0.14; 4.63)	7.64 (4.87; 8.99)	2.48 (0.36; 3.65)	-1.17 (-1.53; -0.69)	-0.02 (-0.50; 0.28)
Соленость	28.44 (25.21; 29.94)	27.61 (25.86; 30.07)	32.08 (29.88; 32.55)	32.81 (32.51; 32.97)	32.54 (30.76; 33.06)	34.55 (34.28; 34.70)
Кремний, μM	9.18 (2.43; 14.9)	8.39 (3.02; 14.1)	1.18 (0.31; 8.97)	22.5 (5.17; 34.5)	29.5 (7.17; 95.0)	38.0 (22.6; 95.2)
Фосфор, μM	0.67 (0.52; 1.09)	0.71 (0.60; 0.92)	0.43 (0.28; 1.02)	2.12 (1.03; 2.60)	1.90 (0.79; 2.69)	1.57 (1.03; 2.77)
Азот нитратный, μM	0.07 (0.02; 0.12)	0.07 (0.02; 0.20)	0.08 (0.02; 1.18)	10.40 (2.41; 17.7)	11.65 (0.03; 19.0)	15.62 (13.2; 18.1)
Аммонийный азот, μM	0.22 (0.17; 0.45)	0.21 (0.04; 0.48)	0.31 (0.11; 3.96)	8.72 (1.33; 11.3)	0.95 (0.09; 11.2)	0.37 (0.03; 1.46)
КПК, μM	-9.04 (-76.2; 0.10)	-9.46 (-107; 12.4)	-14.1 (-88.2; 25.4)	73.5 (-23.2; 123)	-76.5 (-54.0; 214)	168 (109; 271.)
N^* , μM	-7.67 (-14.3; -4.86)	-7.96 (-10.9; -6.26)	-3.44 (-9.28; -1.21)	-10.10 (-16.2; -4.72)	-13.24 (-19.9; -8.67)	-5.62 (-22.7; 0.42)

фитопланктона, как и во всех шельфовых арктических морях [11], что подтверждается и нашими данными. В поверхностном слое концентрация аммонийного азота составляла от 0.01 до 1.40 μM (среднее значение 0.28 μM).

Диапазон значений концентрации биогенных элементов в ВМ верхнего слоя был менее широким по сравнению с придонным слоем. БЛВ, ОЗВ и АВ отличались очень широким диапазоном значений концентраций биогенных элементов и содержания в воде растворенного кислорода. При этом БЛВ имела менее высокую по сравнению с АВ концентрацию кремния и нитратов: в большинстве случаев она близка по этим параметрам к ОЗВ и в целом содержит больше минерального фосфора, чем ОЗВ и АВ. Отличительная особенность БЛВ – более высокое содержание аммонийного азота на придонных горизонтах, чем в ОЗВ и АВ. При этом параметр N^* имел в БЛВ более высокие значения, чем в ОЗВ. За исключением нескольких нехарактерных станций, которые обсуждаются ниже, в АВ значения N^* были заметно выше (медианное значение -5.62 μM), чем в БЛВ (-10.1 μM) или ОЗВ (-13.2 μM).

В большинстве случаев БЛВ и ОЗВ отличались от АВ по насыщению растворенным кислородом: насыщение кислородом составляло 83 и 79% в БЛВ и ОЗВ, соответственно, и 50% в АВ. Также заметно отличаются значения КПК: в БЛВ и ОЗВ дефицит растворенного кислорода обычно составляет около 70 μM и редко превышает 100 μM ,

в то время как в АВ характерное значение дефицита кислорода составляло 150–170 μM .

ОБСУЖДЕНИЕ

При классификации ВМ мы опирались на обобщение сведений о ВМ, приведенное в статье [30]. Однако известно, что ВМ в Чукотском море свойственна высокая межгодовая и сезонная изменчивость [30]. Поэтому строго придерживаться каких-либо конкретных классификаций ВМ в пространстве координат Θ – S , приведенных в предыдущих исследованиях, некорректно. В нашем случае характерные диапазоны и температуры, и солености для ряда ВМ значительно отличались от приведенных в статье [30]. В частности, БЛВ, распространяющаяся в придонном слое мелководной южной части Чукотского моря, имела температуру до 4–5°C (в предыдущих исследованиях до 3°C [30]) и характеризовалась относительно высоким содержанием минерального кремния (5.17–34.5 μM) (рис. 2). АПВ, распространяющаяся в южной части моря и явно имеющая вклад прибрежных вод Берингова моря, имела температуру до 9.5°C и соленость почти до 33 (в предыдущих исследованиях до 6.2°C и до 32.5, соответственно [30]). Такие особенности могут быть связаны как со сроком выполнения съемки: наши данные получены в середине августа, а рейс RUSALCA в 2009 г. выполнен в сентябре, так и с межгодовой изменчивостью ВМ. Также в августе 2019 г. мы наблюдали воды с температурой выше

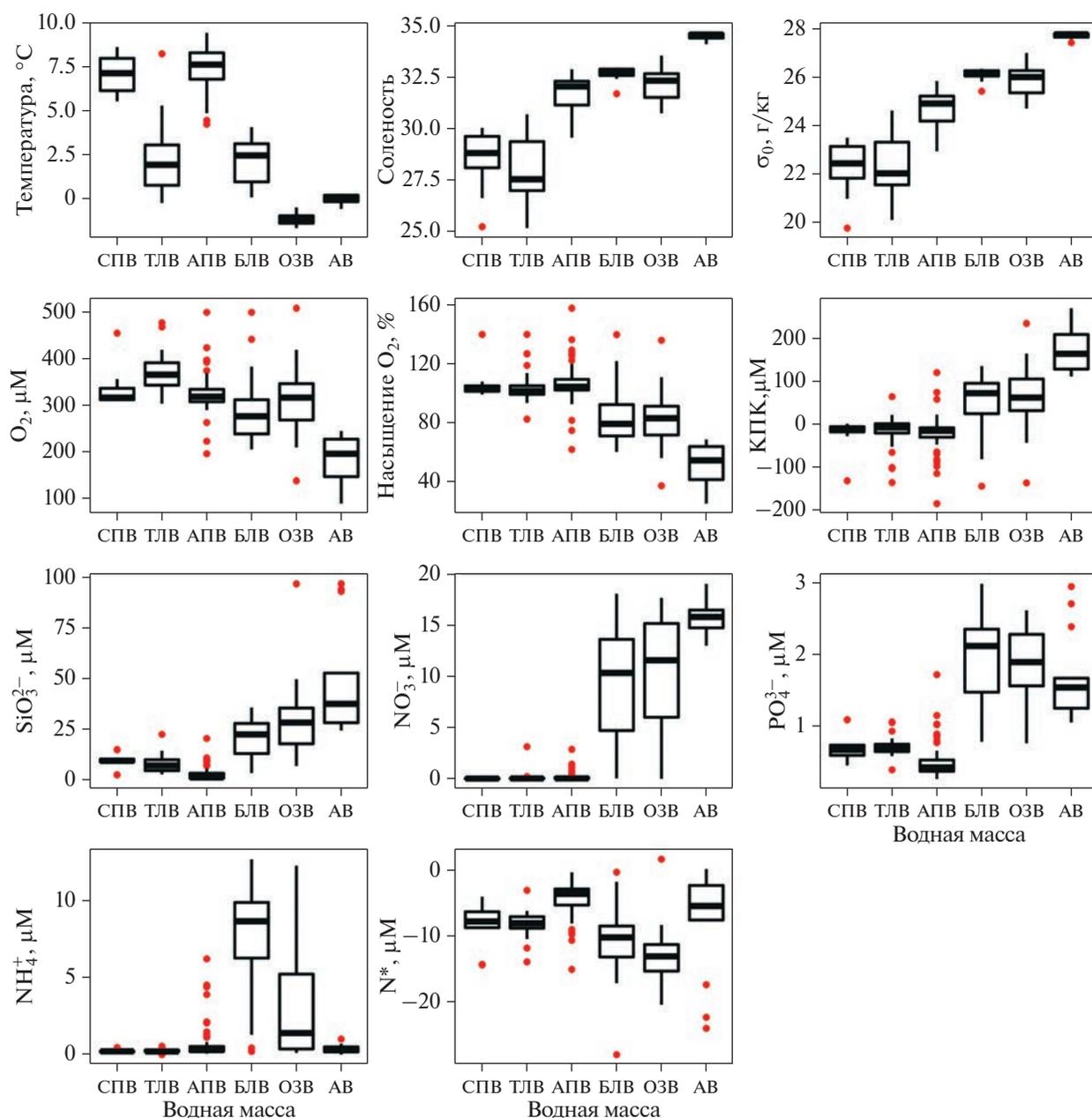


Рис. 4. Диаграммы размаха основных океанологических и гидрохимических параметров водных масс Чукотского моря в августе 2019 г.

4.5°C и соленостью ниже 29.7 (минимальная соленость АПВ, наблюдавшаяся в 2009 г. [30]) и относительно высокой концентрацией минерального кремния (8.28–10.3 μM). В сентябре 2009 г. такой воды вовсе не наблюдали.

Кроме того, многие наблюдаемые нами воды, по которым у нас есть STD или химические измерения, представляют собой смесь водных масс. Поэтому при использовании принятой в данной статье классификации ВМ в дальнейших исследованиях следует обратить внимание на возмож-

ные изменения границ ВМ в пространстве координат Θ –S.

Воды, которые не соответствовали представленным ранее в литературе ВМ, мы отнесли к ТЛВ. Для этих вод было характерно относительно высокое содержание растворенного кремния (8.28–10.3 μM), в то время как для АПВ в поверхностном слое характерны менее высокие значения (0.3–6.9 μM). Траектории их движения с 1 июня 2019 года до момента отбора проб не позволяют отнести их к СПВ. При этом отличительной особенностью этих вод является высокая температу-

ра (4.07–8.25°C). Высокая для ТЛВ температура вод может быть объяснена более интенсивным радиационным прогревом поверхности моря в условиях отчетливо выраженного пикноклина, обусловленного высоким градиентом солености между поверхностным и подстилающим его слоем (26.20–30.05 над пикноклином и >32.50 под пикноклином). Аккумуляция тепла отмечалась в верхнем слое мощностью 10–12 м и не перераспределялась в нижележащие слои. Подтверждением вышесказанного стали данные по сплоченности льда NSIDC NOAA в данной части Чукотского моря в 2019 г. Их анализ показал, что безледный период (пороговое значение концентрации льда 0.15) на акватории исследований начался в июле, чему способствовал интенсивный перенос теплых воздушных масс с Берингова моря [4]. Повышенный тепловой фон приводного слоя атмосферы над акваторией Чукотского моря (положительные аномалии температуры составили от +1.5 до +3°C) мог стать одним из факторов, обусловивших увеличение температуры ТЛВ.

Сравнение поверхностных ВМ

Несмотря на значительные отличия в физических параметрах, по исследованным нами химическим параметрам АПВ, СПВ и ТЛВ в летнее время похожи между собой. Это может объясняться тем, что основной процесс формирования гидрохимического облика всех этих ВМ в летнее время – вегетация фитопланктона. В исследованный период у этих трех ВМ очень близкие характерные значения КПК (медианные значения КПК 9.04–14.10 μM при близких значениях перцентилей 5 и 95, табл. 1), в них близка к аналитическому нулю концентрация нитратного азота. Только АПВ несколько отличается от ТЛВ и СПВ менее высокими характерными значениями концентрации минерального растворенного кремния (медианные значения 1.2, 8.4 и 9.2 μM в АПВ, ТЛВ и СПВ соответственно) и минерального растворенного фосфора (медианные значения 0.43, 0.71 и 0.67 μM в АПВ, ТЛВ и СПВ, соответственно). Менее высокие значения этих параметров в АПВ могут быть связаны с двумя факторами. Во-первых, зимний запас всех основных биогенных элементов в АПВ может быть ниже, чем в СПВ. Во-вторых, такая картина может отражать сезонные особенности ВМ: в АПВ, имеющей южное (берингоморское) происхождение, “цветение” фитопланктона может начинаться раньше, чем в ТЛВ и СПВ, которые дольше находятся подо льдом. Соответственно, к августу в АПВ может наблюдаться более поздняя фаза сукцессии автотрофного сообщества, чем в ТЛВ и СПВ. Несмотря на очень низкие абсолютные значения концентрации минерального азота, в летнее время потребление минерального фосфора и, в случае

присутствия диатомовых водорослей, минерального кремния, не останавливается полностью, а лишь замедляется, если у фитопланктона есть возможность получать минеральный азот за счет его “рециклинга”. Поэтому даже при равных начальных значениях концентраций минеральных форм основных биогенных элементов в ВМ с более ранним началом весеннего “цветения” фитопланктона, общее потребление даже тех элементов, которые не ограничивают продукцию, может быть больше, чем в ВМ с более поздним “цветением”.

Анализ отличий ВМ ниже сезонного пикноклина

АВ, БЛВ и ОЗВ существенно отличаются по возрасту и особенностям трансформации. Существующие оценки показывают, что возраст АВ в диапазоне горизонтов 250–300 м в тихоокеанском секторе СЛО может составлять 10–30 лет [36]. На рассматриваемых нами горизонтах (120–250 м) возраст АВ должен быть несколько меньше за счет перемешивания с окружающими водами, но, по всей видимости, составляет не менее 10 лет [33]. Очевидно, что за столь значительный интервал времени даже при прохождении относительно низкопродуктивных районов СЛО в этой ВМ большое количество растворенного кислорода расходуется на окисление органического вещества и накапливается соответствующее количество минеральных форм биогенных элементов. В то же время в БЛВ и ОЗВ, регулярно обновляющихся за счет зимнего конвективного перемешивания, дефицит кислорода заметно ниже. При этом районы трансформации АВ, БЛВ и ОЗВ, очевидно, несколько отличаются. АВ распространяется, главным образом, с запада на восток вдоль материкового склона на горизонтах глубже 150 м [8, 14]. БЛВ поступает в Чукотское море через Берингов пролив. ОЗВ также поступает в Чукотское море из северной части Берингова моря или формируется из БЛВ непосредственно в Чукотском море. По всей видимости, БЛВ и ОЗВ проводят длительное время на шельфе Чукотского моря в контакте с донными осадками.

Известно, что в придонном слое на мелководных арктических шельфах наблюдаются высокие значения концентрации аммонийного азота [11, 13]. Они связаны с интенсивным поступлением ОВ на дно, формированием гипоксических условий в донных осадках и аммонификацией ОВ в верхнем слое осадков. Например, в августе 2009 года в южной мелководной части Чукотского моря концентрация аммонийного азота в поровых водах верхнего слоя донных осадков достигала 12.1–17.8 μM [2]. По всей видимости, значение этого параметра зависит от потока органического вещества на дно: чем больше органики поступает на единицу пло-

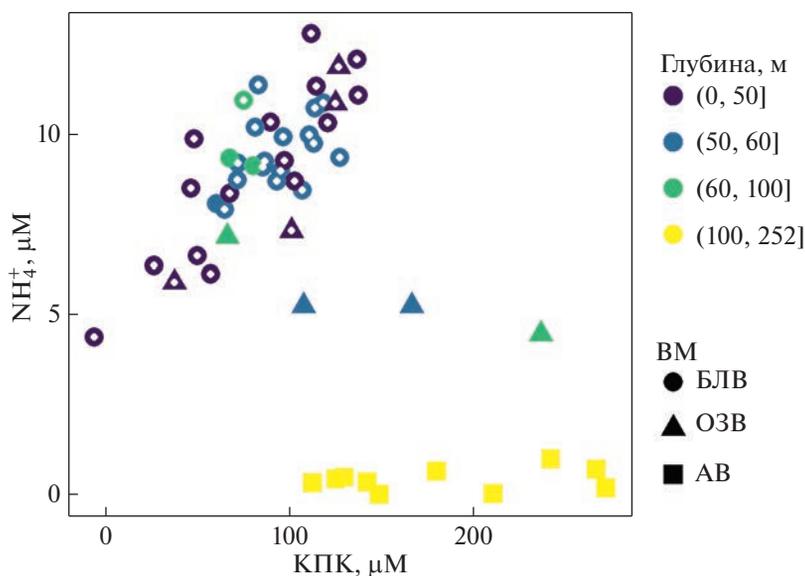


Рис. 5. Связь концентрации аммонийного азота с КПК в придонном слое. Форма символа отражает водную массу, цвет отражает глубину места. Станции, расположенные южнее 72° с.ш., дополнительно отмечены белыми точками в центре символа.

щади дна за единицу времени, тем выше концентрация аммонийного азота.

Имеющиеся оценки позволяют говорить о величинах потока аммонийного азота на границе вода-дно в пределах шельфа ЧМ в летнее время в диапазоне $0.7\text{--}1.2 \mu\text{M}/\text{м}^2$ в день [16, 21]. При этом накопление аммонийного азота в придонном слое происходит именно летом [37]. Очевидно, что, при прочих равных, чем длительнее контакт ВМ с осадками, тем более высокая концентрация аммонийного азота будет наблюдаться в данной ВМ.

Вероятно, именно этими факторами объясняется высокое содержание аммонийного азота в БЛВ в придонном горизонте (максимальное значение $12.6 \mu\text{M}$), которая в основном распространялась в южной мелководной части Чукотского моря. По всей видимости, в этом районе очень высока первичная продукция и велик поток органического вещества на дно, а придонные воды находятся в этом районе достаточно долго для того, чтобы получить значительное количество аммонийного азота из донных осадков. К северу от 72° с.ш. концентрация аммонийного азота почти всюду ниже $5 \mu\text{M}$, что связано, видимо, с меньшим объемом органического вещества, поступающего на дно.

При этом поток растворенного кислорода должен быть направлен в обратную сторону: из воды в донные осадки, и при прочих равных условиях дефицит растворенного кислорода в придонном слое также должен определяться временем контакта ВМ с осадком. В таком случае должна наблюдаться связь между концентрацией аммонийного азота и КПК в придонном слое (рис. 5).

Действительно, к югу от 72° с.ш. наблюдается линейная зависимость между дефицитом кислорода (положительные значения КПК) и концентрацией аммонийного азота. При этом положительные значения КПК соответствуют потреблению кислорода на окисление органического вещества, но могут отражать протекание этого процесса не в водной толще, а в донных осадках. К северу от 72° с.ш., где первичная продукция, по всей видимости, ниже, данная закономерность нарушается. Причем, такая связь строго соблюдалась в БЛВ и полностью отсутствовала в АВ. ОЗВ занимала промежуточное положение: только на пяти станциях из тех одиннадцати, где ОЗВ наблюдалась в придонном слое, диаграмма рассеивания концентрации аммонийного азота и КПК соответствовала такой зависимости.

В августе 2019 года максимальные значения концентрации кремния (более $80 \mu\text{M}$) наблюдались на обширной акватории в придонном слое к северу и северо-востоку от о. Врангеля на глубинах 45–137 м. Эта область была разделена на две части: в центральной части каньона Геральда концентрация кремния достигала лишь $43.5 \mu\text{M}$ на глубине 157 м и была ниже на меньших глубинах (рис. 6). Высокие значения концентрации минерального кремния в придонном слое Чукотского моря объясняются поступлением данного элемента в придонные воды из донных осадков [2]. Очевидно, поток кремния на границе вода-дно при этом несколько различен в разных районах и зависит, главным образом, от общего количества минерального взвешенного кремния, поступающего в осадки. Однако сложно предположить, что

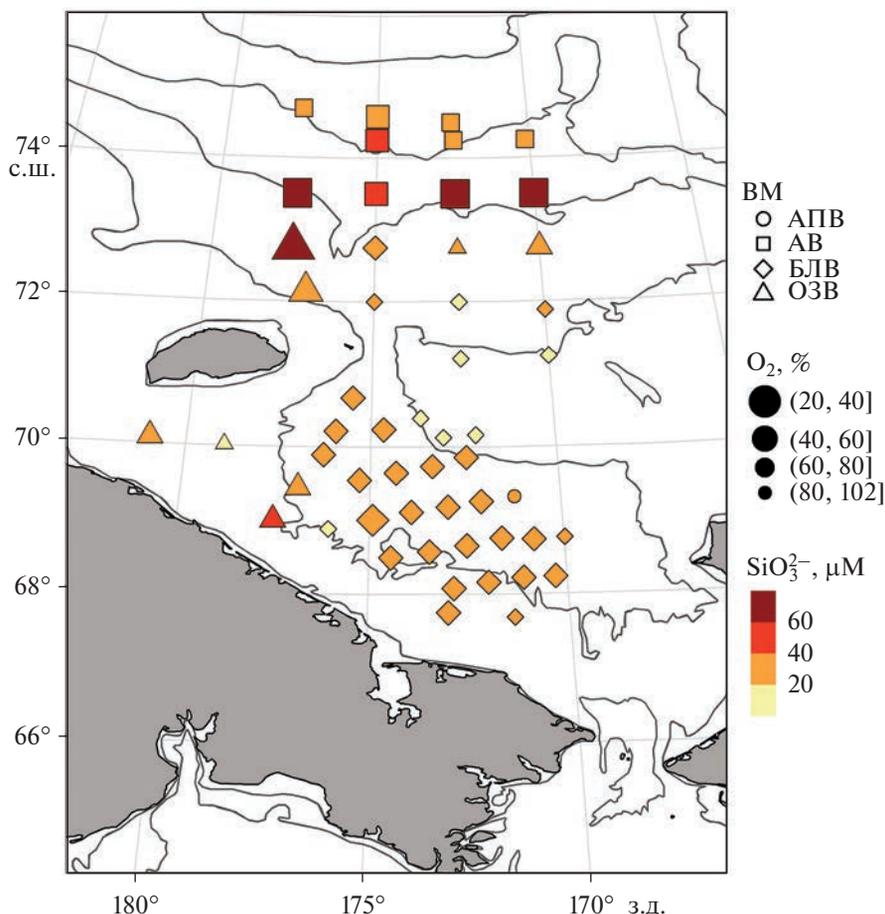


Рис. 6. Распределение кремния (μM , цвет символов) и насыщения воды кислородом (% , размер символов) в придонном слое. Тип символа соответствует водной массе.

вдоль каньона Геральда темпы осаждения кремниевоегo детрита существенно (в 2–2.5 раза) ниже, чем в районах, расположенных по соседству. Величина концентрации кремния в придонном слое зависит также от времени контакта воды с дном. Вероятно, скорость переноса вод в каньоне Геральда заметно выше, чем в его окрестностях, и поэтому в водах, проходящих по его ложу, концентрация минерального кремния не успевает достичь таких высоких значений.

Летом 2019 года наблюдалось нехарактерно близкое к поверхности расположение АВ (117–137 м). АВ на более близких к поверхности горизонтах (80–120 м) примерно в том же районе наблюдали корейские исследователи в 2017 году [24]. Такой необычный подъем АВ к поверхности ими объяснен усилением циклонической атмосферной циркуляции над Евразийским бассейном СЛО и ослаблением антициклонической циркуляции над морем Бофорта.

Необычными особенностями этой трансформированной атлантической ВМ в 2019 г. были нехарактерно высокие для АВ значения concentra-

ции минерального кремния (93–97 μM), низкие значения концентрации растворенного кислорода при высоких значениях КПК (240–270 μM), и нехарактерно низкие значения N^* (до $-24.0 \mu\text{M}$). Максимум кремния сопровождался высоким содержанием нитратного азота (15.7–19.1 μM) и фосфатов (2.26–2.95 μM). Высокий КПК и низкие N^* позволяют заключить, что механизм накопления минерального кремния в этом случае такой же, как и в других придонных ВМ (ОЗВ или БЛВ): обмен с поровыми водами донных осадков [2]. Столь высокая концентрация кремния могла сформироваться за счет длительного нахождения данной ВМ в нехарактерном для нее районе с глубинами 120–130 м, где поток кремния на границе вода–дно относительно высок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По материалам экспедиции НИС “Профессор Леванидов” в августе 2019 г. в результате анализа гидролого-гидрохимических данных на акватории западной части Чукотского моря выделены

6 основных водных масс: АПВ, СПВ, ТЛВ, БЛВ, ОЗВ и АВ.

На поверхности в южной части акватории моря доминировала АПВ, которая прослеживалась до 73° с.ш., а большую часть северной части его акватории занимала ТЛВ. При этом на некоторых станциях в северной части исследуемой акватории отмечали ТЛВ с более высокими значениями температуры 4.07–8.25°C. В юго-западной части моря, в проливе Лонга и на станциях вдоль берегов Чукотки распределялись СПВ. Также как и ТЛВ, эти воды были теплее, чем в предыдущие годы (до 8.6°C). По химическим параметрам АПВ, СПВ и ТЛВ в летнее время были схожи между собой: были хорошо аэрированы и характеризовались низким содержанием биогенных элементов в верхнем однородном слое мощностью 10–20 м. Полученные значения концентрации нитратов в поверхностном слое подтвердили предположение о том, что именно азот лимитирует продукцию фитопланктона в Чукотском море.

В придонном слое южной части Чукотского моря преобладала БЛВ, отличительной особенностью которой было более высокое содержание аммонийного азота на придонных горизонтах (до 12.6 µМ), что связано, видимо, с большим объемом органического вещества, поступающего на дно в южной мелководной части моря. В северной, глубоководной части шельфа имела широкое распределение ОЗВ. На его северной границе зарегистрирована АВ, поступающая в Чукотское море с запада вдоль материкового склона. Примечательно, что на отдельных станциях АВ находилась на глубине 117 м. При этом она отличалась от АВ, наблюдаемой на горизонтах глубже 140 м, высоким содержанием кремния (выше 90 µМ) и аномально низким для данной ВМ содержанием кислорода (≈30%). Максимум кремния в АВ сопровождался высоким содержанием нитратного азота, фосфатов и низким насыщением воды кислородом. Сделано предположение, что формирование максимумов кремния в придонном слое происходит в результате контакта с донными осадками, о чем говорят низкие значения N*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гангнус И.А., Добротина Е.Д., Вязигина Н.А. и др. Гидрохимические исследования арктических морей России в первом и четвертом этапах экспедиции “Трансарктика-2019” // Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики. Тезисы докладов международной научной конференции. 2020. С. 240–243.
2. Леин А.Ю., Саввичев А.С., Русанов И.И. и др. Биогеохимические процессы в Чукотском море // Литология и полезн. ископаемые. 2007. № 3. С. 247–266.
3. Никифоров Е.Г., Шнайхер А.О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 270 с.
4. Орлов А.М., Бензик А.Н., Ведищева Е.В. и др. Рыбохозяйственные исследования в Чукотском море на НИС “Профессор Леванидов” в августе 2019 г.: некоторые предварительные результаты // Труды ВНИРО. 2019. Т. 178. С. 206–220.
5. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промыслов районов Мирового океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
6. Сергеева В.М., Суханова И.Н., Флинт М.В. и др. Фитопланктон западной Арктики в июле–августе 2003 г. // Океанология. 2010. Т. 50. №. 2. С. 203–217.
7. Хен Г.В., Басюк Е.О., Кивва К.К. Водные массы и рыбные сообщества в северо-западной части Берингова и западной части Чукотского морей летом 2003–2010 гг. // Труды ВНИРО. 2018. Т. 173. С. 137–156.
8. Alkire M.B., Rember R., Polyakov I. Discrepancy in the identification of the Atlantic/Pacific front in the central Arctic Ocean: NO versus nutrient relationships // Geophys. Res. Lett. 2019. V. 46. P. 3843–3852. <https://doi.org/10.1029/2018GL081837>
9. Arrigo K.R., van Dijken G.L. Secular trends in Arctic Ocean net primary production // Journal Geophys. Res. 2011. № 116. C09011.
10. Arrigo K.R., Perovich D.K., Pickart R.S. et al. Phytoplankton blooms beneath the sea ice in the Chukchi Sea // Deep-Sea Res. Part II. 2014. V. 105. P. 1–16.
11. Brown Z.W., Casciotti K.L., Pickart R.S. et al. Aspects of the marine nitrogen cycle of the Chukchi Sea shelf and Canada Basin // Deep-Sea Res. Part II. 2015. V.118. P. 73–87.
12. Coachman L.K., Aagaard K., Tripp R.B. Bering Strait: The Regional Physical Oceanography. Seattle: University of Washington Press, 1975. 171 p.
13. Codispoti L.A., Friederich G.E., Sakamoto C.M. et al. Nutrient cycling and primary production in the marine systems of the Arctic and Antarctic // Journal of Marine Systems. 1991. № 2. P. 359–384.
14. Codispoti L.A., Flagg C., Kelly V. et al. Hydrographic conditions during the 2002 SBI process experiments // Deep-Sea Res. Part II. 2005. V.52(24–26). P. 3199–3226.
15. Danielson S., Ahkinga O., Ashjian C. et al. Manifestation and consequences of warming and altered heat fluxes over the Bering and Chukchi Sea continental shelves // Deep-Sea Res. Part II. 2020. V. 177. P. 104781.
16. Devol A.H., Codispoti L.A., Christensen J.P. Summer and winter denitrification rates in western Arctic shelf sediments // Cont. Shelf Res. 1997. V. 17. P. 1029–1050.
17. Gong D., Pickart R.S. Summertime circulation in the Eastern Chukchi Sea // Deep-Sea Res. Part II. 2015. V. 118. P. 18–31.
18. Granger J., Prokopenko M.G., Sigman D.M. et al. Coupled nitrification-denitrification in sediment of the

- eastern Bering shelf leads to 15 N enrichment of fixed N in shelf waters // *Journal Geophys. Res.* 2011. V. 116. P. 11006.
19. *Grebmeier J.M., Cooper L.W., Ashjian C.A. et al.* Pacific Marine Arctic Regional Synthesis (PacMARS) // Final Report, North Pacific Research Board. 2015. 259 pp.
 20. *Gruber N., Sarmiento J.* Global patterns of marine nitrogen fixation and denitrification // *Global Biogeochemical Cycles.* 1997. V. 11. P. 235–266.
 21. *Henriksen K., Blackburn T.H., Lomstein B.A. et al.* Rates of nitrification, distribution of nitrifying bacteria and inorganic N fluxes in northern Bering–Chukchi shelf sediments // *Cont. Shelf Res.* 1993. V. 13. P. 629–651.
 22. *Hirota A., Ijiri A., Komatsu D.D. et al.* Enrichment of nitrous oxide in the water columns in the area of the Bering and Chukchi Seas // *Marine Chemistry.* 2009. V. 116. P. 47–53.
 23. *Jones E.P., Anderson L.G., Swift J.H.* Distribution of Atlantic and Pacific waters in the upper Arctic Ocean: Implications for circulation // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 765–768.
 24. *Jung J., Cho K.-H., Park T. et al.* Atlantic-origin cold saline water intrusion and shoaling of the nutricline in the Pacific Arctic // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. № 6. P. e2020GL090907.
 25. *Kim S.J., Lee Y.K., Cho K.H. et al.* Arctic observation initiatives of Korea Polar Research Institute for monitoring and understanding Arctic climate change // Arctic Observing Summit 2016, Fairbanks, AK.
 26. *Lalande C., Grebmeier J.M., Wassmann P. et al.* Export fluxes of biogenic matter in the presence and absence of seasonal sea ice cover in the Chukchi Sea // *Cont. Shelf Res.* 2007. V. 27. P. 2051–2065.
 27. *Naidu A.S., Cooper L.W., Grebmeier J.M. et al.* The continental margin of the North Bering–Chukchi Sea: distribution, sources, fluxes and burial rates of organic carbon / In: *Stein R., Macdonald R.W.* (Eds) *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. P. 193–204.
 28. *Mueter F.J., Weems J., Farley E. V. et al.* Arctic Ecosystem Integrated Survey (Arctic Eis): Marine ecosystem dynamics in the rapidly changing Pacific Arctic Gateway // *Deep-Sea Res. Part II.* 2017. V. 135. P. 1–6.
 29. *Pickart R.S., Pratt L.J., Torres D.J. et al.* Evolution and dynamics of the flow through Herald Canyon in the western Chukchi Sea // *Deep-Sea Res. II.* 2010. V. 57. P. 5–26.
 30. *Pisareva M.N., Pickart R.S., Spall M.A. et al.* Flow of Pacific water in the western Chukchi Sea: Results from the 2009 RUSALCA expedition // *Deep-Sea Res. I.* 2015. V. 105. P. 53–73.
 31. *Polyakov I.V., Alkire M.B., Bluhm B.A. et al.* Borealization of the Arctic Ocean in Response to Anomalous Advection From Sub-Arctic Seas // *Frontiers in Marine Science.* 2020. V. 7. P. 491.
 32. *Springer A.M., McRoy C.P.* The paradox of pelagic food webs in the northern Bering Sea. III. Patterns of primary production // *Cont. Shelf Res.* 1993. V. 13. P. 575–599.
 33. *Tanhua T., Jones E.P., Jeansson E. et al.* Ventilation of the Arctic Ocean: Mean ages and inventories of anthropogenic CO₂ and CFC-11 // *Journal Geophys. Res.* 2009. V. 114. C01002.
 34. *Weingartner T.J., Danielson S., Sasaki Y. et al.* The Siberian Coastal Current: a wind and buoyancy-forced arctic coastal current // *Journal Geophys. Res.* 1999. V. 104. 29697–29713.
 35. *Weingartner T.J., Dobbins E., Danielson S. et al.* Hydrographic variability over the northeastern Chukchi Sea shelf in summer-fall 2008–2010 // *Cont. Shelf Res.* 2013. V. 67. P. 5–22.
 36. *Wefing A.M., Casacuberta N., Christl M. et al.* Circulation timescales of Atlantic Water in the Arctic Ocean determined from anthropogenic radionuclide // *Ocean Science.* 2021. V. 17. P. 111–129.
 37. *Whitledge T.E., Reeburgh W.S., Walsh J.J.* Seasonal inorganic nitrogen distributions and dynamics in the southeastern Bering Sea // *Cont. Shelf Res.* 1986. V. 5. P. 109–132.
 38. *Woodgate R.A., Aagaard K., Weingartner T.J.* A year in the physical oceanography of the Chukchi Sea: Moored measurements from autumn 1990–1991 // *Deep-Sea Res. Part II.* 2005. V. 52. № 24–26. P. 3116–3149.
 39. *Woodgate R.A.* Increases in the Pacific inflow to the Arctic from 1990 to 2015, and insights into seasonal trends and driving mechanisms from year round Bering Strait mooring data // *Prog. Oceanogr.* 2018. № 160. P. 124–154.
 40. *Yun M.S., Kim B.K., Joo H.T. et al.* Regional productivity of phytoplankton in the Western Arctic Ocean during summer in 2010 // *Deep-Sea Res. II.* 2015. № 120. P. 61–71.

Water Masses in the Western Part of the Chukchi Sea in August 2019 and Their Hydrochemical Features

K. V. Kodryan^{a, #}, K. K. Kivva^a, V. L. Zubarevich^b, A. P. Pedchenko^a

^a*Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, Russia*

^b*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: angelloka@yandex.ru*

The distribution of water masses in August 2019 in the Chukchi Sea, and their hydrochemical features are investigated using shipboard data from the transarctic expedition onboard the R/V Professor Levanidov. The work was carried out in the southern shallow part of the sea and in the northern part of the sea outside the 70-meter isobath. Six main water masses were identified: Alaskan and Anadyr Coastal Water (ACW),

Siberian Coastal Water (SCW), Melt Water (MW), Summer Bering Sea Water (BSW), Remnant Pacific Winter Water (RWW) and Atlantic Water (AW). Their features are described and analyzed. It was revealed that the water masses of the Chukchi Sea are characterized by a high spatial variability of hydrochemical parameters, especially the BSW, RWW and AW. In the southern part of the Chukchi Sea the presence of very high values of ammonium nitrogen in the bottom layer was noted (up to 12.6 μM). In August 2019, transformed AW, typically residing below 150 m, were observed at a depth of 117–137 meters, characterized by salinity values from 34.2 to 35.7, high content of mineral silicon (93–97 μM), low elevated values of apparent oxygen utilization (240–270 μM), and unusually low N^* (a measure of the fixed nitrogen excess relative to phosphorus) values (down to -24.0 μM). At the same time, the AW observed at depths below 140 m did not have such hydrochemical features.

Keywords: Chukchi Sea, water structure, silicon, phosphorus, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, dissolved oxygen, spatial distribution, denitrification, water masses