

ОБЪЕМНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИХООКЕАНСКИХ ВОД В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ

Ж.М. Куликова¹, С.А. Добролюбов²

^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии*

¹ *Аспирант; e-mail: kulikovazh9@gmail.com*

² *Зав. кафедрой, д-р геогр. наук; e-mail: science@geogr.msu.ru*

На основании данных океанографических экспедиций Международного полярного года 2007–2008 гг. (617 станций) были рассчитаны объемные характеристики и время обновления тихоокеанских вод (ТВ) на акватории Северного Ледовитого океана. Установлены характерные изопикнические поверхности, соответствующие их верхней и нижней границам (соответственно 25,5 и 27,5 кг/м³), рассчитана толщина между изопикнами и эквивалентная толщина (т. е. условная толщина нетрансформированной «чистой» водной массы), границы распространения по исчезновению максимума силикатов в выбранном интервале плотностей. Воды тихоокеанского происхождения распространяются на север вплоть до приполюсного района (толщина до 40–50 м), на западе прослеживаются вплоть до северной части моря Лаптевых (толщины 20–30 м), на востоке сохраняются в малотрансформированном виде (толщина более 100 м) вплоть до Канадского Арктического архипелага, для них характерны глубины 50–150 м. Наибольшая толщина ТВ (более 150 м) характерна для круговорота Бофорта. Был оценен общий объем «чистых» (нетрансформированных) тихоокеанских вод на акватории Северного Ледовитого океана, он составил $(197 \pm 19) \cdot 10^3$ км³, или около 1,1% от всего объема Северного Ледовитого океана. Объем тихоокеанских вод с учетом их перемешивания с окружающими водами между выбранными изопикническими поверхностями составил $(313 \pm 16) \cdot 10^3$ км³, что составляет около 1,7% объема Северного Ледовитого океана. С учетом характерного потока ТВ через Берингов пролив их время обновления в Арктическом бассейне оценено в 5–6 лет.

Ключевые слова: тихоокеанские воды, концентрация силикатов, эквивалентная толщина, время обновления

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.12

ВВЕДЕНИЕ

Воды Тихого океана – самые богатые воды в Мировом океане по содержанию биогенных элементов. Они поступают в акваторию Северного Ледовитого океана через неглубокий (около 50 м) и узкий (около 85 км) Берингов пролив и, несмотря на небольшой по сравнению с другими границами океана расход вод (около 1 Свердруп, т. е. 10^6 м³/с, или 11% от общего поступления вод), обеспечивают более половины растворенных силикатов, попадающих в этот бассейн [Torres-Valdés et al., 2013].

Для акватории Берингова пролива и восточных морей Северного Ледовитого океана выделяются различные водные массы тихоокеанского происхождения. Из Берингова моря в Чукотское поступают аляскинская прибрежная, берингоморская шельфовая и анадырская водные массы [Coachman et al., 1975]. Некоторые авторы в западной части Чукотского моря, помимо трех водных масс, поступающих через Берингов пролив, отмечают наличие атлантической, сибирской прибрежной и остаточной зимней тихоокеанской водных масс, отдель-

но рассматривая водную массу таяния льдов. На удалении от Берингова пролива в западной части Чукотского моря выделяют также летнюю берингоморскую водную массу, которая является продуктом перемешивания берингоморской шельфовой и анадырской водных масс [Pisareva et al., 2015, Кодрян и др., 2023]. Для ядра каждой отдельной водной массы тихоокеанского происхождения характерны определенные значения температуры, солености и биогенных элементов, но стоит отметить, что абсолютные значения концентрации силикатов, фосфатов и нитратов различных вод тихоокеанского происхождения в глубоководной части Северного Ледовитого океана в разы больше, чем характерные значения для вод, сформировавшихся непосредственно в Северном Ледовитом океане или пришедших из Атлантики [Torres-Valdés et al., 2013; Русанов и др., 1979]. По этой причине в данной работе для оценки объемных характеристик на основании гидрохимических параметров под «тихоокеанскими водами» подразумеваются все водные массы тихоокеанского происхождения

(берингоморская летняя, зимняя тихоокеанская и т. д.) без разделения.

Воды тихоокеанского происхождения, поступающие через Берингов пролив, распространяются в Чукотском море несколькими путями: основной поток направлен на север, а затем при продвижении он разделяется на несколько ветвей: на северо-восток, северо-запад и запад [Brugler et al., 2014]. Ветви восточного направления прослеживаются вдоль побережья Аляски, тихоокеанская водная масса на этом пути вовлекается в круговорот Бофорта, после циркуляции в котором распространяется на север, попадая в трансполярный дрейфовый поток [Hu et al., 2019]. Стоит отметить, что в отдельные годы может наблюдаться выход тихоокеанских вод на акваторию Евразийского суббассейна к северу от пролива Фрама [Falck et al., 2005].

В условиях меняющегося климата особенно актуальны количественные оценки объемных характеристик и границ распространения тихоокеанских вод в Арктическом бассейне. В последние десятилетия наблюдается явление «бореализации» Северного Ледовитого океана: изменение структуры вод при усилении влияния атлантических и тихоокеанских водных масс [Polyakov et al., 2020]. Роль тихоокеанских вод (особенно летней модификации как более теплой) в изменении поверхностного слоя вод Арктики больше, чем атлантических, по причине их более высокого залегания [Bourgain, Gascard, 2012]. К климатическим изменениям, происходящим в акватории Северного Ледовитого океана, относится, например, увеличение водообмена через Берингов пролив: в период с 1990 по 2015 г. наблюдается усиление потока вод в Северный Ледовитый океан (в 2015 г. он составил 1 Св по сравнению с 0,8 Св в 1990 г.) [Woodgate, 2018]. В результате климатических изменений наблюдается увеличение влияния тихоокеанских вод в целом на акваторию Северного Ледовитого океана, что выражается в увеличении содержания биогенных элементов в слое распространения вод тихоокеанского происхождения восточной части Северного Ледовитого океана [Henpon et al., 2022]. Стоит также отметить, что летние тихоокеанские воды привлекают внимание исследователей по причине того, что они являются источником дополнительного тепла для бассейна Северного Ледовитого океана так же, как и гораздо лучше изученные атлантические воды.

Оценки процентного содержания тихоокеанских вод в Арктическом бассейне по концентрации биогенных веществ (силикаты, фосфаты, нитраты) делались и ранее [Alkire et al., 2015, 2019], но они охватывали отдельные разрезы. Для оценки роли тихоокеанских вод в формировании гидролого-гидрохимической структуры вод Чукотского и Восточ-

но-Сибирского морей и прилегающей части Северного Ледовитого океана важно определить их долю в общем объеме этих акваторий. Количественная оценка объемных характеристик тихоокеанских вод в Северном Ледовитом океане, таких как толщина слоя, эквивалентная толщина вод, их общий объем на исследуемой акватории, а также время их обновления весьма актуальны, поскольку влияние тихоокеанских вод на структуру Северного Ледовитого океана в условиях изменяющегося климата возрастает, изменяется и их роль в бюджете тепла, пресной составляющей и биогенных веществ, росте биологической продуктивности в Арктическом бассейне. Цель предлагаемой работы – оценить объем вод тихоокеанского происхождения и время их обновления в акватории Северного Ледовитого океана.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки объемных характеристик тихоокеанских вод в акватории Северного Ледовитого океана необходимы данные о температуре, солености и гидрохимические параметры (содержание биогенных элементов и растворенного кислорода) по всей исследуемой акватории. В данной работе используются материалы геохимического архива данных, собранные группой ученых Аляскинского университета Фэрбэнкса [Polyakov et al., 2020] с 1 марта 2007 г. по 1 марта 2008 г. Этот период соответствовал четвертому Международному Полярному году, в ходе которого совместными усилиями научных сообществ разных государств было проведено несколько экспедиций в акватории Северного Ледовитого океана и прилегающих морей. Для получения репрезентативных результатов были использованы данные одного года, так как в этот период было выполнено наибольшее число станций в исследуемом районе по сравнению с другими годами. На рис. 1 представлены станции, содержащие данные как по гидрофизическим, так и по гидрохимическим параметрам. Общее количество исследуемых станций составило 617, на каждой станции были измерены температура, соленость, концентрация биогенных элементов (растворенных силикатов, нитратов и фосфатов), а также содержание растворенного кислорода на стандартных горизонтах.

Подготовка данных производилась с помощью программ, написанных на языке программирования Python, после чего с помощью программного обеспечения ArcMap, Ocean Data View и Surfer полученные результаты были представлены в виде графических материалов. Для выявления и отслеживания тихоокеанских вод использовались как гидрофизические (температура, соленость и аномалия потенциальной плотности), так и гидрохимические параметры, среди которых основное внимание

было уделено содержанию растворенных силикатов. Сезонная изменчивость содержания силикатов, вызванная их вовлечением в биологический круговорот, в данной работе не учитывалась. Оценка объемных характеристик вод тихоокеанского происхождения производилась на основании абсолютных концентраций силикатов.

Для оценки объемных характеристик тихоокеанских вод необходимо определить вертикальные и горизонтальные границы их распространения на исследуемой акватории, для этого были применены методы изопикнического анализа и T, S -анализа [Мамаев, 1987; Добролюбов, Соков, 2002]. Была рассчитана эквивалентная толщина (формула) не-

трансформированных тихоокеанских вод по натурным данным для стандартных горизонтов в пределах вертикальных границ слоя исследуемых вод.

$$ET = \frac{\Delta h (Si_{mean} - Si_{west})}{Si_{source} - Si_{west}},$$

где ET – эквивалентная толщина, м; Δh – толщина слоя между изопикнами, соответствующими верхней и нижней границам, м; Si_{mean} – среднее значение силикатов в слое, мкмоль/л; Si_{west} – характерное содержание силикатов для вод западной части Северного Ледовитого океана без влияния тихоокеанских вод, мкмоль/л; Si_{source} – содержание силикатов в Беринговом проливе как источнике тихоокеанских вод, мкмоль/л.

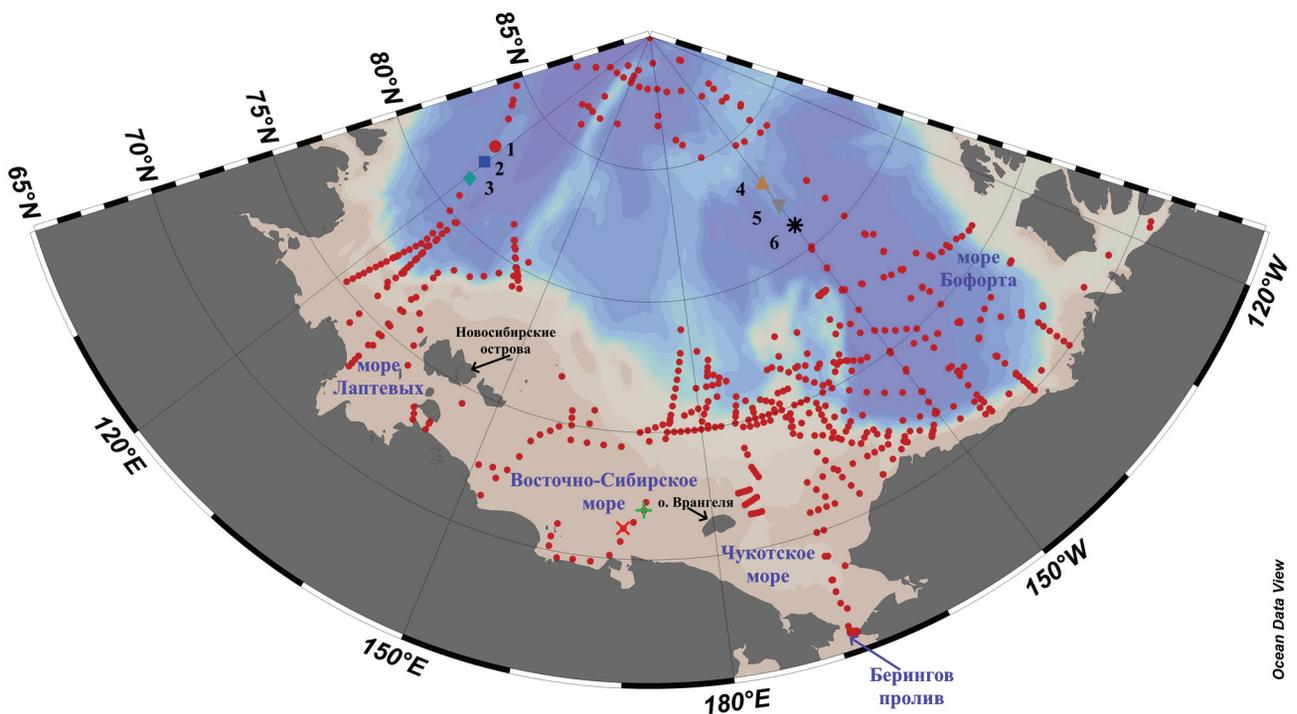


Рис. 1. Карта-схема станций 2007–2008 гг.

Fig. 1. Scheme of the stations in 2007–2008

В районах мелководий, где придонные значения плотности менее выбранных в качестве нижней границы значений, величина Δh определялась между выбранной верхней границей и положением дна.

Для расчета объема нетрансформированных тихоокеанских вод на акватории их распространения эквивалентные толщины умножались на соответствующие каждой станции площади квадратов регулярной сетки. Сравнение объемов тихоокеанских вод со среднегодовым расходом через Берингов пролив дает возможность определить и время их обновления на акватории Северного Ледовитого океана.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эталонные содержания силикатов в акватории Северного Ледовитого океана без влияния тихоокеанских вод (для расчета эквивалентной толщины) Si_{west} были определены с использованием вертикальных распределений растворенных силикатов по изопикническим поверхностям (рис. 2). В источнике с наибольшим количеством нетрансформированных тихоокеанских вод содержание силикатов Si_{source} было определено с помощью анализа станций в Беринговом проливе. Средние значения содержания силикатов в Беринговом проливе экспертно

выбраны по натурным данным и в летний период варьируют от 25 до 35 мкмоль/л, в зимние месяцы – от 30 до 40 мкмоль/л.

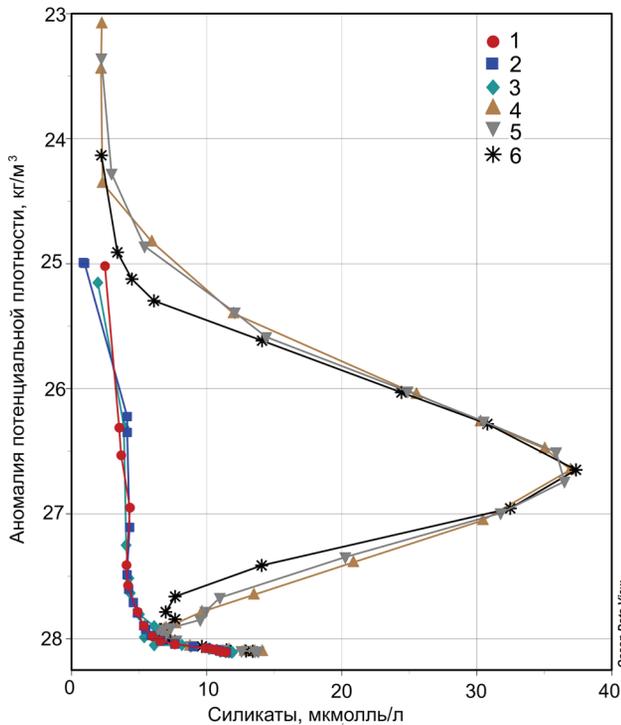


Рис. 2. Вертикальные распределения силикатов по изопикническим поверхностям в западной и восточной частях исследуемой акватории.

Положение станций отмечено более крупными символами и цифрами на разрезах вдоль 120° в. д. и 150° з. д. на рис. 1

Fig. 2. Vertical distributions of silicates on isopycnal surfaces in the western and eastern parts of the Arctic Ocean.

The positions of stations are marked with larger symbols and numbers at the sections along 120° East and 150° W in Fig. 1

Слой вод тихоокеанского происхождения вне источника залегает между изопикническими поверхностями $25,5$ и $27,5$ $\text{кг}/\text{м}^3$. В гидрологической структуре вод морей Северного Ледовитого океана эти изопикны примерно соответствуют глубинам от 50 до 150 м. Наибольшее содержание силикатов ($35\text{--}40$ мкмоль/л) отмечается на изопикнической поверхности $26,5$ $\text{кг}/\text{м}^3$, повышенные значения характерны для моря Бофорта, в частности для акватории, прилегающей к круговороту Бофорта.

На первом этапе оценки объемных характеристик был рассчитан общий объем тихоокеанских вод в акватории Северного Ледовитого океана по толщине слоя между изопикническими поверхностями, соответствующими верхней и нижней границам исследуемых вод, соответственно $25,5$ и $27,5$ $\text{кг}/\text{м}^3$ (рис. 3). Тихоокеанские воды распространяются на север вплоть до приполюсного района

(толщина до $40\text{--}50$ м), на западе прослеживаются вплоть до северной части моря Лаптевых (толщины $20\text{--}30$ м), на востоке сохраняются в малотрансформированном виде (толщина более 100 м) вплоть до Канадского Арктического архипелага. Небольшие толщины в южной части акватории вблизи Берингова пролива определяются малыми глубинами акватории. Положение границы распространения этой водной массы восточнее 120° з. д. в рамках съемок 2007–2008 гг. установить весьма затруднительно, но основной объем тихоокеанских вод имеющимися станциями охватывается.

На рис. 4 представлена эквивалентная толщина тихоокеанских вод на акватории Северного Ледовитого океана в 2007–2008 гг. Отношение эквивалентной толщины к толщине слоя вод тихоокеанского происхождения отражает степень трансформации данной водной массы. На более мелководных акваториях, особенно вблизи Берингова пролива, где значения силикатов во всей толще вод близки к наибольшим, она приближается к глубине места. Далее к северу в границах избранных изопикнических поверхностей от $25,5$ до $27,5$ $\text{кг}/\text{м}^3$ (что в среднем соответствует глубинам от 50 до 150 м) слой тихоокеанских вод трансформируется до тех пор, пока воды в процессе перемешивания не потеряют свой отличительный признак – наибольшие значения концентрации силикатов. Из сравнения рисунков 3 и 4 видно, что фактическая толщина слоя тихоокеанских вод больше, чем эквивалентная толщина ET , поскольку здесь представлена величина Δh из формулы (1), которая при расчете ET умножается на величину меньше 1.

По данным 2007–2008 гг. тихоокеанские воды распространяются в восточном направлении вплоть до Канадского Арктического архипелага, а в западном направлении вдоль материкового склона они проникают до 174° з. д. В северном направлении не выделяется какой-либо отчетливой струи распространения тихоокеанских вод, однако стоит отметить, что тихоокеанские воды попадают в круговорот Бофорта и циркулируют в нем, после чего часть вод тихоокеанского происхождения покидает круговорот и распространяется в северном направлении (к полюсу). Наибольшая толщина слоя нетрансформированных тихоокеанских вод также соответствует акватории моря Бофорта в целом и участкам круговорота Бофорта в частности, что обусловлено как рельефом дна акватории, так и вовлечением тихоокеанских вод в круговорот Бофорта. Поскольку в 2007 г. отмечено рекордное сокращение ледового покрова, наблюдались тесно связанные с ним интенсификация круговорота Бофорта и заглужение тихоокеанских вод [Kenigson et al., 2021].

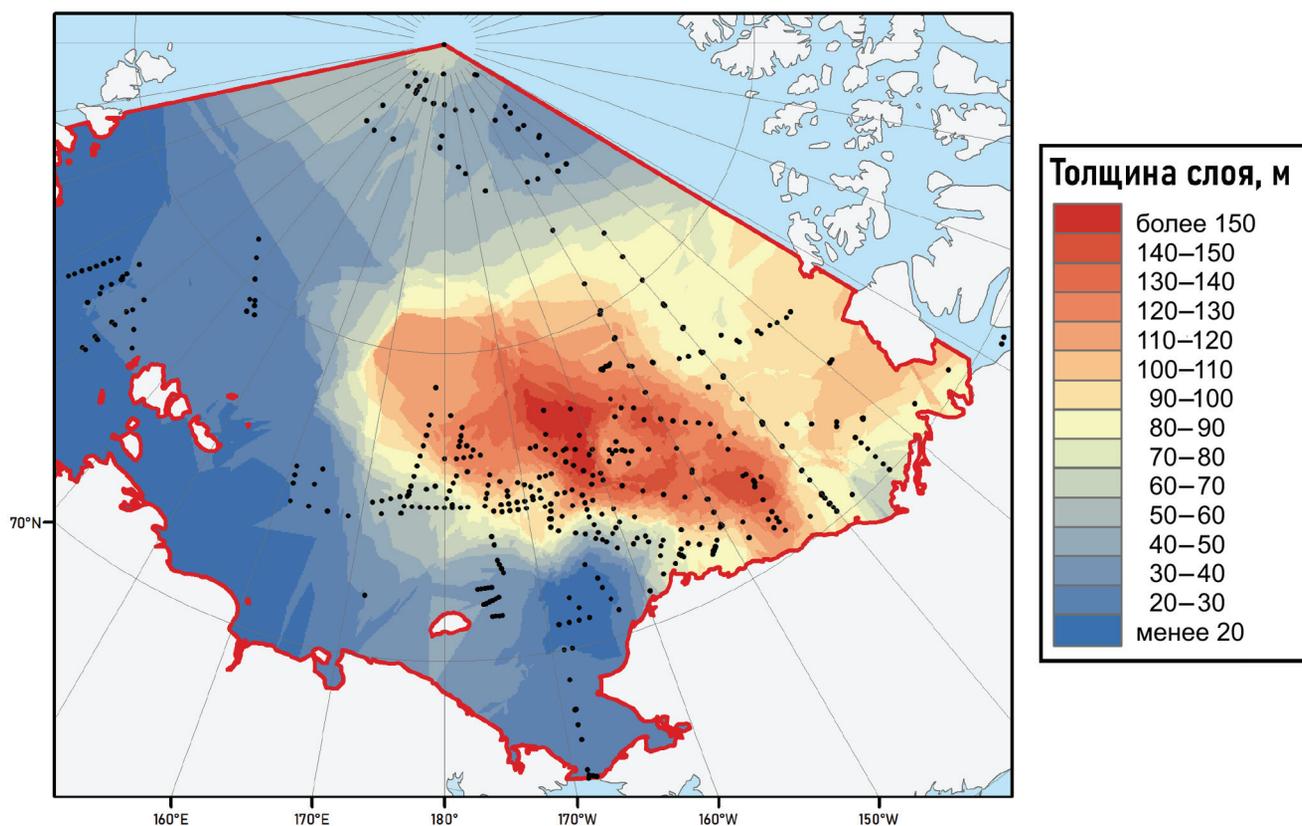


Рис. 3. Карта-схема распределения толщины слоя тихоокеанских вод на акватории Северного Ледовитого океана между изопикническими поверхностями 25,5 до 27,5 кг/м³

Fig. 3. Distribution of the thickness of Pacific waters in the Arctic Ocean between isopycnal surfaces of 25,5 to 27,5 kg/m³

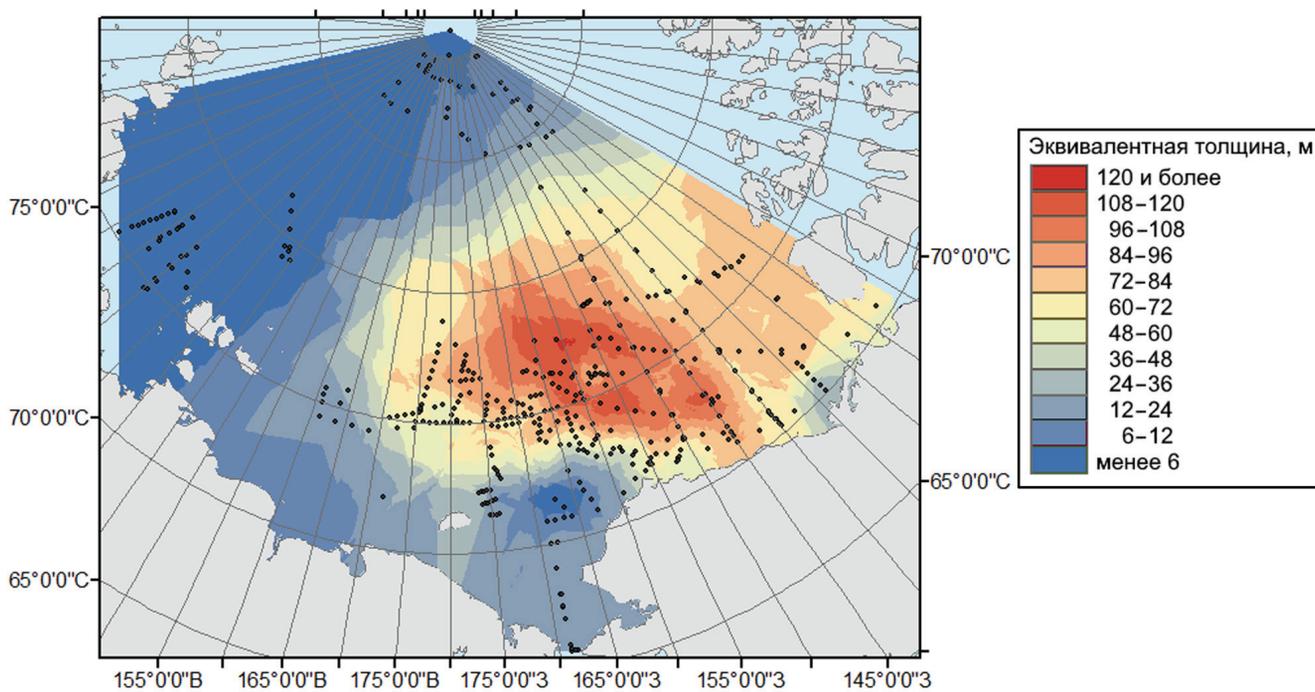


Рис. 4. Карта-схема распределения эквивалентной толщины тихоокеанских вод на акватории Северного Ледовитого океана

Fig. 4. Distribution of the equivalent thickness of Pacific waters in the Arctic Ocean

При использовании полученных эквивалентных толщин также были рассчитаны объемы тихоокеанской водной массы на акватории Северного Ледовитого океана для узлов регулярной сетки с использованием площадей относящихся к ним сферических квадратов. Чтобы оценить ошибку полученных объемов, значения Si_{mean} в формуле (1) проварьированы в пределах ± 5 мкмоль/л, значения Si_{west} – ± 2 мкмоль/л, а ошибка значений Δh принималась равной половине расстояния между стандартными горизонтами (12,5 м), умноженной на $\sqrt{2}$.

В результате был получен общий объем 100%-ных (нетрансформированных) тихоокеанских вод в акватории Северного Ледовитого океана. Он составил $(197 \pm 19) \cdot 10^3 \text{ км}^3$, что соответствует 1,1% от всего объема Северного Ледовитого океана. Толщина слоя тихоокеанских вод между изопикническими поверхностями также была использована для расчета объема тихоокеанских вод, подвергшихся трансформации. Их объем равен $(313 \pm 16) \cdot 10^3 \text{ км}^3$, что составляет около 1,7% объема всего Северного Ледовитого океана.

Полученные объемы можно использовать для расчета примерного времени обновления тихоокеанских вод на акватории Северного Ледовитого океана. Среднегодовой расход через Берингов пролив в период с 1 марта 2007 г. по 1 марта 2008 г. составил 1,0 Св [Woodgate, 2017]. При таких значениях время обновления нетрансформированных тихоокеанских вод в акватории Северного Ледовитого океана составит около шести лет. Однако, учитывая наблюдающееся в последние годы увеличение расхода через Берингов пролив до 1,2 Св, найденный объем «чистой» тихоокеанской воды будет обновляться примерно за пять лет. При дальнейшем увеличении расхода в будущем время обновления также будет сокращаться, однако необходимо учитывать возможное увеличение общего объема тихоокеанских вод в акватории Северного Ледовитого океана, которое может произойти при интенсификации круговорота Бофорта за счет повышения приповерхностной тем-

пературы воды в районе исследования и связанного с ним уменьшения объема морского льда.

ВЫВОДЫ

Проведенные по данным подробной океанографической съемки 2007–2008 гг. расчеты позволили оценить границы распространения и объемные характеристики тихоокеанских вод в Северном Ледовитом океане. Поскольку эти воды не имеют выраженных наибольших или наименьших значений температуры и солености, в качестве основного признака их присутствия на рассматриваемой акватории выбрана концентрация растворенных силикатов. Установлены характерные изопикнические поверхности, соответствующие их верхней и нижней границам (соответственно 25,5 и 27,5 кг/м³), рассчитана толщина между изопикнами и эквивалентная толщина (т. е. условная толщина нетрансформированной «чистой» водной массы), границы распространения по исчезновению максимума силикатов в выбранном интервале плотностей. Наибольшие значения толщины слоя вод тихоокеанского происхождения (как эквивалентной, так и фактической) наблюдаются в районе моря Бофорта и для периода наблюдений составляют до 120 и 160 м соответственно. Благодаря полученным данным по толщине слоя были рассчитаны объемы нетрансформированных и трансформированных тихоокеанских вод. По натурным данным 2007–2008 гг. объем нетрансформированных вод составил $(197 \pm 19) \cdot 10^3 \text{ км}^3$ (около 1,1% от объема вод Северного Ледовитого океана), период обновления вод тихоокеанского происхождения составил шесть лет. Объем фактических тихоокеанских вод в то же время составил $(313 \pm 16) \cdot 10^3 \text{ км}^3$ (около 1,7% общего объема океана). С наблюдающимися климатическими изменениями расходов вод в Беринговом проливе время обновления нетрансформированных тихоокеанских вод в акватории Северного Ледовитого океана может сократиться до пяти лет.

Благодарность. Методика оценки эквивалентной толщины вод разработана в рамках гранта РФ № 23-17-00032 «Взаимодействие Североатлантических глубинных и Антарктических водных масс в тропической части Атлантического океана».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Добролюбов С.А., Соков А.В. Роль глубинных вод Северной Атлантики в изменчивости теплообмена океана и атмосферы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2002. Вып. 6. С. 42–48.
- Кодрян К.В., Кивва К.К., Зубаревич В.Л., Педченко А.П. Водные массы западной части Чукотского моря в августе 2019 года и их гидрохимические особенности // Океанология. 2023. Т. 63. № 3. С. 362–374.
- Мамаев О.И. Термохалинный анализ вод Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 296 с.
- Русанов В.П., Яковлев Н.И., Буиневич А.Г. Гидрохимический режим Северного Ледовитого океана // Тр. ААНИИ. 1979. Т. 355. С. 144.
- Alkire M.B., Morison J., Andersen R. Variability and trends in the meteoric water, sea-ice melt, and Pacific water contributions to the central Arctic Ocean, 2000–2013, *Journal of Climate*, 2014, 27, 10, 3115–3128.

- nal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, vol. 120, p. 1573–1598, DOI: 10.1002/2014JC010023.
- 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, *Geophysical Research Letters*, 2019, vol. 46, p. 3843–3852, DOI: 10.1029/2018GL081837.
- Bourgain P., Gascard J.C. The Atlantic and summer Pacific waters variability in the Arctic Ocean from 1997 to 2008, *Geophysical Research Letters*, 2012, vol. 39, no. 5, DOI: 10.1029/2012GL051045.
- Brugler E.T., Pickart R.S., Moore G.W.K. et al. Seasonal to interannual variability of the Pacific water boundary current in the Beaufort Sea, *Progress in Oceanography*, 2014, vol. 127, p. 1–20, DOI: 10.1016/j.pocean.2014.05.002.
- Coachman L.K., Aagaard K., Tripp R.B. *Bering Strait. The Regional Physical Oceanography*, University of Washington Press, Seattle and London, 1975, 172 p.
- Falck E., Kattner G., Budéus G. Disappearance of Pacific water in the northwestern Fram Strait, *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32, no. 14, DOI: 10.1029/2005GL023400.
- Hennon T.D., Danielson S.L., Woodgate R.A. et al. Mooring measurements of Anadyr Current nitrate, phosphate, and silicate enable updated Bering Strait nutrient flux estimates, *Geophysical Research Letters*, 2022, vol. 49, no. 16, e2022GL098908, DOI: 10.1029/2022GL098908.
- Hu X., Myers P.G., Lu Y. Pacific Water pathway in the Arctic Ocean and Beaufort Gyre in two simulations with different horizontal resolutions, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, vol. 124, no. 8, p. 6414–6432.
- Kenigson J.S., Gelderloos R., Manucharyan G.E. Vertical structure of the Beaufort Gyre halocline and the crucial role of the depth-dependent eddy diffusivity, *Journal of Physical Oceanography*, 2021, vol. 51, no. 3, p. 845–860, DOI: 10.1175/JPO-D-20-0077.1.
- 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 Research, Part I, Oceanographic Research Papers*, 2015, vol. 105, p. 53–73, DOI: 10.1016/j.dsr.2015.08.011.
- 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, vol. 7, A491, DOI: 10.3389/fmars.2020.00491.
- Torres-Valdés S., Tsubouchi T., Bacon S. et al. Export of nutrients from the Arctic Ocean, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, vol. 118, no. 4, p. 1625–1644, DOI: 10.1002/jgrc.
- 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, *Progress in Oceanography*, 2017, vol. 160, p. 124–154, DOI: 10.1016/j.pocean.2017.12.007.

Поступила в редакцию 05.08.2023

После доработки 10.09.2023

Принята к публикации 06.10.2023

VOLUMETRIC CHARACTERISTICS OF PACIFIC WATERS IN THE ARCTIC OCEAN

Zh.M. Kulikova¹, S.A. Dobrolyubov²

^{1,2} *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Oceanology*

¹ *Postgraduate student; e-mail: kulikovazh9@gmail.com*

² *Head of Department, D.Sc. in Geography; e-mail: science@geogr.msu.ru*

Volumetric characteristics and renewal time of the Pacific waters (PW) in the Arctic Ocean were calculated based on the data of oceanographic expeditions during the 2007–2008 International Polar Year (617 stations). Isopycnal surfaces of their upper and lower boundaries (25,5 and 27,5 kg/m³, respectively), the thickness between these limits and the equivalent thickness (i. e. the specific thickness of untransformed “pure” water mass) have been determined, as well as the boundaries where the highest concentrations of silicates in the selected density interval disappears. The Pacific waters extend to the north up to the North Pole region (thickness up to 40–50 m), in the west they can be traced up to the northern part of the Laptev Sea (thickness 20–30 m), in the east they are preserved in a minimally transformed form (thickness of more than 100 m) up to the Canadian Arctic Archipelago. The characteristic depths are between 50 and 150 m. The thickest PW exceeding 150 m were found within the Beaufort Gyre. The total volume of “pure” (untransformed) Pacific waters in the Arctic Ocean was estimated at $(197 \pm 19) \cdot 10^3$ km³ or about 1,1% of the overall volume of the Arctic Ocean. If their mixing with the surrounding waters between selected isopycnic surfaces is taken into account, the volume of Pacific waters is $(313 \pm 16) \cdot 10^3$ km³, or about 1,7% of the volume of the Arctic Ocean. Taking into account the total inflow of the PW through the Bering Strait, their renewal time in the Arctic basin is estimated to be about 5–6 years.

Keywords: Pacific waters, concentration of silicates, equivalent thickness, renewal time

Acknowledgement. The methodology for estimating equivalent water thickness was elaborated with financial support of the Russian Science Foundation (grant no. 23-17-00032 “Interaction of North Atlantic deep and Antarctic water masses in the tropical part of the Atlantic Ocean”).

REFERENCES

- Alkire M.B., Morison J., Andersen R. Variability and trends in the meteoric water, sea-ice melt, and Pacific water contributions to the central Arctic Ocean, 2000–2013, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, vol. 120, p. 1573–1598, DOI: 10.1002/2014JC010023.
- 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, *Geophysical Research Letters*, 2019, vol. 46, p. 3843–3852, DOI: 10.1029/2018GL081837.
- Bourgain P., Gascard J.C. The Atlantic and summer Pacific waters variability in the Arctic Ocean from 1997 to 2008, *Geophysical Research Letters*, 2012, vol. 39, no. 5, DOI: 10.1029/2012GL051045.
- Brugler E.T., Pickart R.S., Moore G.W.K. et al. Seasonal to interannual variability of the Pacific water boundary current in the Beaufort Sea, *Progress in Oceanography*, 2014, vol. 127, p. 1–20, DOI: 10.1016/j.pocean.2014.05.002.
- Coachman L.K., Aagaard K., Tripp R.B. *Bering Strait. The Regional Physical Oceanography*, University of Washington Press, Seattle and London, 1975, 172 p.
- Dobrolyubov S.A., Sokov A.V. Rol' glubinykh vod Severnoi Atlantiki v izmenchivosti teploobmena okeana i atmosfery [The Role of the Deep Waters of the North Atlantic in the Variability of Ocean and Atmospheric Heat Transfer], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2002, no. 6, p. 42–48. (In Russian)
- Falck E., Kattner G., Budéus G. Disappearance of Pacific water in the northwestern Fram Strait, *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32, no. 14, DOI: 10.1029/2005GL023400.
- Hennon T.D., Danielson S.L., Woodgate R.A. et al. Mooring measurements of Anadyr Current nitrate, phosphate, and silicate enable updated Bering Strait nutrient flux estimates, *Geophysical Research Letters*, 2022, vol. 49, no. 16, e2022GL098908, DOI: 10.1029/2022GL098908.
- Hu X., Myers P.G., Lu Y. Pacific Water pathway in the Arctic Ocean and Beaufort Gyre in two simulations with different horizontal resolutions, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, vol. 124, no. 8, p. 6414–6432.
- Kenigson J.S., Gelderloos R., Manucharyan G.E. Vertical structure of the Beaufort Gyre halocline and the crucial role of the depth-dependent eddy diffusivity, *Journal of Physical Oceanography*, 2021, vol. 51, no. 3, p. 845–860, DOI: 10.1175/JPO-D-20-0077.1.
- Kodryan K.V., Kivva K.K., Zubarevich V.L., Pedchenko A.P. Water masses in the western part of the Chukchi Sea in august 2019 and their hydrochemical features, *Okeanologia*, 2023, vol. 63, p. 362–374.
- Mamayev O.I. *Termokhalinnyi analiz vod Mirovogo okeana* [Thermohaline Analysis of World Ocean Waters], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1987, 296 p. (In Russian)
- 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 Research, Part I, Oceanographic Research Papers*, 2015, vol. 105, p. 53–73, DOI: 10.1016/j.dsr.2015.08.011.
- 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, vol. 7, A491, DOI: 10.3389/fmars.2020.00491.
- Rusanov V.P., Yakovlev N.I., Buinevich A.G. Gidrohimičeskij režim Severnogo Ledovitogo okeana [Hydrochemical regime of the Arctic Ocean], *Tr. AII*, 1979, vol. 355, p. 144.
- Torres-Valdés S., Tsubouchi T., Bacon S. et al. Export of nutrients from the Arctic Ocean, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, vol. 118, no. 4, p. 1625–1644, DOI: 10.1002/jgrc.
- 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, *Progress in Oceanography*, 2017, vol. 160, p. 124–154, DOI: 10.1016/j.pocean.2017.12.007.

Received 05.08.2023

Revised 10.09.2023

Accepted 06.10.2023