

Научная статья

УДК 551.465.41:556.532
EDN: KNQYRQ

Влияние речного стока на вертикальную стратификацию плотности восточных арктических морей Чукотского и Бофорта

А. А. Букатов, Е. А. Павленко , Н. М. Соловей

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
 pavlenko.ea@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 01.12.2022; одобрена после рецензирования 12.04.2023;
принята к публикации 26.04.2023.

Аннотация

Цель работы – анализ влияния стока рек на плотностную стратификацию вод морей Чукотского и Бофорта, определение районов с наиболее выраженным откликом на сезонные колебания объемов стока рек.

Методы и результаты. На основе данных реанализа *ECMWF ORAP5* о среднемесячных значениях температуры и солёности за май – сентябрь каждого года рассчитана плотность вод в Чукотском море и море Бофорта. Для исследования влияния речного стока на плотностную стратификацию морских вод использовались рассчитанные максимальные среднемесячные значения частоты Вэйсяля – Брента по глубине в каждом узле сетки и среднемесячные расходы воды рек Колыма, Юкон, Маккензи в замыкающих створах за период 1979–2013 гг. Результаты статистического анализа показали, что наибольшее влияние на плотностную стратификацию вод морей Чукотского и Бофорта оказывает сток рек Маккензи и Юкона за предшествующий месяц, а сток Колымы – за 3 и 6 предшествующих месяцев.

Выводы. Получено, что влияние стока Маккензи наиболее выражено с июля по сентябрь. Области значимых коэффициентов корреляции между частотой плавучести и объемами стока за предшествующий месяц находятся в юго-восточной и центральной частях моря Бофорта. Области проявления влияния стока Юкона наблюдаются в районе Берингова пролива, в северном районе Чукотского моря и на западной периферии круговорота Бофорта. Влияние стока Колымы на плотностную стратификацию вод проявляется у западного побережья Чукотского моря, в районе Берингова пролива, залива Коцебу и на юго-западной периферии круговорота Бофорта.

Ключевые слова: Чукотское море, море Бофорта, плотностная стратификация вод, частота плавучести, сток рек, р. Маккензи, р. Юкон, р. Колыма

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания FNNN-2021-0004.

Для цитирования: Букатов А. А., Павленко Е. А., Соловей Н. М. Влияние речного стока на вертикальную стратификацию плотности восточных арктических морей Чукотского и Бофорта // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 4. С. 467–477. EDN KNQYRQ.

River Runoff Impact on the Density Vertical Stratification of the Eastern Arctic Chukchi and Beaufort Seas

A. A. Bukatov, E. A. Pavlenko , N. M. Solovei

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

 pavlenko.ea@mhi-ras.ru

Abstract

Purpose. The aim of the study is to analyze the river runoff impact on density stratification in the Chukchi and Beaufort seas, and to identify the areas where the response to seasonal fluctuations in the river runoff volumes is the most pronounced.

Methods and Results. Based on the *ECMWF ORAP5* reanalysis data on the monthly mean values of temperature and salinity for May – September of each year, the water density in the Chukchi and Beaufort seas was calculated. To study the river runoff impact on the density stratification of sea water, applied were the calculated maximum monthly average values of the Väisälä – Brent frequency over depth at each grid node, and the monthly average water discharges in the closing gates of the Kolyma, Yukon and Mackenzie rivers for the period 1979–2013. The results of statistical analysis showed that density stratification of the Chukchi and Beaufort seas was most strongly affected by the Mackenzie and Yukon river runoffs for a previous month and also by the Kolyma river runoff for 3 and 6 previous months.

Conclusions. The impact of the Mackenzie runoff is found to be most pronounced from July to September. The areas of statistically significant correlation coefficients between the buoyancy frequency and the runoff volumes for the previous month are in the southeastern and central parts of the Beaufort Sea. The areas where the impact of the Yukon runoff is pronounced are in the Bering Strait area, in the northern region of the Chukchi Sea, and on the western periphery of the Beaufort gyre. The Kolyma runoff impact on the water density stratification is manifested near the western coast of the Chukchi Sea, in the Bering Strait area, the Kotzebue Bay, and on the southwestern periphery of the Beaufort gyre.

Keywords: Chukchi Sea, Beaufort Sea, water density stratification, buoyancy frequency, river runoff, rivers Mackenzie, Yukon and Kolyma

Acknowledgements: The investigation was carried out within the framework of the theme of state assignment FNNN-2021-0004.

For citation: Bukatov, A.A., Pavlenko, E.A. and Solovei, N.M., 2023. River Runoff Impact on the Density Vertical Stratification of the Eastern Arctic Chukchi and Beaufort Seas. *Physical Oceanography*, 30(4), pp. 428-437.

Введение

Особенности гидрологического режима Северного Ледовитого океана во многом связаны с большим материковым стоком. Наименьший из океанов Северный Ледовитый получает наибольшее количество пресной воды, поступающей вместе с реками Евразии и Америки [1]. Слой материкового стока по Арктическому бассейну в 7 раз превышает слой стока по всему Мировому океану¹. Соленость и формирование ледового покрова в морях Северного Ледовитого океана в значительной степени определяются притоком речных вод [2].

¹ Никифоров Е. Г., Шнайхер А. О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л. : Гидрометеоздат, 1980. 270 с.

В процессе взаимодействия речных вод с более солеными глубинными водами формируются значительные вертикальные градиенты солёности и плотности [3]. Слой максимальных градиентов плотности и глубина его залегания оказывают влияние на вертикальное распределение биогенных элементов, взвешенных минеральных и органических веществ, загрязнений, а также на образование и распространение морских льдов [4–6]. Вертикальная стратификация плотности и ее устойчивость характеризуются и могут быть представлены вертикальным профилем частоты плавучести (частота Вьяйсяля – Брента), которая является фундаментальной величиной в динамике стратифицированной жидкости. В работах [7, 8] рассмотрены региональные особенности распределения частоты плавучести в морях Баренцевом, Карском, Лаптевых и Восточно-Сибирском, дана оценка корреляционных связей максимума частоты Вьяйсяля – Брента по глубине с климатическими индексами, отражающими состояние атмосферы и гидросферы. В работах [9, 10] проведено исследование влияния стока арктических рек на плотностную стратификацию вод морей Баренцева, Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского.

Цель данного исследования – анализ влияния стока рек на плотностную стратификацию вод морей Чукотского и Бофорта, определение районов с наиболее выраженным откликом на сезонные колебания объемов стока рек.

Материалы и методика

В качестве исходных гидрологических данных использовались массивы реанализа *ECMWF ORAP5* среднемесячных значений температуры и солёности в узлах сетки $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ за период 1979–2013 гг.² [11]. Область исследования ограничена координатами 65° – 80° с. ш., 125° – 180° з. д. По среднемесячным значениям температуры и солёности за май – сентябрь каждого года рассчитывалась плотность вод³. Полученные данные тестировались на выявление инверсий и корректировались путем их замены значениями, интерполированными по соседним горизонтам. Для каждого узла сетки рассчитывались среднемесячные профили значений частоты Вьяйсяля – Брента (N , цикл/ч) по формуле

$$N^2(z) = \frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz},$$

где z – глубина; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность. Максимум частоты Вьяйсяля – Брента ($N_{\max}(z)$, цикл/ч) определялся по глубине.

Для исследования влияния речного стока на плотностную стратификацию вод морей Чукотского и Бофорта использовались среднемесячные значения $N_{\max}(z)$ в каждом узле сетки и среднемесячные расходы воды рек Колыма,

² Zuo H., Balmaseda M. A., Mogensen K. The ECMWF-MyOcean2 eddy-permitting ocean and sea-ice reanalysis *ORAP5*. Part 1 : Implementation. Shinfield Park, Reading : ECMWF, 2015. 42 p. (Technical Memorandum ; No. 736). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3305.2248>

³ Безруков Ю. Ф. Океанология. Часть I. Физические явления и процессы в океане. Симферополь : Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского, 2006. 159 с.

Юкон, Маккензи в замыкающих створах за 1979–2013 гг. ⁴. На основе корреляционного анализа получены коэффициенты парной линейной корреляции между $N_{\max}(z)$ и расходами воды за предшествующий месяц (R_1), а также коэффициенты R_3, R_6 между значениями $N_{\max}(z)$ и суммарными среднемесячными расходами за 3 и 6 предшествующих месяцев. Рассчитаны площади (S) областей статистически значимых коэффициентов R_1, R_3, R_6 (90%-ный доверительный интервал).

Анализ результатов

Структура вод Чукотского моря и моря Бофорта формируется под влиянием взаимодействия поверхностных арктических вод, тихоокеанских вод, поступающих через Берингов пролив, и вод материкового стока. Сток **Маккензи**, крупнейшей реки Арктического бассейна в Западном полушарии, составляет по разным оценкам 5–10% от общего притока пресных вод в Северный Ледовитый океан; средний годовой объем стока за рассматриваемый период равен 285 км³ (рис. 1); средний расход воды Маккензи 9053 м³/с, максимум наблюдается в июне (20579 м³/с).

Река **Юкон** впадает в Берингово море (бассейн Тихого океана), однако Аляскинское прибрежное течение относит сток реки в Северный Ледовитый океан. Сток Юкона занимает пятое место после Енисея, Оби, Лены и Маккензи по объему притока пресных вод в Северный Ледовитый океан и составляет ~ 8% от общего притока; средний годовой объем стока реки за рассматриваемый период равен 203 км³ (рис. 1); средний расход воды на гидропосту Пайлот-Стейшен 6447 м³/с, максимум наблюдается в июне (16237 м³/с).

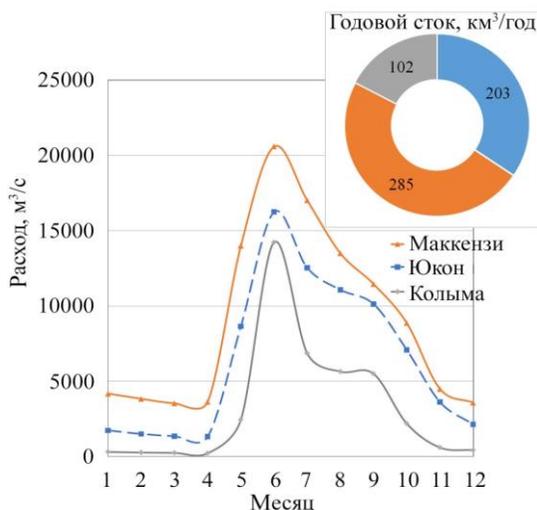


Рис. 1. Среднемноголетний гидрограф стока рек Маккензи, Юкон, Колыма, рассчитанный за период 1979–2013 гг.

Fig. 1. Average long-term hydrograph of the Yukon, Kolyma and Mackenzie rivers runoffs calculated for the period 1979–2013

⁴ Rivers Observatory : Discharge Dataset / A. I. Shiklomanov, R. M. Holmes, J. W. McClelland, S. E. Tank, R. G. M. Spencer. Electronic data. 2022. Version 20220630. URL: <https://arcticgreatrivers.org/discharge/> (date of access: 06.20.2022).

Заметное влияние на гидрологические условия Чукотского моря и моря Бофорта оказывает также сток сибирских рек. Средний годовой объем стока р. **Колыма** составил 102 км^3 за 1979–2013 гг. (рис. 1); средний расход воды равен $3247 \text{ м}^3/\text{с}$, максимум наблюдается в июне ($14230 \text{ м}^3/\text{с}$). Линза, сформированная стоком сибирских рек, является крупнейшей по площади опресненной линзой в Мировом океане [12]. При усилении атмосферной циклонической циркуляции в европейской части Арктики опресненные и холодные воды линзы поступают через пролив Лонга с вдольбереговым Сибирским течением в Чукотское море, заходят в Берингов пролив и распространяются вблизи его западного берега. При слабом развитии Сибирского течения опресненные воды достигают северных районов Чукотского моря и затем вовлекаются в циркуляцию моря Бофорта, увеличивая количество пресной воды в этом районе [13].

Максимальная устойчивость вод в Чукотском море наступает в июле, в море Бофорта – в июне (рис. 2, *a, b*). У западного побережья Чукотского моря, в районе влияния опресненных вод вдольберегового Сибирского течения, плотностная стратификация наибольшая. Речные воды вследствие своей малой плотности растекаются по поверхности холодных морских вод, образуются значительные вертикальные градиенты плотности. Максимальные значения частоты Вэйсяля – Брента достигают в июне 34 цикл/ч, в июле 37 цикл/ч. Толщина верхнего однородного слоя составляет $\sim 7 \text{ м}$ [14]. На севере, куда поступают опресненные и холодные воды Восточно-Сибирского моря, моря Бофорта и центральной части Полярного бассейна, слой скачка плотности прослеживается на протяжении всего года. В летний период пикноклин находится на глубинах 12–15 м, максимальные значения частоты Вэйсяля – Брента составляют 28–30 цикл/ч в июле у арктического побережья Аляски [14] (рис. 2, *b*).

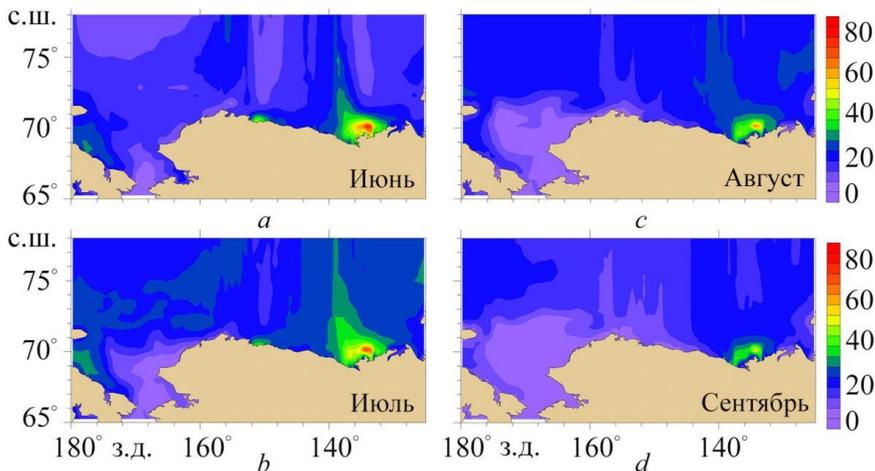


Рис. 2. Распределение максимальных значений частоты Вэйсяля – Брента (цикл/ч) в Чукотском море и в море Бофорта в июне – сентябре

Fig. 2. Distribution of the Väisälä – Brent frequency maximum values (cycle/hour) in the Chukchi and Beaufort seas in June – September

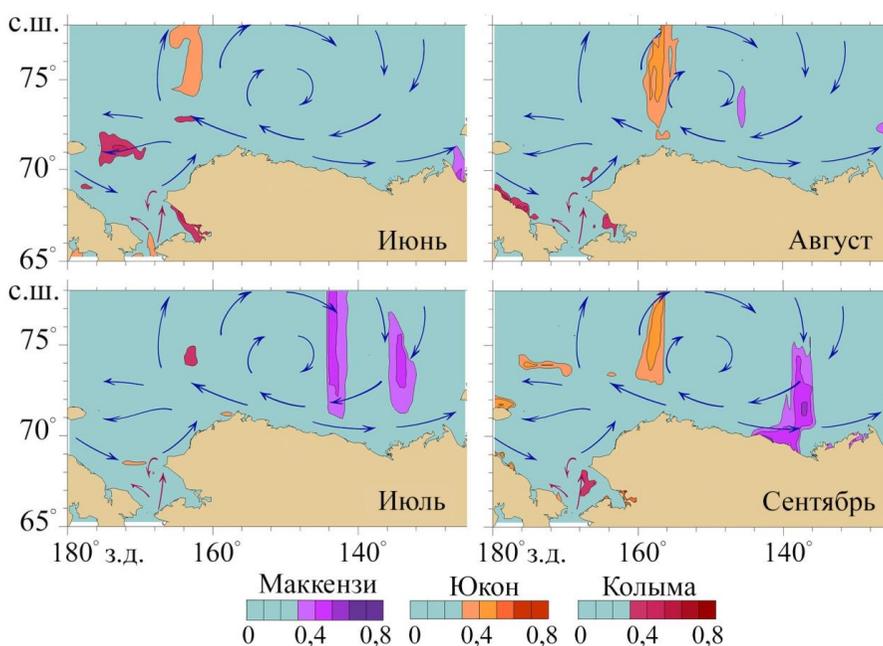
Тихоокеанские воды – один из источников тепла, пресной воды [15] и биогенных элементов [16] для Северного Ледовитого океана. Летом они почти полностью заполняют Берингов пролив, причем их поверхностный слой опреснен стоком р. Юкон, а более глубокие слои имеют соленость, характерную для вод Берингова моря. Проходя через шельф Чукотского моря, тихоокеанские воды распространяются к северу и востоку в виде поверхностного течения. На широтах залива Коцебу ($\sim 66^\circ$ с. ш.) они соединяются с опресненными материковым стоком водами этого залива. Соленость от поверхности до дна меняется сравнительно мало, и только вблизи кромки льдов охлажденные тихоокеанские воды погружаются под менее плотные, хотя и более холодные поверхностные арктические воды¹. Вследствие этого в южном и центральном районах Чукотского моря стратификация выражена слабее, чем в северном и западном. Максимум частоты плавучести в районе Берингова пролива составляет ~ 15 цикл/ч, в центральном районе Чукотского моря – 20 цикл/ч (рис. 2, *b*). Сезонный пикноклин залегает на глубине ~ 11 м в районе Берингова пролива и в центральной части моря. Осенью вертикальная стратификация уменьшается в основном за счет конвективно-ветрового перемешивания и осолонения поверхностных вод при ледообразовании.

В море Бофорта так же, как и в Чукотском море, тихоокеанские воды играют важную роль при формировании гидрологической структуры. Очищаясь ото льда, акватория моря Бофорта летом заполняется теплыми тихоокеанскими водами, а в прикромочных районах и в зоне воздействия стока Маккензи эти воды погружаются под распресненные, образуя глубинный максимум температуры¹. Анализ пространственного распределения максимума частоты плавучести в июне – сентябре показал, что его наибольшие значения определяются в зоне воздействия стока Маккензи в июне (~ 80 цикл/ч) и в июле (~ 74 цикл/ч). В прикромочных районах значения этого параметра достигают 25–30 цикл/ч с максимумом в июле.

Полярный вихрь Северного полушария формирует антициклоническое распределение поля ветра над поверхностью Северного Ледовитого океана [17]. Вследствие экмановской подкачки ветер вызывает конвергенцию вод приповерхностного слоя. Воды низкой солености и низкой плотности оказываются вовлеченными в этот процесс, в результате чего в районе круговорота моря Бофорта формируется аномалия распресненных вод [1] за счет притока через Берингов пролив и стока Маккензи, а также при усилении атмосферной циклонической циркуляции в европейской части Арктики за счет притока из сибирских рек. Значения максимума частоты плавучести в районе круговорота моря Бофорта невелики, ~ 10 цикл/ч.

Анализ результатов показал, что на гидрологические условия моря Бофорта заметное влияние оказывает сток Маккензи. В июне области значимых коэффициентов R_1 находятся в юго-восточном районе и смещаются на восток относительно устья Маккензи под влиянием течений восточной ориентации, которые присутствуют в районе впадения реки в море. Максимальное значение R_1 в это время составляло 0,46, а площадь областей значимых коэффициентов корреляции 9700 км^2 ($\sim 2\%$ от общей площади моря).

В июле – сентябре области значимых коэффициентов R_1 смещаются в центральную часть моря Бофорта под влиянием течений антициклонического круговорота, направленных в основном на запад или юго-запад. Максимального значения R_1 (0,60) достигает в сентябре (рис. 3), максимум S (~ 103700 км², ~ 22% от общей площади моря) прослеживается в июле. Коэффициенты корреляции R_3 между максимальными значениями частоты Вайсяля – Брента и суммарными среднемесячными расходами Маккензи за три предшествующих месяца статистически значимы на западной периферии круговорота Бофорта. Максимальное значение R_3 (0,54) прослеживается в августе (рис. 4). Анализ корреляционных связей между максимальными значениями частоты Вайсяля – Брента и объемами стока Маккензи за 6 предшествующих месяцев показал, что R_6 значимы в августе и достигают 0,52 (рис. 5). Области значимых R_6 расположены на севере Чукотского моря, S составляет ~ 2700 км².

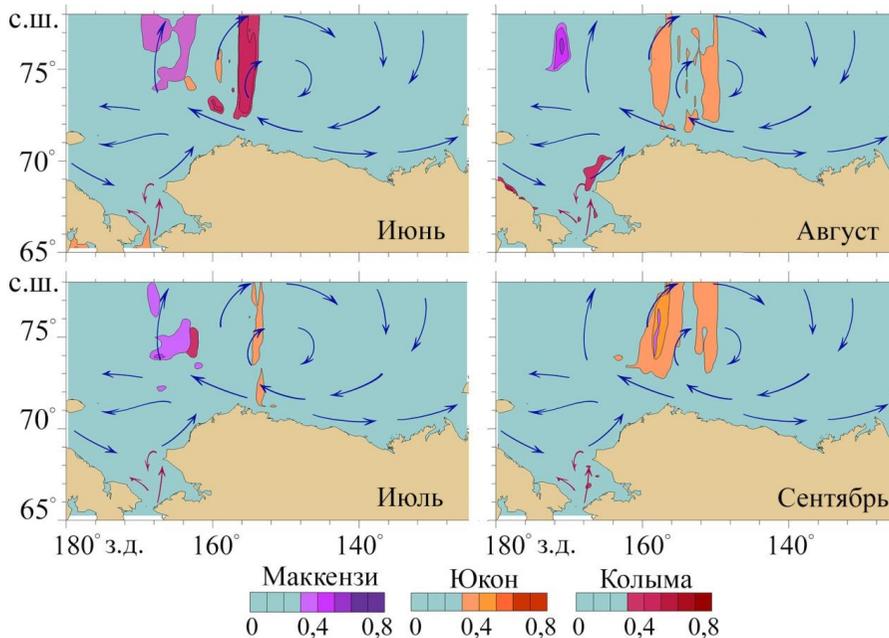


Р и с. 3. Распределение коэффициентов корреляции R_1 между максимальными значениями частоты Вайсяля – Брента и объемами стока рек Маккензи, Юкон, Колыма. Выделенные участки – районы статистически значимых коэффициентов R_1 . Стрелками показана схема поверхностной циркуляции

Fig. 3. Distribution of the correlation coefficients R_1 between the Väisälä – Brent frequency maximum values and the Yukon, Mackenzie and Kolyma rivers runoff volumes. Highlighted areas are the regions of statistically significant values of the R_1 coefficients. The surface circulation scheme is shown by arrows

Из рис. 3 видно, что коэффициенты корреляции R_1 между максимумами частоты Вайсяля – Брента по глубине и объемами стока Юкона за предшествующий месяц значимы в районе Берингова пролива в июне, июле и составляют 0,45. Эти коэффициенты статистически значимы также в северо-восточном районе Чукотского моря и на западной периферии круговорота Бофорта, куда

поступают опресненные стоком Юкона воды Аляскинского прибрежного течения. В сентябре значения R_1 максимальные (0,75), S составляет ~ 30400 км². Корреляционный анализ показал, что суммарные расходы Юкона за три предшествующих месяца также оказывают влияние на изменчивость максимума частоты Вайсяля – Брента и коэффициенты R_3 статистически значимы на западной и северо-западной периферии круговорота Бофорта.

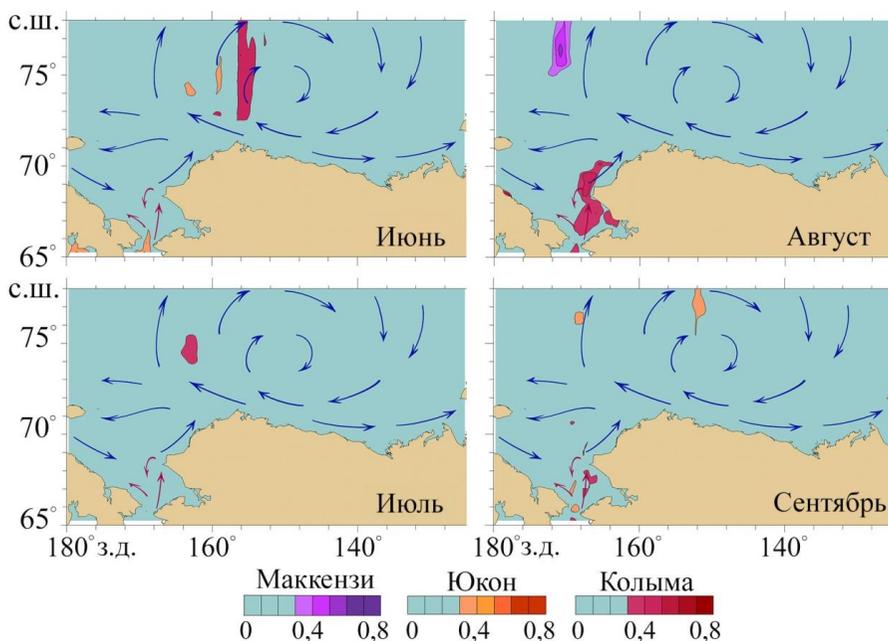


Р и с. 4. Распределение коэффициентов корреляции R_3 между максимальными значениями частоты Вайсяля – Брента и объемами стока рек Маккензи, Юкон, Колыма. Выделенные участки – районы статистически значимых коэффициентов R_3 . Стрелками показана схема поверхностной циркуляции

Fig. 4. Distribution of the correlation coefficients R_3 between the Väisälä – Brent frequency maximum values and the Yukon, Mackenzie and Kolyma rivers runoff volumes. Highlighted areas are the regions of statistically significant values of the R_3 coefficients. The surface circulation scheme is shown by arrows

Значения R_3 наибольшие в сентябре, достигают 0,55, а S составляет ~ 67100 км² (рис. 4). Коэффициенты корреляции R_6 между максимальными значениями частоты Вайсяля – Брента и объемами стока Юкона за 6 предшествующих месяцев значимы в июне и сентябре, достигают 0,50 (рис. 5). Области значимых R_6 расположены в районе Берингова пролива, на северо-востоке Чукотского моря и в северном районе моря Бофорта.

Влияние стока Колымы на плотностную стратификацию вод проявляется у западного побережья Чукотского моря в районе воздействия опресненных вод вдольберегового Сибирского течения. Коэффициенты корреляции также значимы в районе Берингова пролива, залива Коцебу и на юго-западной периферии круговорота моря Бофорта в июне, июле. Коэффициенты R_1 максимальны в июне ($\sim 0,45$), S составляет ~ 37200 км² (рис. 3).



Р и с. 5. Распределение коэффициентов корреляции R_6 между максимальными значениями частоты Вэйсяля – Брента и объемами стока рек Маккензи, Юкон, Колыма. Выделенные участки – районы статистически значимых коэффициентов R_6 . Стрелками показана схема поверхностной циркуляции

F i g. 5. Distribution of the correlation coefficients R_6 between the Väisälä – Brent frequency maximum values and the Yukon, Mackenzie and Kolyma rivers runoff volumes. Highlighted areas are the regions of statistically significant values of the R_6 coefficients. The surface circulation scheme is shown by arrows

Коэффициенты корреляции R_3 между максимальными значениями частоты Вэйсяля – Брента и суммарными расходами Колымы за три предшествующих месяца статистически значимы на западной периферии круговорота Бофорта в июне, июле, а в августе и сентябре – у западного побережья Чукотского моря и в районе залива Коцебу. Коэффициенты R_3 достигают максимума в августе ($\sim 0,51$), а S – в июне ($\sim 53300 \text{ км}^2$) (рис. 4). Коэффициенты R_6 также являются статистически значимыми. Области, в которых они фиксируются, совпадают с районами для коэффициентов R_3 . Коэффициенты R_6 достигают максимума в августе и сентябре ($\sim 0,52$), S – в августе ($\sim 53300 \text{ км}^2$) (рис. 5).

З а к л ю ч е н и е

На основе данных реанализа *ORAP5* за период 1979–2013 гг. проведено исследование влияния стока рек Маккензи, Юкон, Колыма на плотностную стратификацию арктических морей Бофорта и Чукотского. Максимальная устойчивость вод в Чукотском море наступает в июле, в море Бофорта – в июне. В Чукотском море плотностная стратификация наиболее выражена у западного побережья, в районе влияния опресненных вод вдольберегового Сибирского течения. Частота Вэйсяля – Брента в Чукотском море достигает максимального значения в июне (34 цикл/ч) и в июле (37 цикл/ч), в море

Бофорта – в зоне воздействия стока Маккензи в июне (~ 80 цикл/ч) и в июле (~ 74 цикл/ч), в прикромочных районах – в июле (25–30 цикл/ч).

Анализ результатов показал, что наибольшее влияние на плотностную стратификацию вод морей Чукотского и Бофорта оказывает сток Маккензи и Юкона за предшествующий месяц, а сток Колымы – за 3 и 6 предшествующих месяцев. Установлено, что влияние стока Маккензи наиболее выражено с июля по сентябрь, области значимых коэффициентов R_1 находятся в юго-восточной и центральной частях моря Бофорта. Максимальное значение коэффициента R_1 составляет ~ 0,60. Области проявления влияния стока Юкона находятся в районе Берингова пролива, в северном районе Чукотского моря и на западной периферии круговорота моря Бофорта. Максимальные значения коэффициентов корреляции наблюдаются в сентябре и составляют 0,75 для R_1 . Влияние стока Колымы на плотностную стратификацию вод проявляется у западного побережья Чукотского моря, в районе Берингова пролива, залива Коцебу и на юго-западной периферии круговорота моря Бофорта. Максимальное значение коэффициентов R_6 наблюдается в августе и сентябре и составляет ~ 0,52.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Платов Г. А.* Формирование аномалии распресненных вод в районе круговорота Бофорта в Северном Ледовитом океане по результатам численного моделирования // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 4, № 1. С. 74–77.
2. *Shiklomanov I. A., Shiklomanov A. I.* Climatic Change and the Dynamics of River Runoff into the Arctic Ocean // *Water Resources*. 2003. Vol. 30, iss. 6. P. 593–601. doi:10.1023/B:WARE.0000007584.73692.ca
3. Freshwater and its role in the Arctic Marine System: Sources, disposition, storage, export, and physical and biogeochemical consequences in the Arctic and global oceans / E. C. Carmack [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2016. Vol. 121, iss. 3. P. 675–717. <https://doi.org/10.1002/2015JG003140>
4. *Steele M., Boyd T.* Retreat of the cold halocline layer in the Arctic Ocean // *Journal of Geophysical Research: Oceans* 1998. Vol. 103, iss. C5. P. 10419–10435. doi:10.1029/98JC00580
5. *Flint M. V., Poyarkov S. G., Rimsky-Korsakov N. A.* Ecosystems of the Russian Arctic-2015 (63rd Cruise of the research vessel *Akademik Mstislav Keldysh*) // *Oceanology*. 2016. Vol. 56, iss. 3. P. 459–461. <https://doi.org/10.1134/S0001437016030061>
6. Pan-Arctic Ocean Primary Production Constrained by Turbulent Nitrate Fluxes / A. Randelhoff [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2020. Vol. 7. 150. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00150>
7. *Букатов А. А., Павленко Е. А., Соловей Н. М.* Региональные особенности распределения частоты Вейселя – Брента в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 5. С. 437–448. doi:10.22449/0233-7584-2019-5-437-448
8. *Bukatov A. A., Pavlenko E. A., Solovei N. M.* Estimation of Waters Vertical Structure in the Barents and Kara Seas // *Processes in GeoMedia – Volume II* / Ed. T. Chaplina. Switzerland AG : Springer Geology, 2021. P. 41–53. https://doi.org/10.1007/978-3-030-53521-6_7
9. *Букатов А. А., Павленко Е. А., Соловей Н. М.* Влияние материкового стока на плотностную стратификацию морей Лаптевых и Восточно-Сибирского // *Процессы в геосредах*. 2021. № 2 (28). С. 1093–1100.
10. *Букатов А. А., Павленко Е. А., Соловей Н. М.* Влияние материкового стока на плотностную стратификацию Баренцева и Карского морей // *Процессы в геосредах*. 2020. № 3 (25). С. 764–771.

11. *Zuo H., Balmaseda M. A., Mogensen K.* The new eddy-permitting ORAP5 ocean reanalysis: description, evaluation and uncertainties in climate signals // *Climate Dynamics*. 2017. Vol. 49. iss. 3. P. 791–811. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2675-1>
12. Areas of the global major river plumes / Y. Kang [et al.] // *Acta Oceanologica Sinica*. 2013. Vol. 32. iss. 1. P. 79–88. doi:10.1007/s13131-013-0269-5
13. Changing Arctic Ocean freshwater pathways / J. Morison [et al.] // *Nature*. 2012. Vol. 481. P. 66–70. doi:10.1038/nature10705
14. *Букатов А. Е., Павленко Е. А.* Пространственно-временная изменчивость распределения частоты плавучести в Чукотском море // *Процессы в геосредах*. 2017. № 3 (12). С. 573–579.
15. The large-scale freshwater cycle of the Arctic / M. C. Serreze [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2006. Vol. 111, iss. C11. C11010. doi:10.1029/2005JC003424
16. *Coachman L. K., Aagaard K. A., Tripp R. B.* Bering Strait: The regional physical oceanography. Seattle, USA : University of Washington Press, 1976. 172 p.
17. *Proshutinsky A. Y., Johnson M. A.* Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1997. Vol. 102, iss. C6. P. 12493–12514. doi:10.1029/97JC00738

Об авторах:

Букатов Антон Алексеевич, ведущий научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1165-8428**, **ResearcherID: P-6733-2017**, newisland@list.ru

Павленко Екатерина Анатольевна, младший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0001-9146-5708**, pavlenko.ea@mhi-ras.ru

Соловей Неля Михайловна, младший научный сотрудник, отдел океанографии, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-3359-0345**, nele7@mail.ru