

УДК: 551.465.41:556.532

ВЛИЯНИЕ РЕЧНОГО СТОКА НА ПЛОТНОСТНУЮ СТРАТИФИКАЦИЮ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

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

*Морской гидрофизический институт РАН, Капитанская улица, 4,
299011, г. Севастополь, Россия, mhi.pavlenko@gmail.com*

На основе данных реанализа ECMWF ORAP5 о среднемесячных значениях температуры и солёности, и данных о среднемесячных расходах воды на замыкающих створах с 1979 по 2013 гг. исследовано влияние стока арктических рек на плотностную стратификацию морей: Баренцева, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского и Бофорта. Определены районы с наиболее выраженным откликом плотностной стратификации на сезонные колебания объемов стока рек.

Ключевые слова: Баренцево море; Карское море; море Лаптевых; Восточно-Сибирское море; Чукотское море; море Бофорта; частота Вьясяля-Брента; вертикальная структура вод; сток рек.

RIVER RUNOFF EFFECT ON THE DENSITY STRATIFICATION OF THE ARCTIC SEAS

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

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Kapitanskay, 4,
299011, Sevastopol. Russian Federation, mhi.pavlenko@gmail.com*

Based on ECMWF ORAP5 reanalysis data on average monthly temperature and salinity values, and data on average monthly water discharge from 1979 to 2013 the effect of the Arctic rivers runoff on the density stratification of the Barents, Kara, Laptev, East Siberian, Chukchi and Beaufort seas was studied. Areas with the most pronounced response of density stratification to seasonal fluctuations in river flow volumes were identified.

Keywords: Barents Sea; Kara Sea; Laptev Sea; East Siberian Sea; Chukchi Sea; Beaufort Sea; water density stratification; buoyancy frequency; river runoff.

Сток северных рек является важным фактором формирования гидрологического режима арктических морей. В результате смешения речных и морских вод на обширных участках арктического шельфа и континентального склона образуются области солоноватой воды. В процессе их взаимодействия с более солёными и тёплыми глубинными водами формируются значительные вертикальные градиенты солёности и плотности [1]. Хорошо выраженный арктический галоклин играет роль экрана для вер-

тикального потока тепла, определяет образование и распространение морских льдов, оказывает влияние на вертикальное распределение биогенных элементов, взвешенных минеральных и органических веществ, а также загрязнений [1, 2]. Вертикальную стратификацию плотности можно охарактеризовать по распределению частоты плавучести (частоты Вьяйсяля-Брента), которая является фундаментальной величиной в динамике стратифицированной жидкости.

В данной работе на основе среднемесячных термохалинных данных реанализа ORAP5 за период 1979-2013 гг. с разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ [3, 4] рассчитывалась плотность вод арктических морей: Баренцева, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского, Бофорта. По распределениям плотности выполнялся анализ вертикальной структуры частоты плавучести, находился максимум по глубине ($N_{\max}(z)$). Используя корреляционный анализ, определялась региональная зависимость стратификации морских вод от сезонных колебаний объемов стока рек Печоры, Оби, Енисея, Лены, Колымы, Хатанги, Маккензи, Юкон. Получены коэффициенты (R) парной линейной корреляции между значениями $N_{\max}(z)$ и расходами воды за рассматриваемый месяц R_0 , а также коэффициенты R_1, R_3, R_6, R_9 между значениями $N_{\max}(z)$ и суммарными среднемесячными расходами за 1, 3, 6, 9 предшествующих месяцев, включая месяц, за который рассматривается $N_{\max}(z)$.

Установлено, что максимальная устойчивость вод в Баренцевом море наступает в июле, а в Карском — в августе-сентябре (рис. 1) [5]. В теплый период года слой $N_{\max}(z)$ поднимается к поверхности. Значения максимума частоты плавучести в Карском море в несколько раз превышает $N_{\max}(z)$ в Баренцевом, что обусловлено, в том числе, различием в объеме стока речных вод. В центральной части Баренцева моря с июня по сентябрь значения $N_{\max}(z)$ составляют менее 5 цикл/час, а в северной части максимум частоты плавучести повышается до 10 цикл/час. Низкая устойчивость в центральной части Баренцева моря объясняется тем, что здесь проходит Нордкапское течение, имеющие высокую соленость и температуру. При движении на восток эти воды сравнительно быстро охлаждаются и опускаются вниз, что приводит к сглаживанию разницы в плотности между слоями и потере равновесия.

Центральная часть Карского моря в июне также занята водами с относительно невысокими значениями частоты Вьяйсяля-Брента. С 75° по 80° с. ш. значения максимума частоты плавучести составляют около 15 цикл/час. К концу летнего периода устойчивость увеличивается по всей акватории рассматриваемых морей. Особенно это заметно в юго-восточной прибрежной части Баренцева моря и юго-западной части Карского моря, вблизи устьев рек Обь и Енисей и в Пясинском заливе.

Плотностная стратификация вод моря Лаптевых наиболее выражена с конца весны до начала осени в юго-восточных и юго-западных районах моря и у кромки льдов. В устье реки Лена значения $N_{\max}(z)$ в июле достигают 86 цикл/час, в устье реки Хатанга — 75 цикл/час. В юго-восточной части моря Лаптевых, куда под действием циклонической циркуляции в поверхностном слое моря распространяется большая часть стока рек Хатанги и Лены, пикноклин прослеживается на протяжении всего года.

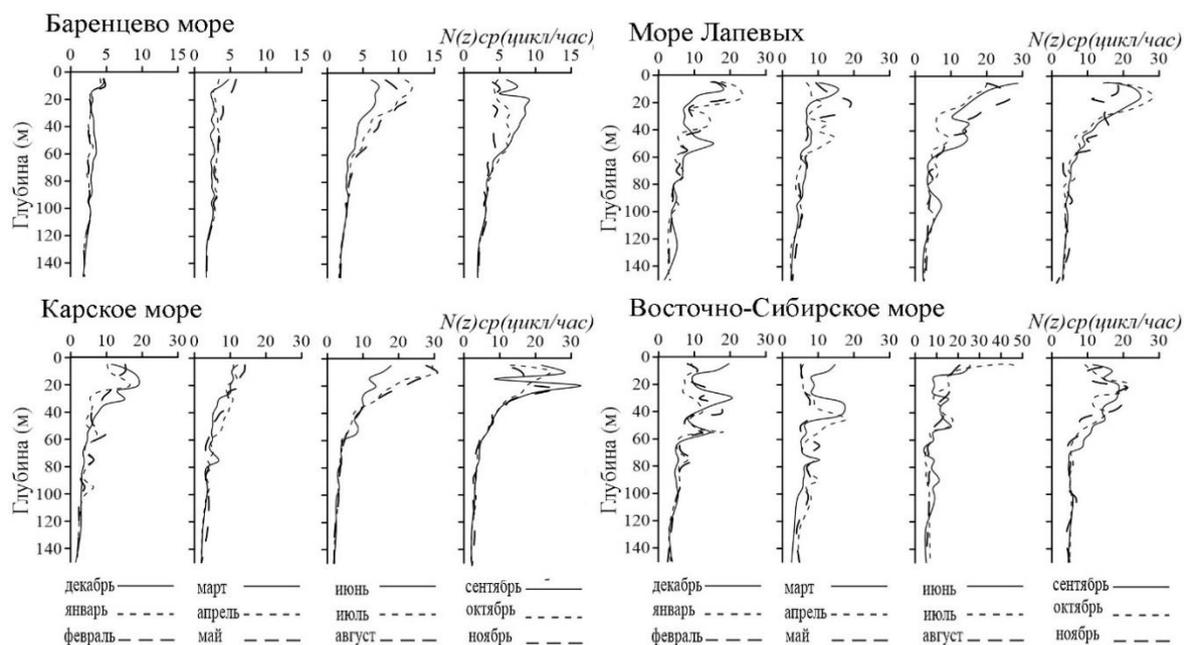
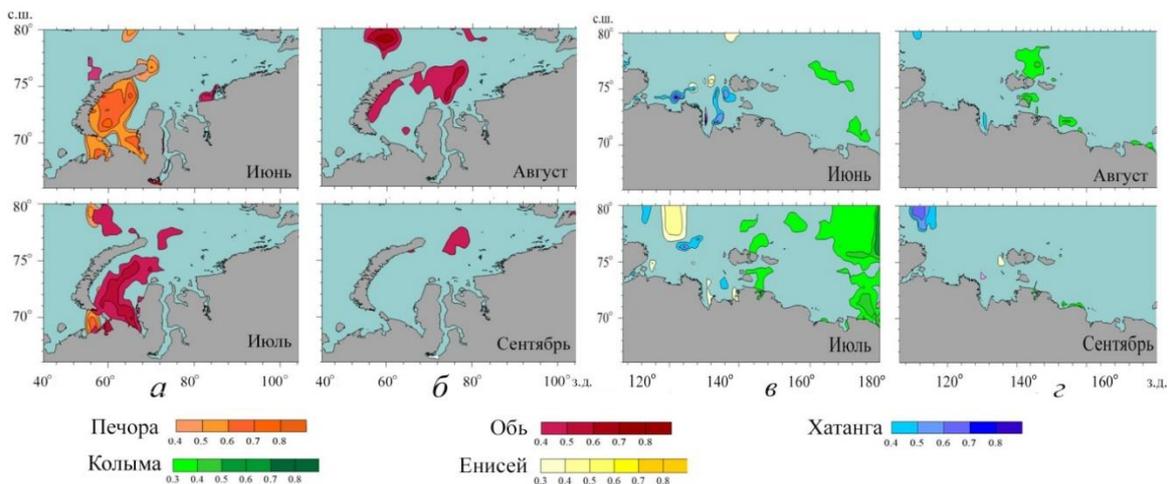


Рис. 1. Распределение по глубине осредненных по акватории моря значений частоты плавучести

В Восточно-Сибирском море внутригодовой максимум устойчивости вод приходится на июль-август. Сезонный пикноклин прослеживается с июня по сентябрь, глубина его залегания во всех районах моря в летний период — 5 м. Среднее значение $N_{\max}(z)$ в юго-западном районе моря в августе составляет 51 цикл/час, в северном и юго-восточном районах в июле — 46 и 42 цикл/час соответственно. Максимальные значения частоты плавучести отмечены в приустьевых участках рек Колымы и Индигирки. В этих областях значения $N_{\max}(z)$ достигают 70 и 85 цикл/час. В глубоководных северном и юго-восточном районах Восточно-Сибирского моря на глубинах 25–55 м наблюдается слой постоянного пикноклина, который прослеживается на протяжении всего года. Среднее значение $N_{\max}(z)$ в слое скачка достигает 12–18 цикл/час в весенне-летний период года и 21 цикл/час в осенне-зимний.

Максимальная устойчивость вод в Чукотском море наступает в июле, а в море Бофорта — в июне. В Чукотском море плотностная стратификация наиболее выражена у западного побережья, в районе влияния опресненных вод вдоль берегового Сибирского течения. Значения $N_{\max}(z)$ достигают в июне 34 цикл/час, в июле — 37 цикл/час. В море Бофорта наибольших значений $N_{\max}(z)$ достигает в зоне воздействия стока Макензи: ≈ 80 цикл/час — в июне, ≈ 74 цикл/час — в июле. В прикромочных районах значения $N_{\max}(z)$ достигают 25–30 цикл/час.

Определено, что сток Печоры оказывает влияние на гидрологические условия юго-восточного района Баренцева моря и юго-западную часть Карского моря (рис. 2а). Коэффициенты R_0 достигают значений 0,68 в мае и 0,76 — в июне. Области влияния Оби находятся в юго-западном, северо-западном и центральном районах Карского моря (рис. 2б). Максимальные значения R_0 изменяются от 0,64 до 0,72 (с максимумом в июле). Статистически значимая связь найдена также с суммарными объемами стока за предшествующие 3 и 6 месяцев, R_3 , R_6 достигают 0,7.



Примечание. Выделенные участки — районы статистически значимых значений R (90% доверительный интервал)

Рис. 2. Карты распределения коэффициентов корреляции R_0

Изменчивость стока Енисея (рис. 2в) влияет на гидрологию восточного района Карского моря, а также северо-западного и центрального районов моря Лаптевых, где величины R_0 достигают значений 0,46–0,49. Коэффициенты R_6 , R_9 достигают значимых положительных величин вблизи побережья полуострова Таймыр, вследствие восточного переноса опресненной шельфовой линзы Карского моря. Максимум R_9 отмечен в июле $\approx 0,60$. Области значимых R_0 между объемом стока Хатанги и максимумами частоты Вьясяля-Брента по глубине лежат в западном и северо-западном районах моря Лаптевых. За период июнь–сентябрь максимальные значения коэффициентов R_0 изменяются от 0,52 до 0,85. Коэффициенты

R_0 между объемом стока Лены и максимумами частоты Вьясяля-Брента достигают статистически значимых величин от 0,44 до 0,66 (с максимумом в сентябре) в опресненной прибрежной зоне шельфа.

На плотностной стратификации Восточно-Сибирского моря отражается изменчивость стока Колымы. Коэффициенты R_0 достигают $\approx 0,62$ в июле; а $R_3, R_6, R_9 \approx 0,56; 0,51; 0,50$ в сентябре. Районы наибольших значений R_0 расположены на западе и востоке моря (рис. 2з).

Наибольшее влияние на плотностную стратификацию вод морей Чукотского и Бофорта оказывает сток Маккензи и Юкона за предшествующий месяц, а сток Колымы – за 3, 6 предшествующих месяцев. Влияние стока Маккензи наиболее выражено с июля по сентябрь. Области значимых коэффициентов R_1 находятся в юго-восточной и центральной частях моря Бофорта. Максимум достигает $\approx 0,60$. Влияние стока Юкона определяется в районе Берингова пролива, в северном районе Чукотского моря и на западной периферии круговорота Бофорта, куда поступают опресненные стоком Юкона воды Аляскинского прибрежного течения.

Значения коэффициентов корреляции наибольшие в сентябре, достигают 0,75. 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. Величины R_6 достигают максимума в августе и сентябре и составляют $\approx 0,52$.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания FNNN-2024-0001.

Библиографические ссылки

1. Carmack E. C., Yamamoto-Kawai M., Haine T. W. N., Bacon S., Bluhm B. A., Lique C., Melling H., Polyakov I. V., Straneo F., Timmermans M. L., et al., 2016. Freshwater and its role in the Arctic Marine System: Sources, disposition, storage, export, and physical and biogeochemical consequences in the Arctic and global oceans. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 121, 675-717. doi: <https://doi.org/10.1002/2015JG003140>

2. Randelhoff A., Holding J., Janout M., Sejr M. K., Babin M., Tremblay J. É., et al., 2020. Pan-arctic ocean primary production constrained by turbulent nitrate fluxes. *Front. Mar. Sci.* 7:150. doi: <https://doi.org/10.3389/fmars>.

3. Zuo H., Balmaseda M. A., Mogensen K., 2015. The new eddy-permitting ORAP5 ocean reanalysis: description, evaluation and uncertainties in climate signals. *Climate Dynamics*, doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2675-1>

4. Zuo H., Balmaseda M. A., Mogensen K., 2015. The ECMWF-MyOcean2 eddy-permitting ocean and sea-ice reanalysis ORAP5. Part 1: Implementation. *ECMWF Tech Memo (736)*, doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3305.2248>

5. Букатов А. А., Соловей Н. М., Павленко Е. А. Свободные короткопериодные внутренние волны в арктических морях России // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 6. с. 645–658. doi:10.22449/0233-7584-2021-6-645-658