

ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА ПОД ВЛИЯНИЕМ УВЕЛИЧИВАЮЩЕГОСЯ РЕЧНОГО СТОКА

Марина Алексеевна Тарханова

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, аспирант, тел. (383)330-64-60, e-mail: tarkhanova@sscc.ru

Елена Николаевна Голубева

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)330-64-50, e-mail: elen@ommfao.sccc.ru

В работе рассматриваются вопросы, связанные с влиянием повышенного стока арктических рек на формирование термохалинной структуры вод за пределами арктического шельфа и, в частности, на изменчивость теплосодержания глубоководной части Северного Ледовитого океана. Исследование проводится на основе трехмерной численной модели океана и морского льда SibCIOM и данных реанализа атмосферы NCEP/NCAR. Результаты численного моделирования показали, что увеличение расхода арктических рек способствует повышению устойчивости стратификации вод за пределами шельфовых районов, что сокращает глубину осенне-зимнего перемешивания и позволяет атлантическим водам, распространяющимся вдоль материкового склона, сохранять свое тепло. Об этом свидетельствует повышение теплосодержания вод верхнего 200-метрового слоя восточной части Евразийского бассейна и подъем верхней границы слоя атлантических вод в этом регионе.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, речной сток, циркуляция океана, теплосодержание, численное моделирование

CHANGES IN THE HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE ARCTIC OCEAN UNDER THE INFLUENCE OF INCREASING RIVER RUNOFF

Marina A. Tarkhanova

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D. Student, phone: (383)330-64-60, e-mail: tarkhanova@sscc.ru

Elena N. Golubeva

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Leading Researcher, phone: (383)330-64-50, e-mail: elen@ommfao.sccc.ru

The paper considers issues related to the influence of increased Arctic river runoff on the formation of the thermohaline structure of waters outside the Arctic shelf and, in particular, on the variability of heat content of the deep Arctic Ocean. The study is carried out using the three-dimensional numerical model of the ocean and sea ice SibCIOM and atmospheric reanalysis data NCEP/NCAR. Numerical simulation results showed that increased flow of Arctic rivers contributes to the stability of water stratification outside the shelf areas, which reduces the depth of autumn-winter mixing and

allows Atlantic waters spreading along the continental slope to retain their heat. This is evidenced by an increase in the heat content of the upper 200 m layer waters of the eastern Eurasian basin and the rise of the Atlantic water layer upper boundary in this region.

Keywords: Arctic Ocean, river runoff, ocean circulation, heat content, numerical simulation

Введение

В последние годы в структуре вод и состоянии Северного Ледовитого океана происходят существенные изменения, связанные с процессами изменения климата. Эти изменения проявляются в сокращении площади летнего морского льда [1], более раннем освобождении ото льда весной и более позднем осеннем обледенении арктических морей [2], увеличении стока арктических рек [3], повышении теплосодержания как глубоководных районов океана, так и мелководных шельфовых районов [4], и других явлениях. В данной работе выделяется роль повышенного речного стока в формировании и изменчивости состояния Северного Ледовитого океана.

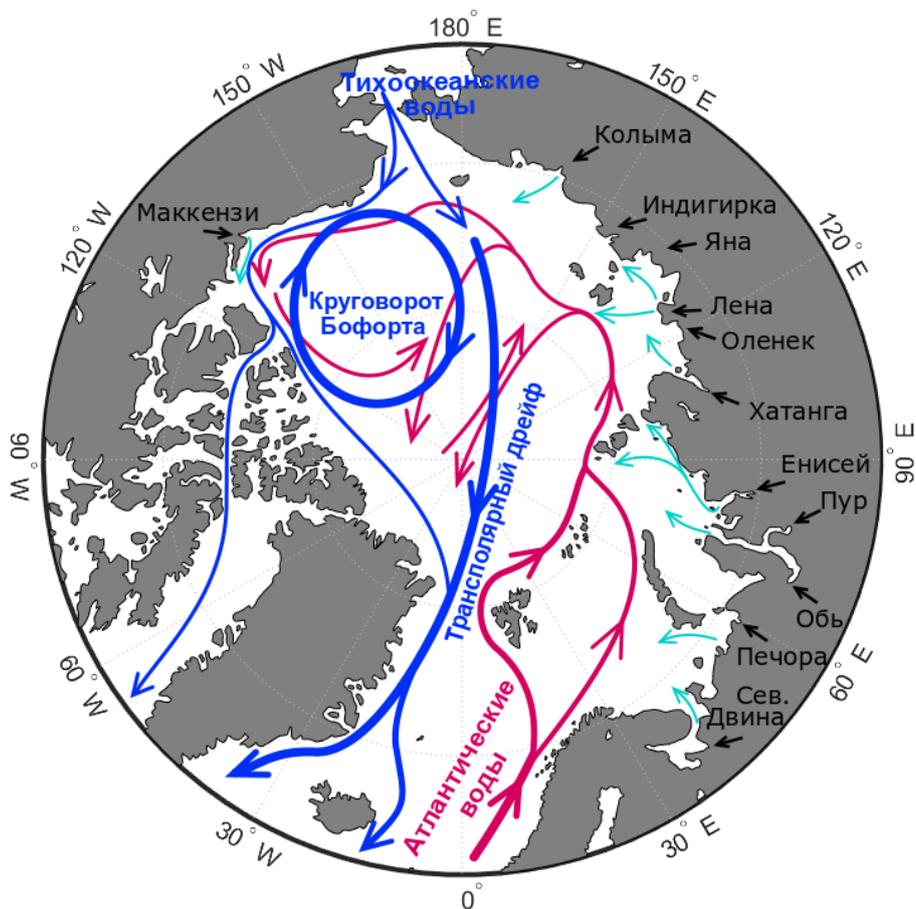


Рис. 1. Схема движения водных масс Северного Ледовитого океана (в соответствии с работами [5, 6]).

Синим цветом обозначены холодные поверхностные течения, красным – траектория распространения теплых атлантических вод, зеленым – траектории распространения пресных речных вод

Постепенное увеличение объема поступления пресных вод в Северный Ледовитый океан хорошо задокументировано и наблюдается с самого начала мониторинга арктических рек (с 1936 года на евразийских реках и с 1970-х годов на реках Северной Америки) [3]. Согласно результатам модельных расчетов увеличение притока тепла с речными водами в последнее десятилетие привело к потеплению обширных участков арктического шельфа, что впоследствии способствовало усилению теплообмена между океаном и атмосферой и уменьшению толщины морского льда зимой по сравнению с 1980-ми годами [7]. Дальнейшее включение речных вод в общую циркуляцию океана (рис. 1) может привести к подобным изменениям в глубоководных частях арктического бассейна, но последствия для этих удаленных от мест впадения рек регионов изучены недостаточно широко. В связи с этим, основной целью данного исследования является анализ влияния повышенного речного стока на изменчивость гидрологических характеристик за пределами шельфовой зоны.

Методы и материалы

Для выявления чувствительности гидрологических характеристик Северного Ледовитого океана к интенсивности стока рек была проведена серия численных экспериментов с использованием трехмерной численной модели Sib-CIOM, разработанной в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН [8, 9]. Для учета атмосферного влияния в модели использовались данные реанализа атмосферы NCEP/NCAR [10]. Морской лед описан с помощью модели CICE-3.14 Лос-Аламосской национальной лаборатории США [11-14].

Численные эксперименты включали в себя вариации речных расходов при неизменных остальных условиях. В базовом эксперименте, направленном на воспроизведение пространственно-временной изменчивости циркуляции вод и полей температуры и солёности в СЛО в период с 1948 года по настоящее время, задается среднемесячный климатический речной расход для одиннадцати основных арктических рек, характерный для 50-80-х гг. прошлого столетия [15] (рис. 2).

В экспериментах с вариациями речного расхода, интенсивность стока некоторых рек изменена с 2000 года. В первом из них (под названием RSib) повышен расход Оби, Енисея и Лены, как наиболее полноводных из сибирских рек, в 1.3 раза, в другом (под названием RMk) отслеживается влияние североамериканского континентального стока за счет повышения расхода реки Маккензи так же в 1.3 раза.

В качестве начального состояния океана используется состояние из базового эксперимента на момент первого изменения стоков рек (начало 2000 г.). Затем рассматриваются отклонения в состоянии среднемесячных модельных полей в расчетах с повышенными расходами от результатов базового эксперимента. При этом основное внимание уделяется состоянию вод за пределами арктического шельфа.

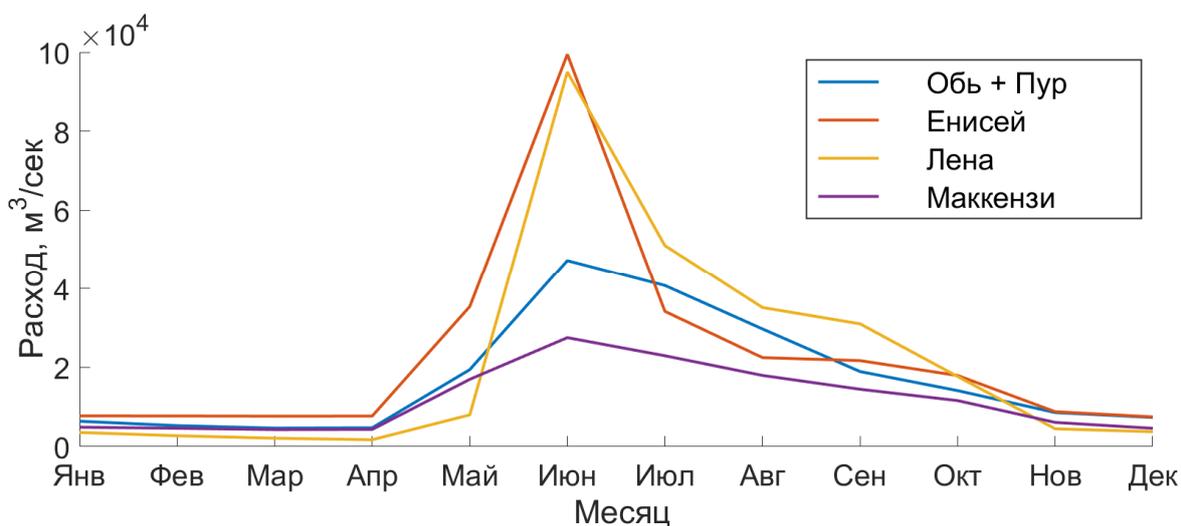


Рис. 2. Среднемесячный климатический речной расход наиболее крупных арктических рек, использованный в базовом численном эксперименте (на основе данных R-ArcticNET [15])

Результаты и обсуждения

Анализ результатов расчета с повышением расхода сибирских рек показал наиболее быструю реакцию на увеличение пресных вод в заглублинии нижней границы галоклина в области проливов Карского моря через 2 года после начала эксперимента. Затем наблюдалось постепенное смещение зон заглублиния нижней границы галоклина, через 6 лет расчета в восточной части Евразийского бассейна и на материковом склоне в районе хребта Ломоносова, затем на материковом склоне Амеразийского бассейна через 9 лет и под конец численного расчета, через 12 лет, на материковом склоне моря Бофорта (рис. 3).

Повышенный расход рек использовался в течение всего расчета, однако наши результаты показали, что области наибольшей чувствительности галоклина со временем меняются, области максимальных значений исчезают, и это дает основание предполагать, что существование слоя холодного галоклина не является в настоящее время устойчивой характеристикой арктических вод, как считалось ранее.

При рассмотрении других характеристик вод, по отношению к базовой ситуации в случае увеличения расхода сибирских рек выявлено повышение придонной температуры Карского моря и последующее повышение температуры вод подповерхностного слоя, распространяющихся вдоль материкового склона и заполняющих Евразийский бассейн, а также повышение теплосодержания верхнего 200-метрового слоя Восточной части Евразийского бассейна (рис. 4). Сохранению тепла, поступающего в глубоководную часть через проливы Карского моря, способствовало повышение устойчивости стратификации и сокращение глубины перемешанного слоя на 5-10 м на материковом склоне Евразийского бассейна.

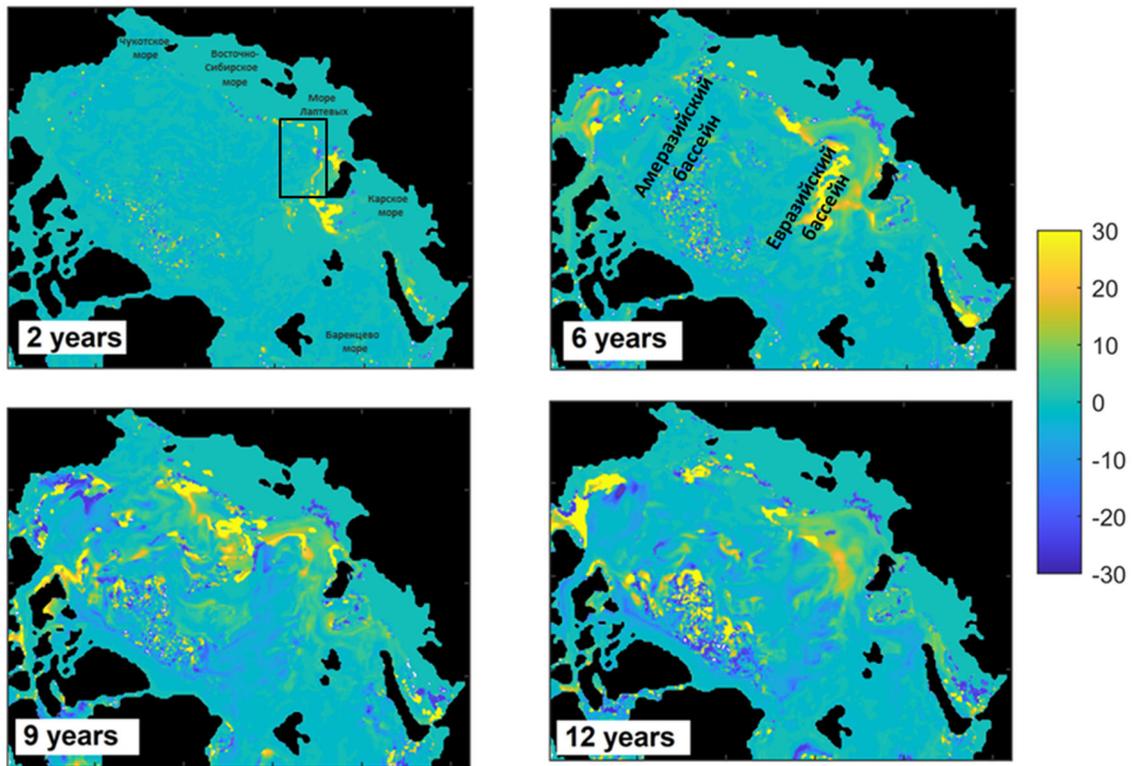


Рис. 3. Изменение глубины нижней границы галоклина в численном эксперименте с повышенным расходом сибирских рек. Положительные значения обозначают заглужение нижней границы. Черным прямоугольником выделена область осреднения температуры, показанной на рис. 4

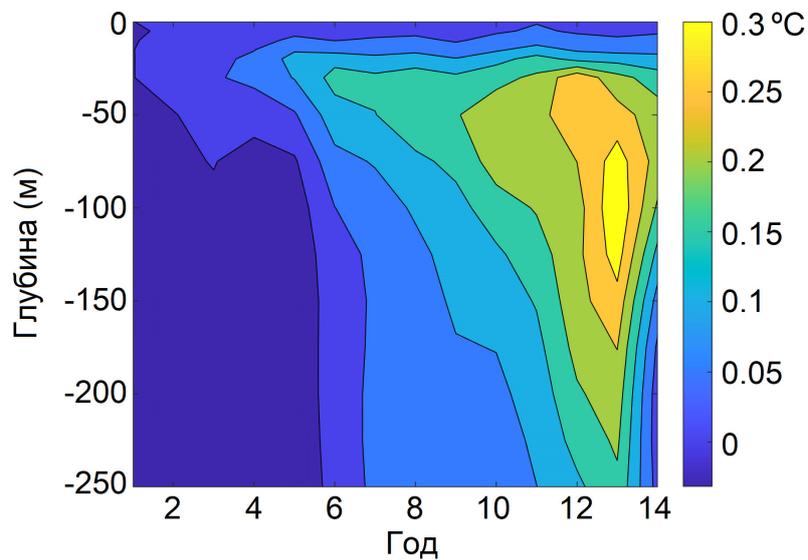


Рис. 4. Изменение профиля среднегодовой температуры восточной части Евразийского бассейна.

Область осреднения выделена на рис. 3 черным прямоугольником. Положительные значения указывают на повышение температуры воды в эксперименте RSib по сравнению с базовой ситуацией

Аналогичный процесс с задержкой по времени (6-7 лет) и в меньших масштабах развивается на материковом склоне Амеразийского бассейна и на шельфе Чукотского моря. Задержка по времени объясняется значительным расстоянием от источника пресной воды, которым в данном случае является река Лена. Перенос пресных вод на шельф Чукотского моря приводит к сокращению интенсивности конвективного перемешивания и сохранению тепла в придонных слоях моря. Аномалии тепла из восточной и центральной части Чукотского моря придонными водами переносятся в море Бофорта, повышая температуру его вод ниже в слое 50-175 м. Следует отметить, несмотря на явное присутствие аномалий температуры в море Бофорта, которые появляются через 6 лет с начала эксперимента, повышение его теплосодержания очень мало (около 1 %).

В численном эксперименте с увеличенным расходом Маккензи отклонения в теплосодержании и содержании пресной воды в море Бофорта проявляются в течение первых двух лет, однако их значения слишком малы в соответствии с небольшим расходом реки по сравнению с расходом сибирских рек. Через пять лет расчета для моря Бофорта изменения, вызванные повышением расхода сибирских рек, уже больше, чем последствия повышения расхода Маккензи (рис. 5).

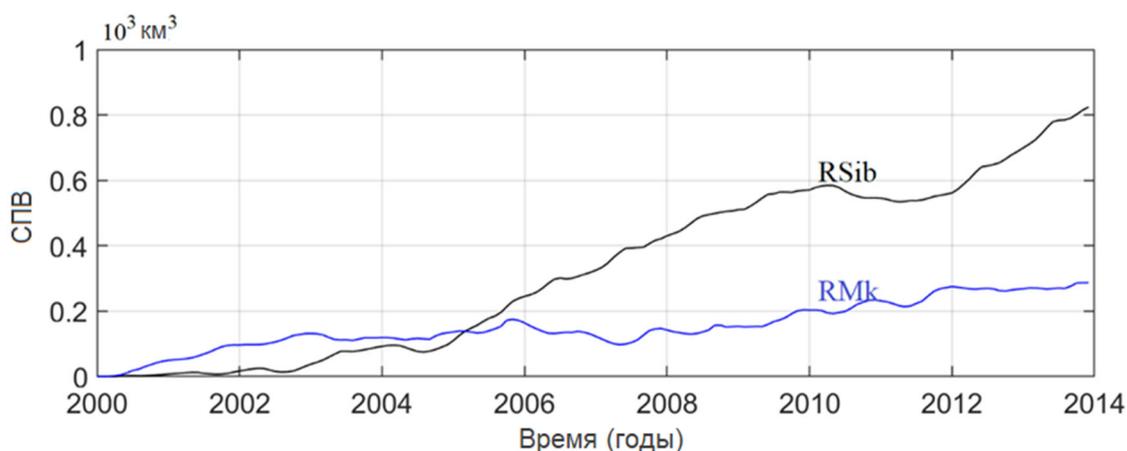


Рис. 5. Изменение содержания пресной воды (СПВ) в море Бофорта в экспериментах с повышенным расходом рек.

Среднее значение пресной воды в море Бофорта в базовом эксперименте составляет $20 \cdot 10^3 \text{ км}^3$. Изменения в экспериментах RSib и RMk не превышают 4%

Заключение

На основе трехмерного численного моделирования с использованием данных атмосферного реанализа проанализированы последствия повышенного стока рек для характеристик вод глубоководных районов Северного Ледовитого океана. По результатам численных экспериментов увеличение расхода арктических рек способствует повышению устойчивости стратификации вод за пределами шельфовых районов, что сокращает глубину осенне-зимнего перемешивания и позволяет атлантическим водам, распространяющимся вдоль материко-

вого склона, сохранять свое тепло. Об этом свидетельствует повышение тепло-содержания вод верхнего 200-метрового слоя восточной части Евразийского бассейна и подъем верхней границы слоя атлантических вод в этом регионе.

Исследование проводится при поддержке гранта РФФИ 20-05-00536 А.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Stroeve J. C. et al. The arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis // *Clim. Change.* – 2012. – V. 110. – P. 1005–1027. doi:10.1007/s10584-011-0101-1.
2. Meier W., Bhatt U. S., Walsh J., Thoman R., Bieniek P., Bitz C. M., Blanchard-Wrigglesworth E., Eicken H., Hamilton L. C., Hardman M., Hunke E., Jung T., Kurths J., Little J., Massonnet F., Overland J. E., Serreze M., Steele M., Stroeve J., Wang M., and Wiggins H. V. Editors: Turner-Bogren, B., Sheffield Guy L., and Staudt S. 2020 Sea Ice Outlook Post-Season Report. March 2021. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.arcus.org/sipn/sea-ice-outlook/2020/post-season> (дата обращения: 12.05.2021).
3. Holmes R. M., Shiklomanov A. I., Suslova A., Tretiakov M., McClelland J. W., Spencer R. G. M., Tank S. E. River Discharge [in “State of the Climate in 2018”] // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* – 2019. – V, 100 (9). – P. 161–163. doi:10.1175/2019BAMSStateoftheClimate.1.
4. Mayer M., Haimberger L., Pietschnig M., Storto A. Facets of Arctic energy accumulation based on observations and reanalyses 2000-2015 // *Geophys. Res. Lett.* – 2016. – V. 43(19). – P. 10420-10429. doi:10.1002/2016GL070557.
5. Carmack E., Polyakov I. V., Padman L. et. al. The increasing role of oceanic heat in sea ice loss in the new Arctic // *Am. Meteorol. Soc.* – 2015. – V. 96. – P. 2079–2106. doi:10.1175/BAMS-D-13-00177.1.
6. Greene C. H., Pershing A. J., Cronin T. M., Ceci N. Arctic climate change and its impacts on the ecology of the North Atlantic // *Ecology* – 2008. – V. 89. – P. 24-38. doi:10.1890/07-0550.1
7. Park H., Watanabe E., Kim Y., Polyakov I., Oshima K., Zhang X., Kimball J. S., Yang D. Increasing riverine heat influx triggers Arctic sea ice decline and oceanic and atmospheric warming // *Science Advances.* – 2020. – V. 6. – N. 45. – eabc4699. doi:10.1126/sciadv.abc4699.
8. Golubeva E. N., Platov G. A. On improving the simulation of Atlantic Water circulation in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* – 2007. – V. 112. – C04S05. doi:10.1029/2006JC003734.
9. Голубева Е.Н. Численное моделирование динамики атлантических вод в Арктическом бассейне с использованием схемы QUICKEST // *Вычислительные технологии.* – 2008. – Т. 13. – № 5. – С. 11-24.
10. Kalnay E., et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* – 1996. – V. 77. – P. 437-470. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> (дата обращения: 12.05.2021).
11. Hunke E. C., Dukowicz J. K. An elastic-viscous-plastic model for ice dynamics // *J. Phys. Oceanography.* – 1997. – V. 27. – P. 1849–1867. doi:10.1016/j.ocemod.2009.01.004.
12. Bitz C. M., Lipscomb W. H. An energy-conserving thermodynamic model of sea ice // *J. Geophys. Res.* – 1999. – V. 104. – P. 669-677.
13. Dukowicz J. K., Baumgardner J. R. Incremental remapping as a transport / advection algorithm // *J. Comput. Phys.* – 2000. – V. 160. – P. 318–335. doi:10.1006/jcph.2000.6465.
14. Lipscomb W. H., Hunke E. C. Modeling sea ice transport using incremental remapping // *Mon. Wea. Rev.* – 2004. – V. 132. – P. 1341–1354. doi:10.1175/1520-0493(2004)132<1341:MSITUI>2.0.CO;2.
15. A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network For the Arctic Region [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html> (дата обращения: 12.05.2021).

© М. А. Тарханова, Е. Н. Голубева, 2021