

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ АРКТИЧЕСКОГО ХАЛОКЛИНА

Марина Алексеевна Тарханова

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, магистрант, тел. (923)235-55-85, e-mail: m.tarkhanova@g.nsu.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. (913)926-75-21, e-mail: e.golubeva.nsk@gmail.com

В настоящей работе обсуждаются вопросы, связанные с анализом состояния арктического халоклина в течение последних десятилетий. Данные наблюдений показывают, что слой халоклина в Северном Ледовитом океане в последние 40 лет претерпевает существенные изменения, которые могут оказывать влияние на ледяной покров Арктики.

Исследование проводилось на основе трехмерной численной модели океана и морского льда, разработанной в ИВМиМГ СО РАН. Основное внимание уделяется анализу модельного распределения солёности вод верхнего 250-метрового слоя и ее изменчивости. На основе численных экспериментов по чувствительности термохалинной стратификации к вариациям атмосферного воздействия и интенсивности речного стока выделяются области Арктического бассейна, в которых изменчивость арктического халоклина наиболее выражена.

Ключевые слова: арктический халоклин, термохалинная циркуляция, ледяной покров, стратификация океана, численное моделирование.

NUMERICAL SIMULATION OF ARCTIC HALOCLINE FORMATION

Marina A. Tarkhanova

Novosibirsk State University, 2, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia, Graduate, phone: (923)235-55-85, e-mail: m.tarkhanova@g.nsu.ru

Elena N. Golubeva

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Akademik Lavrentiev Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Leading Researcher, phone: (913)926-75-21, e-mail: e.golubeva.nsk@gmail.com

This paper discusses issues related to the analysis of the Arctic halocline state over the past decades. Observational data show that the layer of halocline in the Arctic Ocean significantly changed in the last 40 years, which may affect the Arctic ice cover.

For the study we used a three-dimensional ocean and sea ice numerical model developed at the ICMMG SB RAS. The main attention was devoted to the analysis of the model distribution of water salinity in the upper 250-meter layer and its variability. Based on numerical experiments on the sensitivity of thermohaline stratification to variations in atmospheric effects and the intensity of river flow, we identified areas of the Arctic basin in which the variability of the Arctic halocline was the most pronounced.

Key words: Arctic halocline, thermohaline circulation, ice cover, ocean stratification, numerical simulation.

Введение

В отличие от субтропических морей, где стратификация определяется преимущественно температурой, стратификация высокоширотных морей в обоих полушариях по большей части зависит от солености [1]. В Северном Ледовитом океане (СЛО) формирование термохалинной структуры обусловлено несколькими факторами, среди которых основными выделяются поступление огромных объемов различных водных масс и интенсивные процессы образования и таяния льда [2].

Результирующая соленостная стратификация является доминирующей характеристикой СЛО. Слой холодного халоклина, состоящий из вод, близких к температуре замерзания, определяется на глубине от 50 до 250 м между холодным верхним перемешанным слоем и нижележащим более теплым слоем атлантической воды [3]. В глубоководной части полярного океана морской лед может образовываться только там, где постоянный халоклин сдерживает глубокую термическую конвекцию. Также соленостная стратификация ограничивает восходящий диффузионный поток тепла от слоя атлантических вод, что тоже позволяет сохранять ледяной покров [4].

Выраженные халоклинные структуры наблюдаются в Канадском и Евразийском бассейнах СЛО [5]. Данные наблюдений показывают, что состояние арктического халоклина существенно меняется в последние десятилетия. По данным, собранным во время научных ледовых экспедиций Oden'91, SCICEX'93 и SCICEX'95, произошли изменения в солесодержании халоклина и охваченной им площади, а также в теплосодержании и глубине атлантического водного слоя [6].

Важную роль в формировании соленостной стратификации СЛО играет распреснение поверхностных вод океана за счет континентального стока рек. Обобщение данных мониторинга рек показывает, что среднегодовой расход пресной воды из шести крупнейших евразийских рек в Северный Ледовитый океан увеличился на 7% с 1936 по 1999 год [7].

За значительные изменения в состоянии и изменчивости параметров арктического бассейна также ответственны динамически связанные друг с другом атмосферная циркуляция, дрейф льда и движение океана, вызванное ветровой обстановкой. Изменчивость циркуляции в верхних слоях океана коррелирует в межгодовых временных масштабах с давлением на уровне моря, что тоже связано с циркуляцией морского льда [8]. В работе [9] описаны изменения атмосферной циркуляции в 1984-2013 гг. по сравнению с периодом 1948-1977 гг. В осредненных за тридцатилетние периоды данных отмечается тенденция к интенсификации циклонического атмосферного движения из-за понижения давления на уровне моря над Северным Ледовитым океаном и сокращения площади арктического максимума, сосредоточенного над регионом круговорота Бофорта.

Целью данного исследования является анализ чувствительности модельного распределения гидрологических характеристик верхнего слоя океана к вариациям атмосферного воздействия (интенсивности антициклонической циркуляции в Канадском бассейне) и увеличению речного стока сибирских рек.

Методы и материалы

Исследование проводится на основе трехмерной численной модели океана и морского льда SibCIOM (Siberian Coupled Ice-Ocean Model), разработанной в ИВМиМГ СО РАН для исследования климатической изменчивости Северного Ледовитого океана [10, 11], с использованием данных реанализа атмосферы NCEP/NCAR [12]. Состояние морского льда рассчитывается с помощью модели CICE-3.14 Лос-Аламосской национальной лаборатории США [13-16].

Моделируемая область, включающая в себя Северный Ледовитый океан и Атлантический океан, ограничен 20° ю.ш. В области строится трехполярная ортогональная сетка, состоящая из 38 вертикальных уровней, с разрешением 30-50 км в Арктике и $1^\circ \times 1^\circ$ в Атлантике.

Для проведения исследования чувствительности распределения гидрологических полей СЛО к изменчивости динамического атмосферного воздействия и стока сибирских рек на были проведены следующие численные эксперименты:

1. Базовый эксперимент A0, проведенный для временного периода с 1948 года по настоящее время восстанавливает пространственно-временной изменчивость циркуляции вод и полей температуры и солёности.

- Для учета атмосферного влияния использованы данные реанализа атмосферы NCEP/NCAR [12].

- Для задания стока рек использованы среднемесячные климатические значения R-ArcticNET [17], характерные для 50-80-х гг. прошлого столетия.

2. Эксперименты по чувствительности состояния арктического халоклина к изменчивости динамического воздействия атмосферы:

- Эксперимент A1: В базовом расчете A0 с 1979 года усилена антициклоническая завихренность ветра над Канадским бассейном.

- Эксперимент A2: В базовом расчете A0 с 1979 года ослаблена антициклоническая завихренность ветра над Канадским бассейном.

3. Эксперимент P1 по исследованию чувствительности распределения солёности к интенсивности речного стока:

- В базовом расчете A0 с 2000 года расход реки Лены повышен в 1.5 раза.

Результаты и обсуждение

Результаты численного моделирования, проведенного по базовому эксперименту, отражают изменчивость состояния термохалинных полей и циркуляции вод СЛО, вызванную изменчивостью атмосферы полярных широт. Поля течений демонстрируют продолжительное существование двух основных режимов циркуляции поверхностных вод: антициклонического и циклонического.

При антициклоническом режиме существование слоя холодного халоклина в Канадском бассейне поддерживается поступлением Тихоокеанских вод и вод реки Маккензи, а в Евразийском бассейне – распространением пресных вод сибирских рек. Изменение атмосферного режима с антициклонического на циклонический приводит к тому, что поверхностные воды также меняют направление

циркуляции, и поступающие на сибирский шельф речные воды распространяются в сторону Канадского бассейна. За счет этого в Евразийском бассейне снижается поступление пресной воды, и происходит ослабление халоклинового слоя (рис. 1).

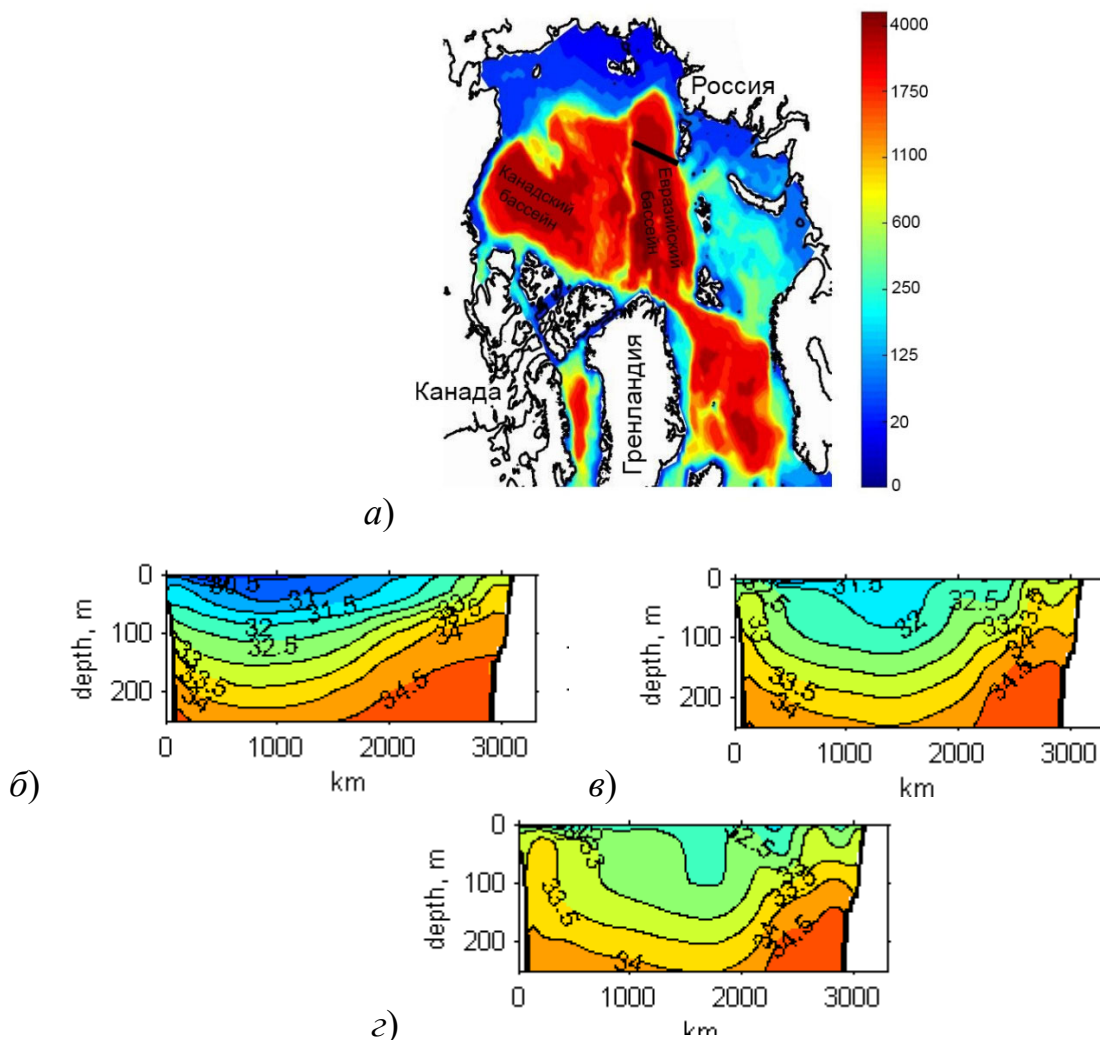


Рис. 1. *а)* Батиметрия расчетной области с указанием разреза, для которого приведены распределения солёности; рассчитанные вертикальные распределения солёности в период *б)* 1960-1970 гг., *в)* 1975-1985 гг., *з)* 1985-1995 гг.

В последующий период, после 1997 года, опять существенно изменился режим атмосферной циркуляции, произошло восстановление слоя холодного халоклина.

Эксперименты по чувствительности состояния халоклина к режиму атмосферной циркуляции представляют собой базовые эксперименты, в которых с 1979 года усилена (эксперимент А1) или ослаблена (эксперимент А2) антициклоническая завихренность ветра над морем Бофорта (рис. 2, *а*).

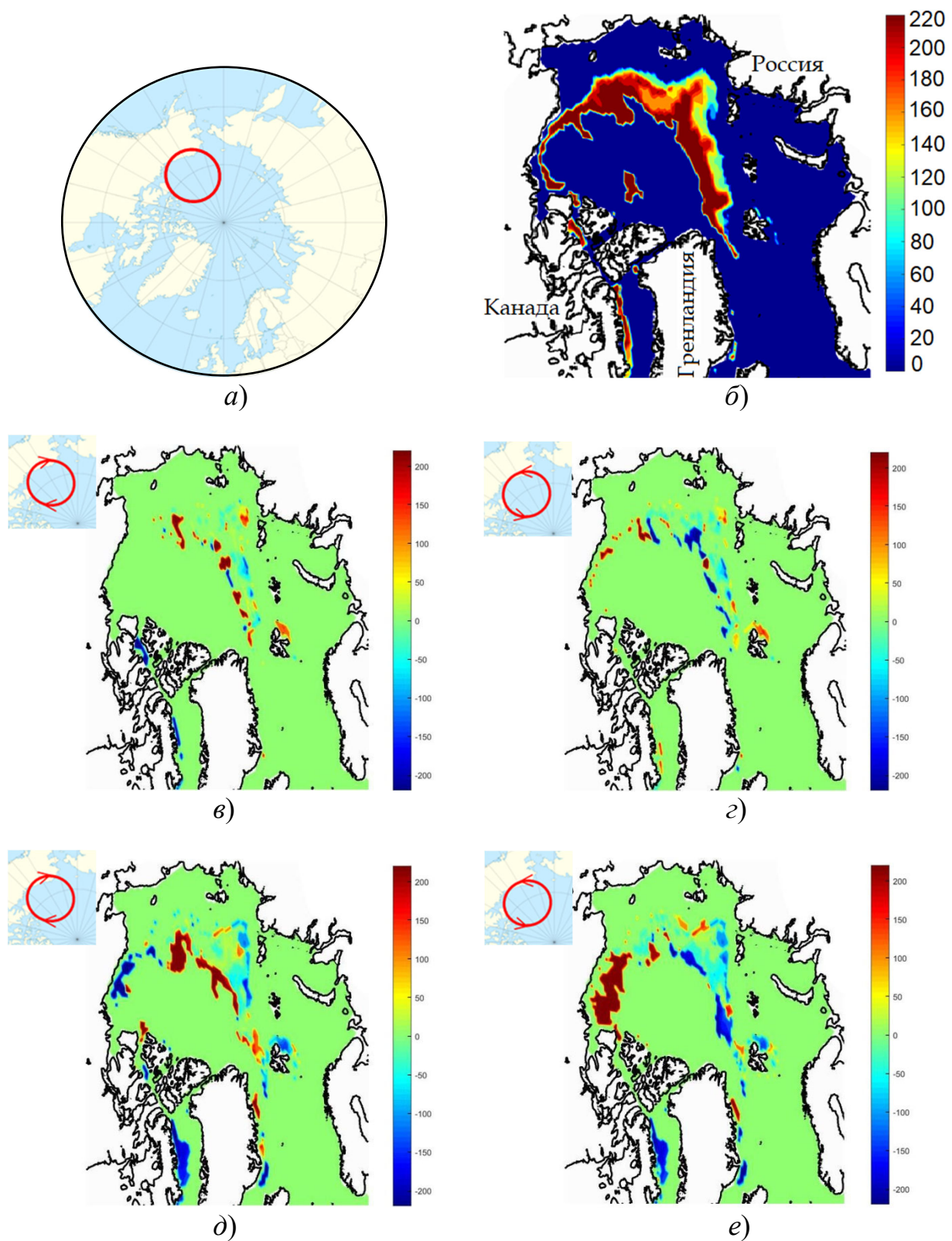


Рис. 2. *а)* Зона изменения атмосферного давления радиусом 1000 км.
б) Глубина слоя арктического халоклина, базовый эксперимент А0, 1985 г.
 Отклонения глубины слоя арктического халоклина в эксперименте:
в) А1, 1985 г., *г)* А2, 1985 г., *д)* А1, 1995 г., *е)* А2, 1995 г.

Спустя несколько лет, основные бассейны Северного Ледовитого океана (Канадский и Евразийский) показывают противоположный друг другу отклик в формировании области халоклина (рис. 2в-2е) по сравнению с базовой ситуацией (рис. 2б). Зона распространения халоклина выделялась, как глубина слоя с отрицательной температурой, в котором присутствует перепад солёности на 2 ‰ и более. В Канадском бассейне существенные изменения в распределении халоклинового слоя заметны раньше, чем в более отдаленных от зоны изменения атмосферного давления регионах. Так, в море Бофорта отмечается ослабление или усиление халоклина уже в 1985 году, в то время как в Евразийском бассейне выраженные изменения наблюдаются на 10 лет позже (рис. 3).

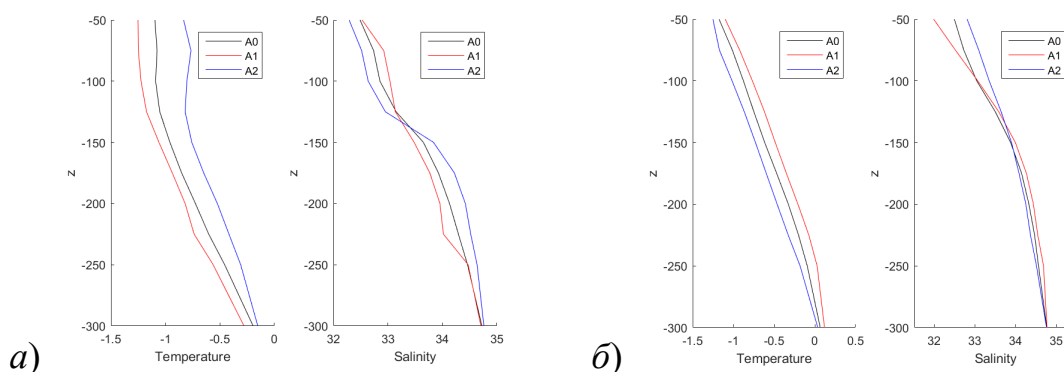


Рис. 3. Рассчитанные вертикальные профили температуры и солёности: а) в море Бофорта (Канадский бассейн) в 1985 году; б) в Евразийском бассейне в 1995 году.

Исследование влияния интенсивности речного стока на распределение солёности в Арктике представляет интерес в связи с увеличившимся в последние годы расходом сибирских рек [18]. Модельный эксперимент P1 отличается от базового A0 повышенным в 1.5 раза расходом реки Лена в течение 15 лет, начиная с 2000 года. По результатам расчетов в 2014 году выраженный халоклин возник в большей части Канадского бассейна, а в Евразийском бассейне, наоборот, произошло его ослабление (рис. 4).

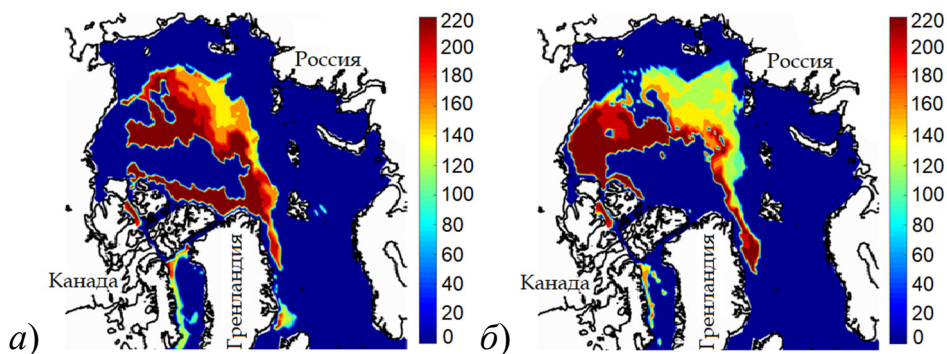


Рис. 4. Модельная глубина слоя арктического халоклина в 2014 г. а) эксперимент A0, б) эксперимент P1.

Заключение

На основе трехмерного численного моделирования проанализировано влияние изменчивости циркуляции атмосферы над акваторией Северного Ледовитого океана на состояние термохалинных характеристик верхнего слоя океана. Анализ модельных результатов показал, что ослабление антициклонической завихренности поля ветра над Канадским бассейном способствует более интенсивному переносу пресных вод сибирских рек в восточном направлении. В канадском бассейне происходит усиление халоклина. В Евразийском бассейне, напротив, происходит сокращение градиентов солености и ослабление слоя холодного халоклина, что, в свою очередь, будет приводить к интенсификации вертикального перемешивания и переносу тепла от слоя атлантических вод к поверхности.

Численные эксперименты показывают также чувствительность гидрологических полей СЛО к продолжительным вариациям стока арктических рек. В частности, увеличение расхода только р. Лены в полтора раза в течение пятнадцати расчетных лет привело в модельных результатах к ослаблению слоя халоклина в Евразийском бассейне и его усилению в Канадском бассейне.

Благодарности

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Carmack E. C. The alpha/beta ocean distinction: A perspective on freshwater fluxes, convection, nutrients and productivity in high-latitude seas // *Deep-Sea Res. II.* – 2007. – V. 54. – P. 2578–2598. doi:10.1016/j.dsr2.2007.08.018.
2. Никифоров Е. Г., Шпайхер А. О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. – Л: Гидрометеоздат., 1980. – 270 с.
3. Aagaard K., Coachman L. K. On the halocline of the Arctic Ocean // *Deep Sea Res.* – 1981. – V. 28. – P. 529–547.
4. Carmack E. C., et al. 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.* – 2016. – V. 121. doi:10.1002/2015JG003140.
5. Polyakov I. V., Pnyushkov A. V., Carmack E. Stability of the arctic halocline: a new indicator of arctic climate change // *Environmental Research Letters.* – 2018. – V. 13(12). doi: 10.1088/1748-9326/aac1e.
6. Steele, M., Boyd T. Retreat of the cold halocline layer in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* – 1998. – V. 103. – № C5. – P. 10,419-10,435. doi:10.1029/98JC00580.
7. Peterson B. J., et al. Increasing River Discharge to the Arctic Ocean // *Science.* – 2002. – V. 298. doi:10.1126/science.1077445.
8. Boyd T. J., Steele M., Muench R. D., Gunn J. T. Partial recovery of the Arctic Ocean halocline // *Geophysical research letters.* – 2002. – V. 29. – № 14. doi:10.1029/2001GL014047.
9. Proshutinsky A., Dukhovskoy D., Timmermans M.-L., Krishfield R., Bamber J. Arctic circulation regimes // *Phil. Trans. R. Soc. A.* – 2015. – V. 373. doi:10.1098/rsta.2014.0160.
10. 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.

11. Голубева Е. Н. Моделирование циркуляции океана и его отклика на вариации атмосферной динамики: Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – Новосибирск. – 2010.
12. Kalnay, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 1996. – V. 77. – P. 437-470. <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> (дата обращения: 17.06.2020).
13. 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.
14. Bitz C. M., Lipscomb W. H. An energy-conserving thermodynamic model of sea ice // J. Geophys. Res. – 1999. – V. 104. – P. 669-677.
15. 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.
16. 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.
17. A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network For the Arctic Region. <http://www.arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html> (дата обращения: 17.06.2020).
18. Holmes R. M., Shiklomanov A. I., Arctic Report Card: Update for 2018. <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2018/ArtMID/7878/ArticleID/786/River-Discharge> (дата обращения: 17.06.2020).

© М. А. Тарханова, Е. Н. Голубева, 2020