

УДК 551.465.45

Исследование механизмов формирования подповерхностного максимума температуры в Канадском бассейне Северного Ледовитого океана

Д.Ф. Якшина^{1,2}, Е.Н. Голубева^{1,2*}

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Поступила в редакцию 20.01.2017 г.

Изучаются возможные причины формирования подповерхностного максимума температуры в покрытых льдом водах Северного Ледовитого океана. Численные эксперименты, проведенные на основе трехмерной модели океана и морского льда, показывают, что при учете проникающей радиации формирование подповерхностного максимума температуры происходит в летний период при сокращении толщины льда до 2 м; его постепенное разрушение происходит в течение осеннего сезона за счет процесса интенсивного вертикального перемешивания. Оценивается влияние учета проникающей коротковолновой радиации на толщину ледового покрова.

Ключевые слова: вертикальная структура вод, изменение климата, морской лед, Северный Ледовитый океан, численное моделирование, проникающая радиация; ocean water stratification, climate-change, sea ice, Arctic Ocean, numerical modeling, penetrative radiation.

Введение

Климатические изменения последних десятилетий ярче всего проявляются в сокращении площади арктического льда. Усиление таяния льда приводит к тому, что все большее количество солнечной радиации проникает в верхние слои океана. Это, в свою очередь, приводит к тому, что тепловые потоки от океана становятся интенсивнее и, как следствие, способствуют еще более активному таянию льда.

Одним из индикаторов этого процесса является формирование так называемого подповерхностного температурного максимума (ПТМ) — локального максимума в вертикальном распределении температуры поверхностного слоя [1]. Возникает этот максимум в летние месяцы, когда в верхние слои океана проникает достаточное количество солнечной радиации. Продолжительность его существования зависит от многих факторов. В частности, увеличение содержания пресной воды, обусловленное таянием льда, приводит к усилению стратификации поверхностных вод, что сокращает перемешивание поверхностных слоев и может изолировать ПТМ под галоклином [1]. Экмановская конвергенция при антициклонической

циркуляции в северном полушарии приводит к даунвеллингу поверхностных вод, вследствие чего ПТМ может оказаться под перемешанным слоем и тем самым сохранить тепло от атмосферного выхолаживания. Чем выше температура ПТМ, тем больше вероятность его сохранения в течение года. По имеющимся данным наблюдений [2], ранее ПТМ существовал только в летние месяцы, в последние же годы наметилась тенденция к его сохранению в течение зимы.

В работе [3] проводилось исследование ПТМ с помощью совместной региональной модели океан—лед PIOMAS: были отмечены области существования ПТМ и их изменение со временем, обозначены причины, по которым в одних областях ПТМ сохраняется в течение года, а в иных разрушается до наступления зимы. Так, было установлено, что в море Бофорта в течение 2007–2008 гг. присутствовали все три вышеуказанных фактора, что привело не только к сохранению ПТМ в зимние месяцы, но и к формированию двух ПТМ на разных глубинах летом 2008 г. Также в [3] предложены методы распознавания ПТМ и отличия его от нижележащего температурного максимума тихоокеанских вод.

В настоящей работе мы пытаемся воспроизвести ПТМ на основе численной модели океан—лед, разработанной в ИВМиМГ СО РАН, выясняем причины, приводящие к образованию ПТМ, а также исследуем его влияние на состояние ледового покрова.

* Дина Фаруковна Якшина (iakshina.dina@gmail.com);
Елена Николаевна Голубева (elen@ommfao.sccc.ru).

1. Численная модель и постановка численного эксперимента

Для исследования применяется совместная региональная модель, включающая в себя океаническую численную модель ИВМиМГ СО РАН и ледовую модель SICSE-3.14.

Океаническая часть подробно представлена в работах [4, 5]. Система полных нелинейных уравнений гидротермодинамики океана выписана в криволинейных ортогональных координатах с использованием традиционных приближений гидростатики и Буссинеска. Уравнения динамики решаются методом выделения баротропной и бароклинной мод, при этом баротропная часть представляется в виде решения уравнения относительно функции тока. Диффузия тепла и соли параметризуется с применением оператора второго порядка. Адвективная часть решается с помощью численной схемы 3-го порядка точности QUICKEST [5].

Используемая модель морского льда, известная под названием эластическая вязкопластическая модель (elastic viscous-plastic), является модификацией стандартной вязкопластической модели динамики льда [6]. Данная модель подробно документирована в работе [7]. Толщина снежного покрова и льда вычисляется на основе термодинамической модели [8] для каждой категории льда. Горизонтальный перенос льда осуществляется с помощью адвективной схемы полулагранжева типа [9].

Для параметризации вертикального перемешивания применяется пакет GOTM (General Ocean Turbulence Model), представляющий собой семейство одномерных турбулентных моделей, доступных для подключения в численные модели океана в качестве библиотеки, на языке FORTRAN [10]. В настоящем исследовании была использована схема k-epsilon 2-го порядка; расчет коэффициентов проводился в соответствии с работой [11].

Поглощение проникающей солнечной радиации поверхностным слоем океанических вод описывается с помощью параметризации [12], в которой количество поглощаемой радиации убывает экспоненциально с увеличением глубины:

$$Q_{\text{down}}(z) = Q_{\text{sw}} \left(r e^{-z/\mu_1} + (1-r) e^{-z/\mu_2} \right).$$

Здесь $Q_{\text{down}}(z)$ — количество солнечной радиации, поглощенной поверхностным слоем океана глубиной z , м; Q_{sw} — количество солнечной радиации, поступившей к поверхности океана. Параметры μ_1 , μ_2 , r определены для каждого из пяти типов воды, отличающихся степенью прозрачности. Для получения информации о степени прозрачности необходим биохимический блок, которого на данный момент в численной модели нет. В эксперименте мы использовали параметры, соответствующие абсолютно прозрачной воде: $\mu_1 = 0,35$, $\mu_2 = 23$, $r = 0,58$.

Для определения потоков на поверхности океана и морского льда подключались данные атмосферного реанализа NCEP/NCAR [13]. Численный эксперимент проводился для модельного периода с 1948

по 2012 г. В качестве начального распределения использовались поля океанических характеристик, полученные с помощью предварительного расчета на 30 лет с учетом меняющихся потоков на поверхности океана, рассчитанных для состояния атмосферы в 1948 г.

2. Формирование ПТМ в численной модели

Вертикальное распределение температуры в Канадском бассейне Северного Ледовитого океана имеет достаточно сложную структуру с несколькими максимумами, расположенными на разных глубинах. Наличие и глубина каждого слоя изменяются в зависимости от траектории распространения вод. Самый верхний — холодный поверхностный слой, под ним располагается слой ПТМ, ниже пролегают теплые воды тихоокеанского происхождения, и на глубине 200–1000 м проходит наиболее теплая и соленая атлантическая вода. Разные слои теплых вод характеризуются разной соленостью: тихоокеанские воды имеют соленость 31–33‰, ПТМ — менее 31, атлантические воды — более 33‰. Наряду с глубиной соленость также может быть критерием идентификации слоя.

В работе [1] на основе данных многолетних наблюдений по системе ИТР [14] были сформулированы критерии для определения существования ПТМ.

Критерий 1. Температура $T_{\text{max}} - T_f > 0,2$ °C (T_{max} — локальный максимум температуры; T_f — температура замерзания воды).

Критерий 2. Температура T_{max} более чем на $0,1^\circ$ выше, чем T_{min} (T_{min} — локальный минимум, расположенный в непосредственной близости в нижележащих слоях).

Критерий 3. Соленость должна быть менее 31‰.

На основе данных критериев по расчетным полям построены карты распределения температуры ПТМ для сентября, января и марта 2008–2009 гг. Начало формирования ПТМ происходит в августе–сентябре (рис. 1, а, в), в период, когда лед становится достаточно тонким для прохождения солнечной радиации или когда появляется открытая вода за счет термических или динамических процессов. Формируется ПТМ в областях, находящихся на границе ледового покрытия близ Центральной Арктики и в Канадском бассейне. Как правило, в этих местах лед достаточно тонкий и прозрачный для проникновения солнечной радиации. Тем не менее стратификация подо льдом достаточно сильная, так как воды слабо подвержены конвекции и защищены от ветрового воздействия. Эти факторы способствуют образованию ПТМ. К январю ПТМ не исчезает, хотя его площадь несколько сокращается; отдельные области ПТМ сохраняют тепло вплоть до марта (рис. 1, б, г).

Далее мы проследили за одной из точек области, расположенной в море Бофорта (т. А, см. рис. 1, б), в которой ПТМ формируется и сохраняется в течение зимы. На рис. 2, а изображен временной ход температуры и толщины льда для периода 2003–2011 гг.

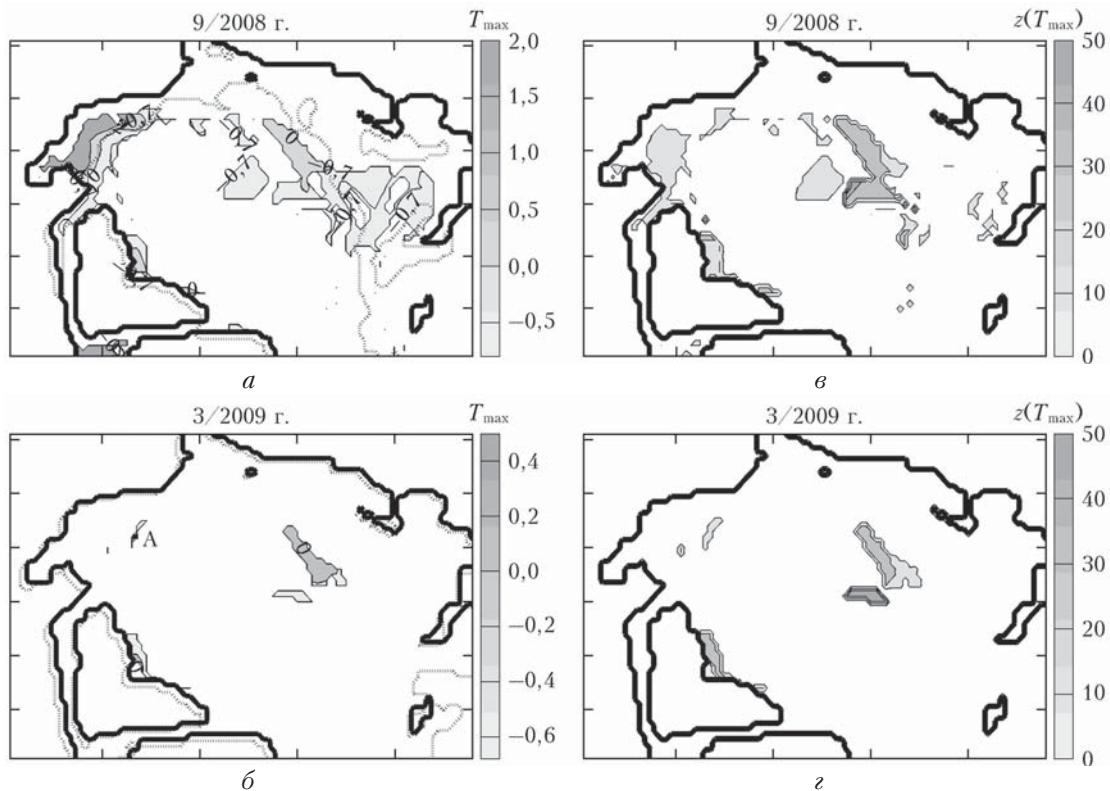


Рис. 1. Величина температурного максимума (а, б) и глубины его расположения (в, г) в области Северного Ледовитого океана, данные показаны для областей с глубиной >200 м. Точечной линией обозначена граница ледового покрова (а, б). Цифры показывают максимальную температуру

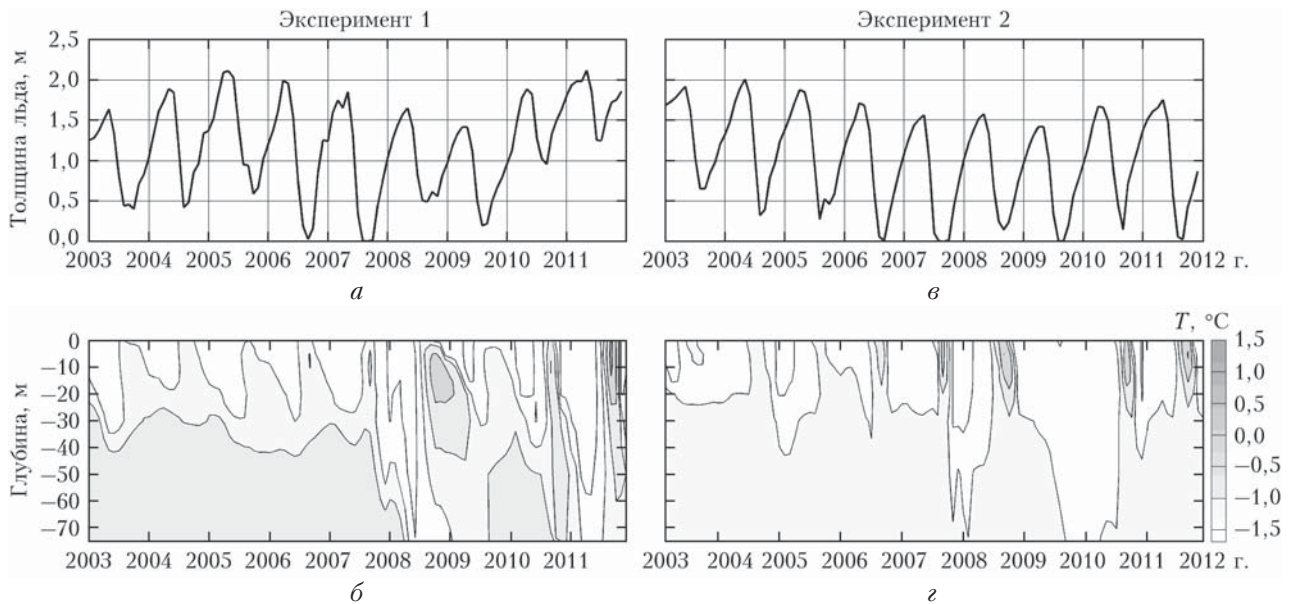


Рис. 2. Временной ход толщины льда (а, в) и температуры (б, г) для периода 2003–2011 гг.: а, б – эксперимент 1 с проникающей солнечной радиацией на основе подхода [12]; в, г – эксперимент 2, в котором вся поступающая радиация поглощается в верхнем 2,5-метровом слое океана

В некоторые годы наблюдается появление ПТМ (2007, 2008, 2009, 2011). Также на рисунке отчетливо выявляется взаимосвязь между периодами ярко выраженного температурного максимума и уменьшенной толщиной льда.

3. Влияние солнечной радиации. Эксперимент чувствительности

В работе [1] указывается, что основным механизмом, ответственным за образование ПТМ, является

поглощение солнечной радиации верхним перемешанным слоем в течение летнего периода.

Для выявления чувствительности образования ПТМ к способу поглощения солнечной радиации было проведено два эксперимента с численной моделью.

Эксперимент 1 – с учетом проникающей радиации: проникновение коротковолновой солнечной радиации рассчитывалось на основе подхода [12].

Эксперимент 2 – без учета проникающей радиации: вся поступающая коротковолновая солнечная радиация поглощается в верхнем 2,5-метровом слое океана.

При обработке результатов экспериментов были проанализированы графики временного хода толщины льда и температуры (рис. 2). В эксперименте 1 подповерхностный максимум был получен на глубине 10–20 м. В эксперименте 2 максимум температуры образуется на поверхности, а не в толще воды и существует непродолжительное время. На профилях температуры (рис. 3) в рассматриваемой точке для трех месяцев 2009 г. видно, что в эксперименте 2 локальный максимум температуры сосредоточен на поверхности в сентябре, в дальнейшем в связи с осенне-зимним выхолаживанием поверхности он смещается вниз. К марту устанавливается перемешанный слой глубиной 20 м и ПТМ полностью

исчезает (рис. 3, б). В эксперименте 1 величина температурного максимума постепенно сокращается в течение года, толщина перемешанного слоя составляет только 5 м и ПТМ фиксируется в течение всего зимнего периода (рис. 3, а).

Ранее была установлена взаимосвязь между периодами существования ПТМ и уменьшенной толщиной льда. Анализируя вышеописанные эксперименты, мы обнаружили, что таяние льда преобладает, если солнечная радиация не проникает в глубокие слои, а остается в верхних 2,5 м. Нарастание льда также преобладает в варианте без проникающей радиации. Процесс образования льда начинается в обоих экспериментах при примерно одинаковой температуре поверхности, но в эксперименте 1 (с учетом радиации) тепло из подповерхностного слоя тормозит этот процесс. Для детального анализа влияния проникающей радиации на лед были построены графики теплового потока океан–лед (рис. 4). В весенние и летние месяцы в эксперименте 2 (без учета проникающей радиации) поверхность нагревается сильнее, вследствие этого поток тепла от океана ко льду интенсивнее и скорость таяния льда выше. В зимние же месяцы тепловой поток от океана ко льду интенсивнее в эксперименте 1, и он препятствует образованию льда в этот период.

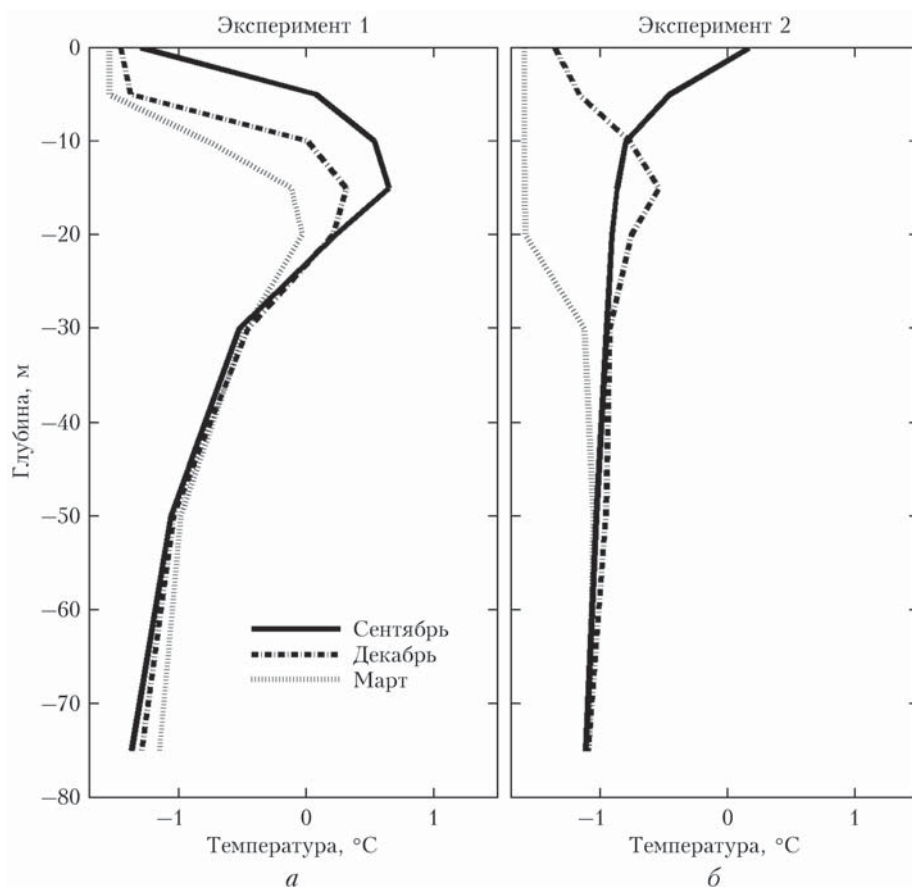


Рис. 3. Вертикальные профили температуры для т. А (см. рис. 1, б), полученные в результате численного моделирования для сентября и декабря 2008 г. и марта 2009 г.: а – эксперимент 1 (с учетом проникающей радиации); б – эксперимент 2 (без учета проникающей радиации)

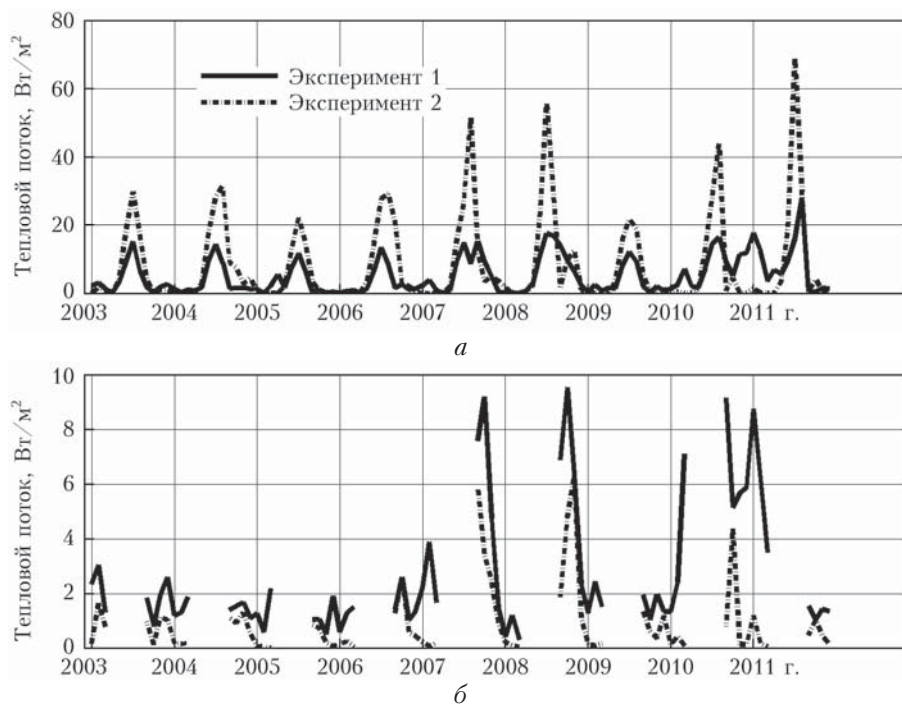


Рис. 4. Осредненный по Северному Ледовитому океану тепловой поток океан–лед ($\text{Вт}/\text{м}^2$) для периода 2003–2011 гг. (а); уточнение информации для зимних месяцев (б): сплошная линия – эксперимент 1 (с учетом проникающей радиации); пунктирная линия – эксперимент 2 (без учета проникающей радиации)

Заключение

В работе исследованы вопросы формирования подповерхностного максимума температуры [1] в водах Северного Ледовитого океана. Наличие ПТМ создает условия для сохранения тепла, полученного с солнечной радиацией в течение лета, под перемешанным слоем. Часть тепла, проникшая достаточно глубоко, способна сохраняться в течение зимы.

Выявлено, что основные области образования ПТМ находятся на границе летнего ледового покрова. Как правило, в этих местах лед достаточно тонкий и прозрачный для солнечной радиации, тем не менее стратификация подо льдом сильная, так как воды слабо подвержены конвекции и защищены от ветрового воздействия. Эти факторы способствуют образованию ПТМ. Области, в которых ПТМ сохраняется в течение зимы, большей частью находятся на достаточной глубине и изолированы от влияния атмосферы.

Так как предполагается, что основным механизмом образования ПТМ является поглощение коротковолновой солнечной радиации [1], было проведено исследование на чувствительность к способу ее поглощения в численной модели с помощью численных экспериментов, в которых либо вся радиация поглощалась в верхнем 2,5-метровом слое, либо количество поглощаемой радиации убывало экспоненциально с глубиной. Результаты экспериментов показали, что поглощение радиации в верхнем слое приводит к исчезновению ПТМ, сглаживанию вертикальных профилей температуры, а также к уменьшению толщины льда. При этом модельные расчеты без учета

проникающей радиации показали более интенсивное таяние льда весной и нарастание осенью. Это обусловлено усиленными тепловыми потоками от океана ко льду в весенне-летний период и ослабленными – в осенне-зимний период.

При регулярном появлении в последние годы ПТМ становится важной климатической составляющей и требует достоверного описания в численных моделях. Аккуратное описание механизма поглощения солнечной радиации невозможно без информации о мутности воды, что увеличивает необходимость подключения биохимического блока в численную модель или его разработки.

Кроме того, наличие ПТМ создает более сложную структуру в вертикальном распределении температуры. В связи с этим процессы вертикального перемешивания, особенно интенсивные в поверхностных слоях и способные разрушить ПТМ, обретают значимость и требуют тщательного тестирования их параметризации в численных моделях океана.

Работа выполнена в соответствии с планами Научного комитета по океаническим исследованиям (WG140 BEPSII, SCOR) и поддержана проектами РФФИ № 16-35-00439 мол_а, 16-05-00558 А.

1. Jackson J.M., Carmack E.C., McLaughlin F.A., Allen S.E., Ingram R.G. Identification, characterization, and change of the near-surface temperature maximum in the Canada Basin, 1993–2008 // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. P. C05021. DOI: 10.1029/2009JC005265.
2. Jackson J.M., Allen S.E., McLaughlin F.A., Woodgate R.A., Carmack E.C. Changes to the near-surface waters in the Canada Basin, Arctic Ocean from 1993–2009: A basin in transition // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. P. C10008. DOI: 10.1029/2011JC007069.

3. *Steele M., Ermold W., Zhang J.* Modeling the formation and fate of the near-surface temperature maximum in the Canadian Basin of the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. P. C11015. DOI: 10.1029/2010JC006803.
4. *Golubeva E.N., Platov G.A.* On improving the simulation of Atlantic water circulation in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. DOI: 10.1029/2006JC003734.
5. *Голубева Е.Н.* Численное моделирование динамики Атлантических вод в Арктическом бассейне с использованием схемы QUICKEST // *Вычисл. технол.* 2008. Т. 13, № 5. С. 11–24.
6. *Hibler W.D.* A dynamic thermodynamic sea ice model // *J. Phys. Oceanogr.* 1979. V. 9, N 4. P. 815–846.
7. *Hunke E.C., Dukowicz J.K.* An elastic-viscous-plastic model for ice dynamics // *J. Phys. Oceanogr.* 1997. V. 27, N 9. P. 1849–1867.
8. *Bitz C.M., Lipscomb W.H.* An energy-conserving thermodynamic model of sea ice // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104, N 15. P. 669–677.
9. *Lipscomb W.H., Hunke E.C.* Modeling sea ice transport using incremental remapping // *Mon. Weather Rev.* 2004. V. 132, N 6. P. 1341–1354.
10. URL: <http://www.gotm.net/> (last access: 12.04.2015).
11. *Canuto V.M., Howard A., Cheng Y., Dubovikov M.S.* Ocean turbulence. Part I: One point closure model—momentum and heat vertical diffusivities // *J. Phys. Oceanogr.* 2001. V. 31. P. 1413–1426.
12. *Jerlov N.G.* Optical oceanography. Amsterdam: Elsevier, 1968. 194 p.
13. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> (last access: 18.06.2014).
14. URL: <http://www.whoi.edu/page.do?pid=20781> (last access: 22.01.2016).

***D.F. Iakshina, E.N. Golubeva.* The study of the subsurface temperature maximum formation in the Canada basin of the Arctic Ocean.**

The effects of penetrating short-wave radiation on the Arctic Ocean water temperature and sea ice state have been studied with an ocean–ice general circulation model. Numerical experiments show that during summer period, while the ice thickness is reduced to 2 m, the absorption of penetrating radiation results in the formation of the subsurface temperature maximum. This temperature maximum gradually decays during the fall season due to strong vertical mixing and heat flux to the ice and underlying waters.