

УДК 551.5:519.6

ПРИМЕНЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ИЗМЕНЧИВОСТИ МОРСКОГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА АРКТИКИ

Пархоменко В.П.

ФИЦ «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва,
e-mail: vparhom@yandex.ru

Представлен анализ изменчивости и чувствительности морского ледяного покрова к характеристикам используемых климатических моделей, определяющим взаимодействие атмосферы, океана и льда, явный тепловой поток от поверхности морского льда и снега, тепловой поток от океана ко льду. В основе лежит модель атмосферных движений и процессов, описываемая уравнениями газовой динамики с особенностями, связанными с вращающейся Землей. Источники тепла определяются в блоке, описывающем процессы распространения тепловой и солнечной радиации с учетом распределения водяного пара и облачности в атмосфере. Взаимодействие с подстилающей поверхностью состоит в обмене импульсом, влагой (испарение и осадки), явным и скрытым потоком тепла. В модели океана определяется температура верхнего перемешанного слоя и его толщина. Лед образуется в результате баланса потоков тепла из атмосферы и океана, учитывается также возможное наличие снежного покрова на поверхности. Модель позволяет описать образование внутренних полостей в толще льда. Приведены расчетные распределения морского ледяного покрова для разных сезонов. Временной анализ эволюции средней толщины льда Северного Ледовитого океана показывает, что и в стационарном состоянии наблюдаются значительные межгодовые вариации толщины ледового покрова. Осуществлена серия численных экспериментов для оценки чувствительности модельных результатов к существенным характеристикам климатической системы.

Ключевые слова: Арктический регион, климатическая модель, численные эксперименты, эволюция морского льда

APPLICATION OF THE GLOBAL CLIMATE MODEL TO ANALYZE THE ARCTIC SEA ICE COVER VARIABILITY

Parkhomenko V.P.

Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, e-mail: vparhom@yandex.ru

The analysis of the variability and sensitivity of the sea ice cover to the characteristics of the climate models used, which determine the interaction of the atmosphere, ocean and ice, the sensible heat flux from the sea ice and snow surface, the heat flux from the ocean to the ice, is presented. It is based on a model of atmospheric motions and processes described by gas dynamics equations with features associated with the rotating Earth. Heat sources are defined in the block describing the propagation processes of thermal and solar radiation, taking into account the distribution of water vapor and clouds in the atmosphere. Interaction with the surface consists in the exchange of momentum, moisture (evaporation and precipitation), sensible and latent heat flux. The ocean model determines the temperature of the upper mixed layer and its thickness. Ice is formed as a result of the balance of heat fluxes from the atmosphere and the ocean, the possible presence of snow cover on the surface is also taken into account. The model allows us to describe the formation of internal cavities in the ice thickness. Calculated distributions of sea ice cover for different seasons are given. A time analysis of the evolution of the average thickness of the Arctic ice shows that significant interannual variations in the ice cover thickness are observed in the stationary state. A series of numerical experiments was carried out to assess the sensitivity of the model results to the essential characteristics of the climate system.

Keywords: Arctic region, climate model, numerical experiments, evolution of sea ice

Имеется достаточно доказательств того, что парниковый эффект вызовет значительные изменения климата и биотических процессов в районе Северного Ледовитого океана [1, 2]. Эти изменения могут привести к критическим экономическим и экологическим результатам в будущем для России [3].

В настоящей работе представлен анализ изменчивости и чувствительности морского ледяного покрова к характеристикам используемых моделей, определяющим взаимодействие атмосферы, океана и льда, явный тепловой поток от поверхности морского льда и снега, тепловой поток от океана ко льду.

Цель исследования – провести анализ изменчивости и чувствительности покрова морского льда для Арктического региона к основным параметрам, определяющим взаимодействие атмосферы, льда и океана: альбедо снега и льда, потока явного тепла с ледовой поверхности, потока тепла из океана на основе применения комплексной климатической модели.

Материалы и методы исследования

Рассматриваемая климатическая гидродинамическая модель состоит из модели общей циркуляции атмосферы (ОЦА) [4, 5], модели термоклина Северного Ледовитого

океана [6, 7], и модели морского льда. Взаимодействие между элементами модели происходит через перенос импульса, энергии и влаги на границах субстанций.

Основой исследований является модель ОЦА [8], представленная уравнениями, в общем являющимися уравнениями газовой динамики с некоторыми особенностями. Они описывают движение сжимаемого невязкого газа в неинерциальной системе координат, связанной с вращающейся Землей. По этой причине в уравнениях присутствует сила Кориолиса, являющаяся доминирующим членом в уравнениях горизонтального импульса. Центробежное ускорение дает малый вклад в ускорение свободного падения. В качестве уравнения для вертикальной компоненты импульса используется гидростатическое приближение, справедливое для рассматриваемых временных и пространственных масштабов движений в атмосфере. Предполагается, что вертикальные конвективные процессы имеют меньшие временные масштабы и приводят к установившемуся состоянию атмосферы по вертикали. Однако эти мелкомасштабные подсеточные процессы эффективно рассчитываются в так называемой процедуре конвективного приспособления. В ней анализируется возможная вертикальная неустойчивость атмосферы в данной ячейке и на основе сохранения энергии и массы характеристики атмосферы приводятся к устойчивому состоянию. Эта же процедура приводит к вертикальному перераспределению водяного пара в атмосфере с возможностью его конденсации и выпадения в виде осадков. Осадки также могут выпадать и при горизонтальных движениях водяного пара в атмосфере, которые описываются прогнозными уравнениями переноса. В зависимости от температуры осадки предполагаются в виде дождя или снега. Источниками водяного пара в атмосфере являются испарение с подстилающей поверхности, процессы конденсации и выпадения осадков. В модели присутствует также термодинамическое уравнение сохранения энергии, описывающее перенос энергии в слоях атмосферы. Источники тепла в этом уравнении определяются в специальной модели, описывающей процессы распространения тепловой и солнечной радиации с учетом распределения водяного пара и облачности в атмосфере. Процедура определения облачности задает несколько типов облаков, отличающихся плотностью, оптическими свойствами и высотой расположения. На подстилающей поверхности

определяется ее температура, влажность, альbedo и шероховатость в зависимости от типа поверхности. Взаимодействие с атмосферой состоит в обмене импульсом, влагой (испарение и осадки), явным и скрытым потоком тепла.

Система трехмерных дифференциальных уравнений модели ОЦА [8] дискретизируется на горизонтальной равномерной по широте и долготе глобальной конечно-разностной сетке. Все расчеты ведутся в режиме сезонного хода инсоляции. На выходе модели получаются все основные характеристики атмосферы, трехмерные поля скорости ветра, температуры, содержания водяного пара, давления, облачности осадков, потоков теплового и солнечного излучения. Как будет видно далее, все рассчитанные физические поля стохастически меняются, поэтому анализируются полученные средние характеристики атмосферы, обычно для определенных сезонов года. Это позволяет определить адекватность модели в широком диапазоне изменения значений различных характеристик атмосферы путем сравнения с данными наблюдений. Модель ОЦА была использована для воспроизведения современного климата, оценки влияния на климат антропогенных и естественных факторов, реконструкции палеоклимата и других численных экспериментов [9].

Океанический блок представляет собой интегральную двумерную модель деятельного слоя океана. Предполагается, что толщина деятельного слоя везде равна 250 м. В модели определяется температура верхнего перемешанного слоя и его толщина [7].

Термодинамическая модель эволюции морского льда базируется на модели, описанной Семптером [10], но имеет некоторые отличия и модификации [4]. Лед формируется в результате баланса потоков тепла из атмосферы и океана, учитывается также возможное наличие снежного покрова на поверхности. Модель позволяет описать также образование внутренних полоостей в толще льда [11].

Результаты исследования и их обсуждение

Базовый численный эксперимент с описанной моделью проводится с установившимися характеристиками атмосферы и начальными условиями морского льда Северного Ледовитого океана, соответствующими одинаковой его толщине, равной 2 м, сплоченности 0,9 (доли льда в ячейке) и нулевому количеству снега на поверхности

льда. Область ледяного покрова Северного Ледовитого океана задана климатическими данными наблюдений для текущего месяца. Временной анализ эволюции средней толщины льда Северного Ледовитого океана зафиксирован на рис. 1. Жирная линия показывает скользящее среднее этой величины с периодом осреднения 1 год. Аналогичные результаты следуют и из рассмотрения этой характеристики для отдельной выбранной характерной географической точки вблизи северного полюса (рис. 2). Как следует из этих результатов, и в стационарном состоянии наблюдаются значительные межгодовые вариации толщины ледового покрова (рис. 1 и 2).

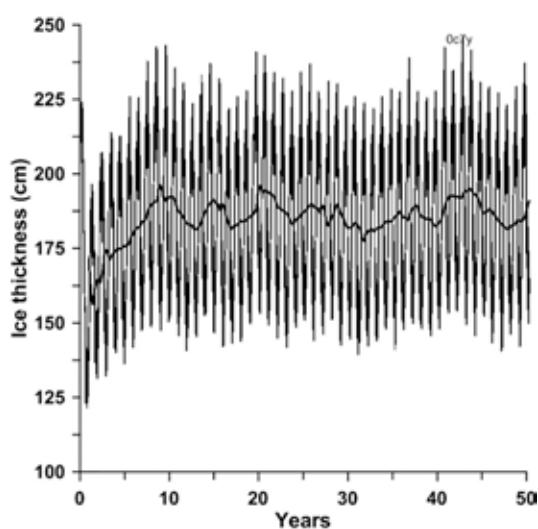


Рис. 1. Временной анализ эволюции средней толщины арктического льда

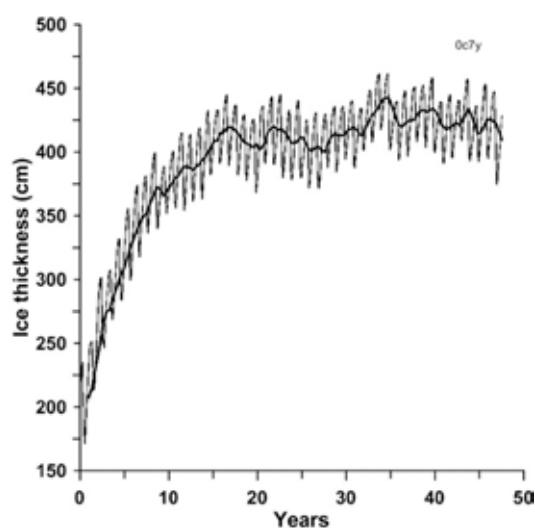


Рис. 2. Временной анализ эволюции средней толщины льда в ячейке вблизи Северного полюса

Изолинии толщины морского льда в Северном Ледовитом океане в результате расчетов по модели для весны (максимальная площадь) и осени (минимальная площадь) показаны на рис. 3 и 4. Эти и последующие рисунки показывают физическую карту Земли, вид со стороны полюса. Зоны равной толщины морского льда на рисунках выделены разными цветами.

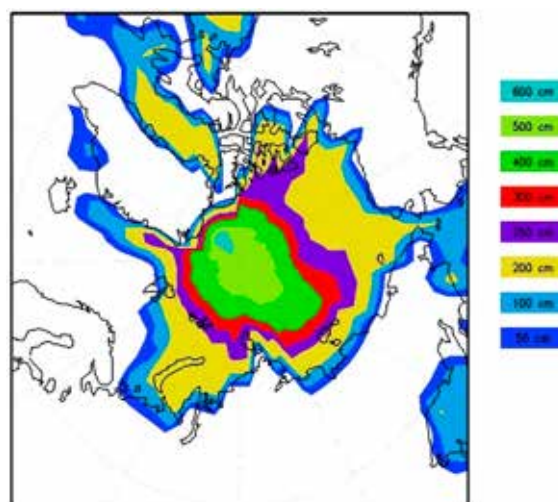


Рис. 3. Толщина и распределение льда в Северном Ледовитом океане (март)

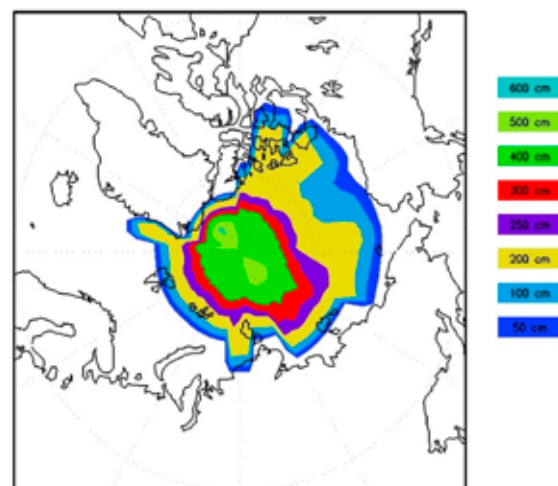


Рис. 4. Толщина и распределение льда в Северном Ледовитом океане (сентябрь)

Результаты расчетов соответствуют многолетним данным наблюдений. Предлагается рассматривать их как исходные для проводимых численных экспериментов.

Далее была осуществлена серия численных экспериментов для оценки чувствительности модельных результатов к существенным характеристикам климатической системы.

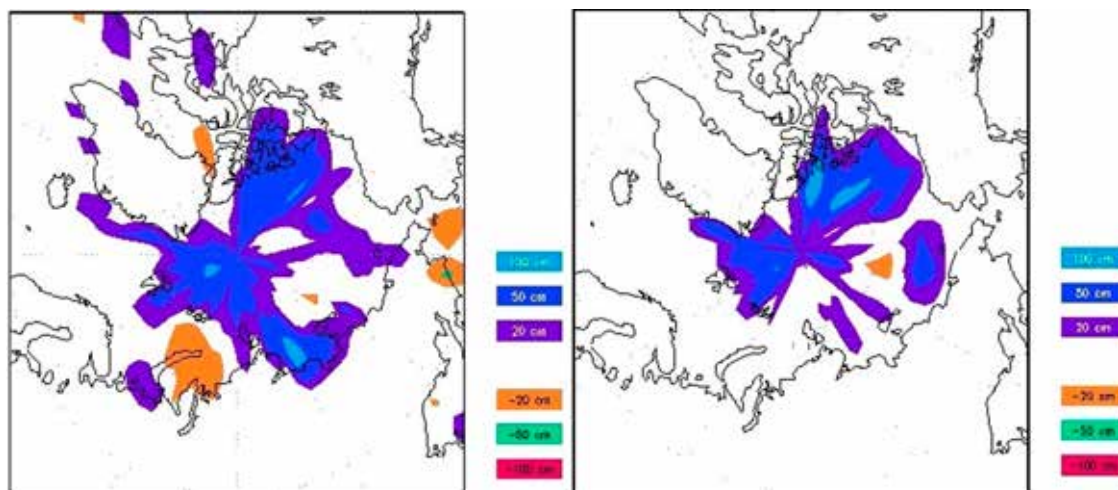


Рис. 5. Изменения толщины льда в марте (слева) и сентябре (справа) при уменьшении теплового потока на 10%

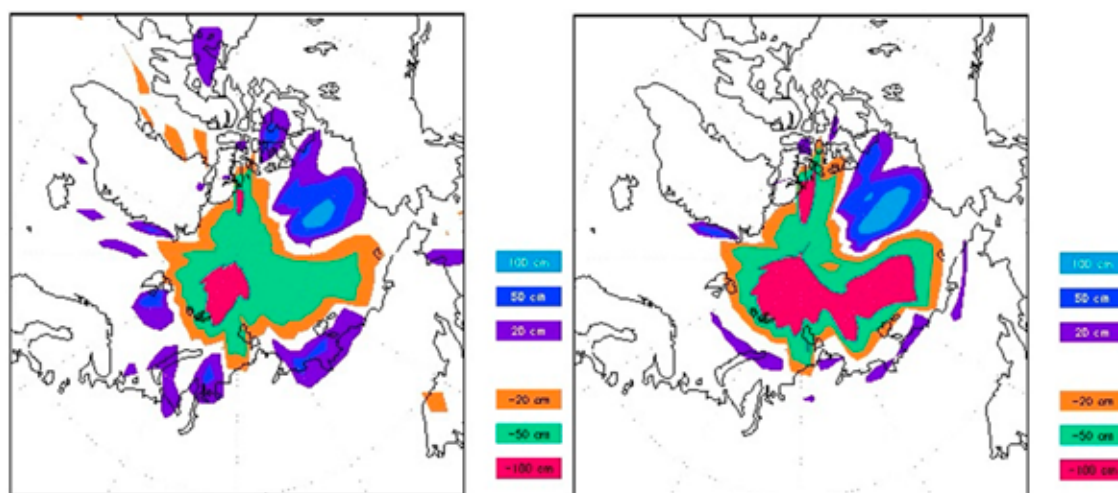


Рис. 6. Изменения толщины льда в марте (слева) и сентябре (справа) при уменьшении коэффициента отражения морского льда

При проведении первой серии расчетов явный тепловой поток с поверхности льда в нижний слой воздуха был ослаблен на 10% в соответствующих граничных условиях для блока океана и морского льда. Обнаружено увеличение толщины льда до 50 см (рис. 5). Также существуют районы с уменьшением толщины льда до 50 см.

Наибольшее увеличение толщины льда и массы снега происходит в конце весны и летом. Тепловой поток ослабевает в этот период максимально, из чего и следует наблюдаемый результат.

Далее коэффициент отражения голого морского льда в Северном Ледовитом оке-

ане был уменьшен на 0,05 по отношению к исходному состоянию поля морского льда. Такая ситуация может возникать при антропогенном влиянии на биосферу Северного Ледовитого океана.

Численные эксперименты демонстрируют уменьшение средней толщины льда и массы снега вне зависимости от времени года от 20 до 60 см с максимумом летом.

Важно отметить, что наряду со значительным уменьшением толщины льда наблюдается район ее увеличения вблизи материка Северной Америки (рис. 6). Все численные эксперименты проведены до формирования стационарного состояния системы атмосфера – океан – морской лед.

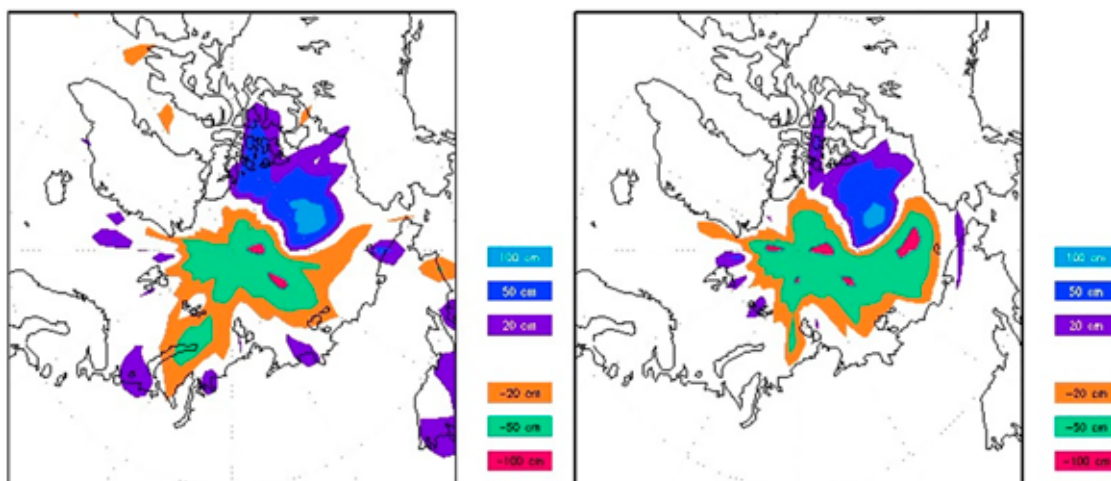


Рис. 7. Изменения толщины льда в марте (слева) и сентябре (справа) при уменьшении коэффициента отражения снега

Связь отражающей способности слоя снега на морском льду прослежена в численных расчетах, когда коэффициент отражения солнечной радиации снега снижен на 0.05 по отношению к исходному состоянию. Отметим, что масса и толщина выпадающего слоя снега вычисляются в модели атмосферы и зависят от гидрологических процессов в этой среде.

При такой постановке численного эксперимента анализ результатов показывает (рис. 7), что средняя толщина льда уменьшилась примерно на 20 см и слабо меняется в течение года.

По-видимому, это связано с тем, что в летний сезон снег отсутствует почти полностью на ледяном покрове Северного Ледовитого океана и его коэффициент отражения не участвует в формировании тепловых потоков.

Как и в предыдущем случае, существует стабильная область увеличения толщины ледяного покрова, и она расположена на том же участке. Возможно, это связано с изменениями атмосферной циркуляции, облачностью и осадками.

Заключение

В статье кратко представлен набор трехмерных гидродинамических математических моделей для описания глобального климата с реальной конфигурацией материков и океанов. Исследование посвящено проблеме изучения влияния на ледовый покров Северного Ледовитого океана некоторых физических факторов, определяющих взаимодействие атмосферы, океана и мор-

ского льда. Эти факторы моделируются изменением параметров применяемых моделей. Проведены расчеты с сезонным ходом инсоляции на установление стационарного режима ледового покрова Северного Ледовитого океана. Получены результаты, свидетельствующие о существенных отклонениях ледяного покрова разных лет от его среднего значения.

Результаты численных экспериментов показали, что толщина, площадь, компактность ледяного покрова и его сезонная эволюция достаточно сильно зависят от таких характеристик климатической системы, как явный тепловой поток от поверхности льда в приземный слой воздуха, коэффициент отражения снежного покрова и льда, а также явный тепловой поток от океана ко льду.

Установлено, что при этом географические и пространственные вариации толщины морского льда Арктики демонстрируют разнонаправленные изменения в разных областях акватории Северного Ледовитого океана и в разное время года. Это объясняется комплексным характером климатической системы и влиянием различных значимых факторов, учитываемых в комплексе моделей.

Список литературы

1. Climate Change 2014: Synthesis Report. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
2. Melia N., Hawkins E., Haines K. Improved Arctic sea ice thickness projections using bias-corrected CMIP5 simulations. *The Cryosphere*. 2015. Vol. 9. No. 6. P. 2237–2251. DOI: 10.5194/tc-9-2237-2015.
3. Blasehek M., Renssen H., Kissel C., Thornalley D. Holocene North Atlantic Overturning in an atmosphere-ocean-sea ice model compared to proxy-based reconstructions. Pa-

leceanography. 2015. Vol. 30. No. 11. P. 1503–1524. DOI: 10.1002/2015PA002828.

4. Пархоменко В.П. Алгоритм увеличения вычислительной производительности и баланса загрузки процессоров для моделирования общей циркуляции атмосферы // Математическое моделирование и численные методы. 2016. № 3. С. 115–126. DOI: 10.18698/2309-3684-2016-3-93109.

5. Parkhomenko V.P. Organization of Numerical Experiments with an Atmospheric General Circulation Model and an Ocean Global Model. Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2021. Vol. 61. No. 10. P. 1661–1671. DOI: 10.1134/S0965542521100110.

6. Goldberg D.N., Gourmelen N., Kimura S., Millan R. How Accurately Should We Model Ice Shelf Melt Rates? Geophysical Research Letters. 2019. Vol. 46. P. 189–199. DOI:10.1029/2018GL080383.

7. Алексеев В.В., Блохина Н.С., Гусев А.М., Жданова Е.Ю. Свободная конвекция в атмосфере и океане. М: Издательство Московского университета, 1979. 139 с.

8. Толстых М.А. Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. Т. 70. С. 5–32.

9. Пархоменко В.П. Моделирование пространственного и временного глобального распределения стратосферного аэрозоля искусственного происхождения для стабилизации климата // Математическое моделирование и численные методы. 2018. № 4. С. 107–119. DOI: 10.18698/2309-3684-2018-4-107119.

10. Zhang Y., Maslowski W., Semtner A.J. Impact of mesoscale ocean currents on sea ice in high-resolution Arctic ice and ocean simulations. Journal of Geophys Research Atm. 1999. Vol. 1041. No. C8. P. 18409–18430. DOI: 10.1029/1999JC900158.

11. Konovalov Y.V. The eigenvalue problem for ice-shelf vibrations: comparison of a full 3-D model with the thin plate approximation. Earth Syst. Dyn. Discuss. 2015. Vol. 6. P. 1605–1633. DOI: 10.5194/esdd-6-1605-2015.