

ИЗМЕНЧИВОСТЬ КЛИМАТА АРКТИКИ В КОНТЕКСТЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ

О. М. ЙОХАННЕССЕН

*Центр по окружающей среде и дистанционному зондированию
им. Нансена, Берген, Норвегия*

e-mail: ola.johannessen@nersc.no

Л. П. БОБЫЛЕВ, С. И. КУЗЬМИНА, Е. В. ШАЛИНА,

К. С. ХВОРОСТОВСКИЙ

*Международный центр по окружающей среде и
дистанционному зондированию им. Нансена, Санкт-Петербург, Россия*

e-mail: leonid.bobylev@niersc.spb.ru, elena.shalina@niersc.spb.ru

Air temperature observations and model simulations are analyzed in order to assess the Arctic's response to increasing anthropogenic greenhouse-gas forcing. ECHAM-4 and HadCM3 coupled atmosphere-ice-ocean global simulations are used to understand arctic climate variability. Greenland Ice Sheet elevation changes were assessed and analyzed. It is shown that present changes in the arctic environment are a response to anthropogenic forcing.

Введение

Отчет Межправительственной группы экспертов по изменению климата [1] не оставляет сомнений в том, что мы являемся свидетелями глобального потепления. Согласно данным наблюдений, для области 60–90° с.ш. увеличение температуры за последние двадцать лет составляет 1.2°C/20 лет. Результаты моделирования показывают, что арктический регион является областью, наиболее чувствительной к различного рода внешним по отношению к атмосфере воздействиям, будь то естественные или антропогенные факторы.

Характерной чертой климата арктической области является наличие ледового покрытия на поверхности воды. Морской лед ограничивает возможности обмена теплом, массой и моментом движения между океаном и атмосферой. Так, зимой атмосфера намного холоднее океана, поскольку морской лед препятствует обмену теплом между ними. Кроме того, морской лед имеет гораздо более высокое альбедо, чем водная поверхность, что определяет различие в уровнях поглощения поступающей солнечной энергии. Наконец, процесс образования льда на морской поверхности вызывает изменение распределения солености в океане.

Являясь важной составляющей климатической системы Земли, арктические льды в то же время могут служить и индикатором происходящих в этой системе изменений. Это

связано с наличием положительной обратной связи между изменениями температуры системы и площадью морских льдов. Увеличение температуры вызывает усиление таяния льдов, что, в свою очередь, способствует увеличению количества поступающего в систему тепла, так как площадь льдов, имеющих высокое альbedo, сокращается, а площадь воды, имеющей существенно более низкое альbedo, увеличивается. Таким образом, глобальное потепление запускает процесс ускоренного таяния арктических льдов, что влияет на глобальную климатическую систему.

1. Изменения температуры арктической области: наблюдения и результаты моделирования

Нами был проведен анализ архивов метеорологических данных о приповерхностной температуре воздуха (ПТВ) [2] и данных моделирования. Использовались результаты трех экспериментов совместной модели ЕСНАМ4/ОРУС, разработанной в институте Макса Планка, Германия (контрольный эксперимент, эксперимент с учетом влияния парниковых газов). Анализ аномалий среднегодовой температуры, осредненной для области 60–90° с.ш., показал, что увеличение температуры за последние двадцать лет составляет 1.2 °C/20 лет, что превышает скорость роста ПТВ в ЕСНАМ4/ОРУС эксперименте с учетом влияния парниковых газов.

Сравнение аномалий зонально-осредненной ПТВ [3], полученной из наблюдений, с модельными данными (рис. 1) показало, что потепление первой половины двадцатого века было ограничено высокими широтами, в то время как последнее потепление распространяется почти на все полушарие как для данных наблюдений, так и для модельных данных. Обращает на себя внимание тот факт, что для контрольного эксперимента, описывающего

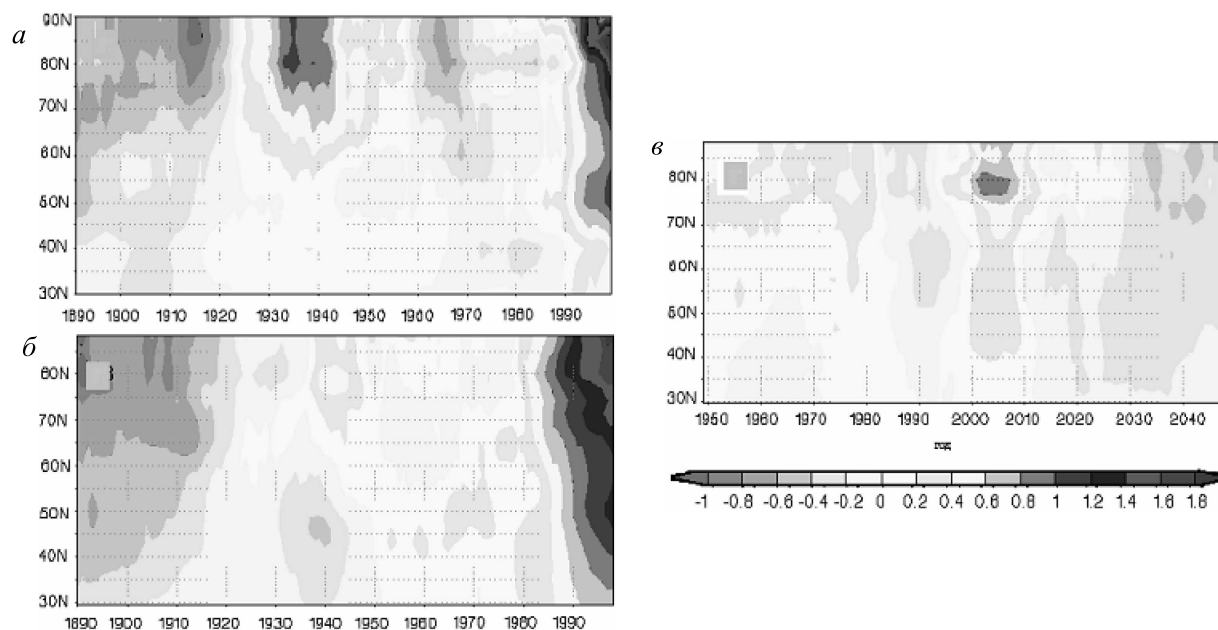


Рис. 1. Аномалии зонально-осредненной ПТВ по данным наблюдений и результатам моделирования (а); ЕСНАМ4/ОРУС эксперимент с учетом влияния парниковых газов (б); ЕСНАМ4/ОРУС контрольный эксперимент (в).

естественную изменчивость, было отмечено потепление, характер которого почти идентичен характеру потепления, наблюдавшемуся в 1920–1940 годы. Оно имеет те же пространственную структуру и интенсивность. Таким образом, потепление 1920–1940 годов может быть воспроизведено в модели без учета влияния антропогенных факторов, в то время как последнее потепление может быть воспроизведено в модели только с учетом роста концентраций парниковых газов. Это позволяет сделать заключение о том, что потепление первой половины 20-го века было вызвано естественными колебаниями климатической системы, в то время как последнее потепление не может быть объяснено без учета влияния антропогенных факторов. Как было показано во многих работах, посвященных анализу наблюдаемых и модельных изменений климата, механизмом, который может привести к потеплению в высоких широтах, является взаимодействие океана и атмосферы [4]. Наблюдаемый в последние 50 лет положительный тренд температуры воды ($0.2^\circ/10$ лет) в тропических океанах, особенно в Индийском и Тихом, вызывает увеличение конвективной активности, интенсификацию тропосферных западных течений в умеренных широтах и, как следствие, из-за геострофичности в Атлантическом секторе усиление положительной фазы Северо-Атлантического колебания.

2. Изменения ледового покрытия Арктического бассейна: наблюдения и результаты моделирования

Наилучшим источником данных для глобальных наблюдений за состоянием ледового покрытия Арктики являются результаты дистанционных измерений, начатых на спутнике Nimbus-7 прибором SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) и продолженных на серии спутников DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) прибором SSM/I (Special Sensor Microwave / Imager). Измерения выполняются микроволновыми радиометрами. Их главное преимущество состоит в том, что они могут проводить съемку поверхности Земли практически в любых погодных условиях и в любое время суток независимо от наличия солнечного освещения. Указанные наблюдения доступны с ноября 1978 года по настоящее время.

Спутниковые наблюдения фиксируют уменьшение площади ледового покрытия Арктики, что проиллюстрировано рис. 2, где показаны нормированные относительно среднемесячных значений отклонения общей площади морских льдов от средних, каждое из которых рассчитывалось как разница между среднемесячным значением, полученным для всего ряда наблюдений, и величиной площади льда, полученной для каждого конкретного месяца. Тренд представляет собой линию, полученную с помощью метода наименьших квадратов, наилучшим образом аппроксимирующую имеющиеся результаты. Полученное нами значение тренда общей площади морских льдов Северного полушария составляет -3.2% (это соответствует уменьшению площади льда на $0.3 \cdot 10^6$ км²) за декаду, что хорошо согласуется с опубликованными другими авторами данными [5].

Площадь ледового покрытия Арктики значительно меняется в течение года. Зимой она максимальна и составляет около $14 \cdot 10^6$ км², а к концу летнего сезона, после таяния льдов, сокращается до примерно $6 \cdot 10^6$ км². Концом зимнего сезона в Арктике обычно считают март, а концом летнего сезона — сентябрь. Лед, переживший летнее таяние, принято называть многолетним, а лед, появившийся в течение зимы вследствие понижения температуры, — однолетним. Важной отличительной характеристикой многолетнего льда является то, что он гораздо толще однолетнего. Наиболее тревожной особенностью совре-

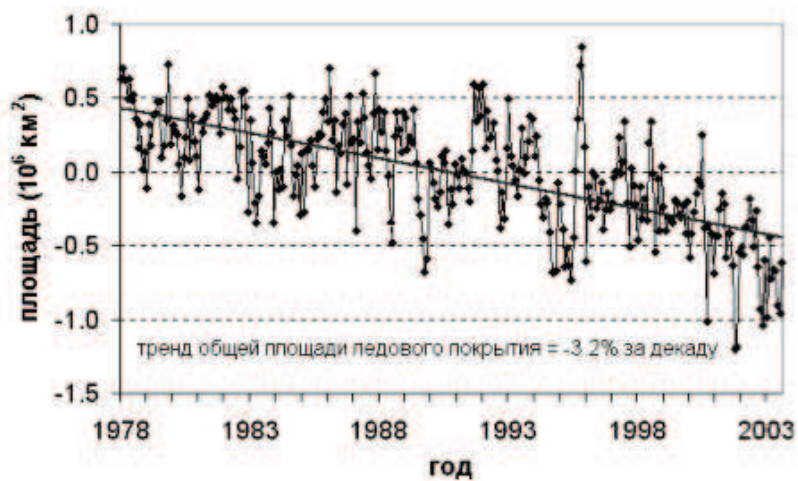


Рис. 2. Изменение общей площади льда в Арктике по данным микроволновых спутниковых наблюдений. Показаны нормированные отклонения от средних для каждого месяца.

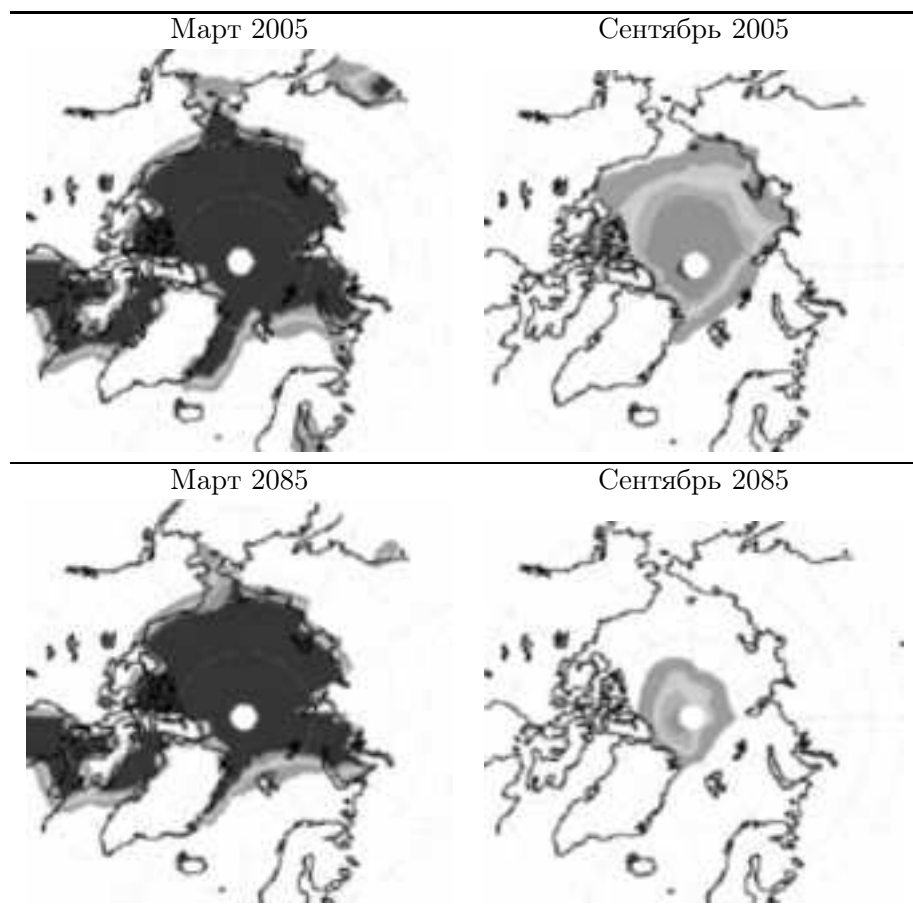


Рис. 3. Результаты моделирования: изменение ледового покрытия Арктики за 80 лет зимой (март) и летом (сентябрь) при условии удвоения содержания парниковых газов в атмосфере.

менных изменений, происходящих в Арктике, является более быстрый темп сокращения площади многолетнего льда по сравнению со скоростью уменьшения полного ледового покрова. По данным разных авторов, спутниковые наблюдения указывают на сокращение площади многолетнего льда со скоростью от 7 % [6] до 9 % за декаду [7].

При оценке антропогенных влияний на ледовое покрытие Арктики и прогнозировании его состояния в зависимости от реализации того или иного сценария антропогенного воздействия нами были использованы расчеты по моделям ЕСНАМ-4 и HadCM3. Были отдельно рассмотрены летний и зимний периоды. Надо сказать, что полученные по спутниковым наблюдениям особенности изменения ледового покрытия Арктики (хотя период спутниковых наблюдений и очень короток на фоне принятых при изучении климата временных масштабов) воспроизводятся в модельных расчетах только при учете внешнего антропогенного влияния.

Расчеты показывают, что антропогенное воздействие на состояние ледового покрытия Арктики по-разному проявляется в разные сезоны, причем оно наиболее сильно в летний период. Так, по расчетам ЕСНАМ-4 при удвоении содержания парниковых газов в атмосфере следует ожидать 80%-го сокращения площади ледового покрытия в сентябре (рис. 3). Лед, покрывающий Арктику к концу зимнего сезона, сократится при тех же условиях лишь на 20 % (см. тот же рисунок, март). Схожие результаты получаются при расчетах с использованием модели HadCM3.

3. Наблюдения за изменением высоты ледникового щита Гренландии

Нами предпринято исследование изменения высоты поверхности Гренландского ледникового щита за период с 1992 по 2003 год на основе совместного использования данных измерений радиоальтиметров со спутников ERS-1 (1992–1996) и ERS-2 (1995–2003). Измерения позволили впервые получить данные о высоте ледникового щита для всей территории Гренландии.

Исследование изменения высоты ледниковых щитов важно для понимания их реакции на изменения климата. Кроме того, изменение баланса массы ледниковых покровов является одним из основных факторов, влияющих на глобальный уровень Мирового океана. Гренландский ледниковый щит по сравнению с Антарктидой представляет особый интерес при исследовании его взаимосвязи с климатическими изменениями вследствие его большей чувствительности. Это обусловлено расположением Гренландии на пути движения циклонов, связанных с Исландским барическим минимумом, играющим существенную роль в формировании циркуляции атмосферы высоких широт. Кроме того, Гренландия находится в более теплом климате, что приводит к летнему таянию снега на поверхности ледникового покрова в южных и прибрежных районах.

Расчеты скорости изменения высоты Гренландского ледникового щита за период с 1992 по 2003 год показали, что высота щита растет в центральной части Гренландии и уменьшается в низких прибрежных районах. Эта особенность хорошо видна из таблицы, в которой представлены средние для различных диапазонов высот скорости изменения высоты и ошибки ее определения. Уменьшение часто наблюдается в зонах выводных ледников и может быть связано не только с увеличением поверхностного таяния, но и с возрастанием скорости течения ледника вследствие проникновения вглубь ледника талой воды и создания пленки воды на поверхности коренного ложа. Средняя скорость изменения высоты

Пространственно-средненные значения скорости изменения высоты (dh/dt) для различных диапазонов высот Гренландского ледникового щита, количество попадающих в указанные зоны ячеек (N ячеек) и занимаемая ими площадь (S)

Диапазон высот, км	dh/dt , см/год	Зоны ячеек	S , тыс. км ²
< 1.5	-2.0 ± 0.9	127	155.1
1.5...2	5.6 ± 0.5	165	228.2
2...2.5	7.0 ± 0.4	249	398.9
2.5...3	6.4 ± 0.3	253	458.3
> 3	5.5 ± 0.3	74	140.3
Все высоты	5.4 ± 0.2	868	1380.7

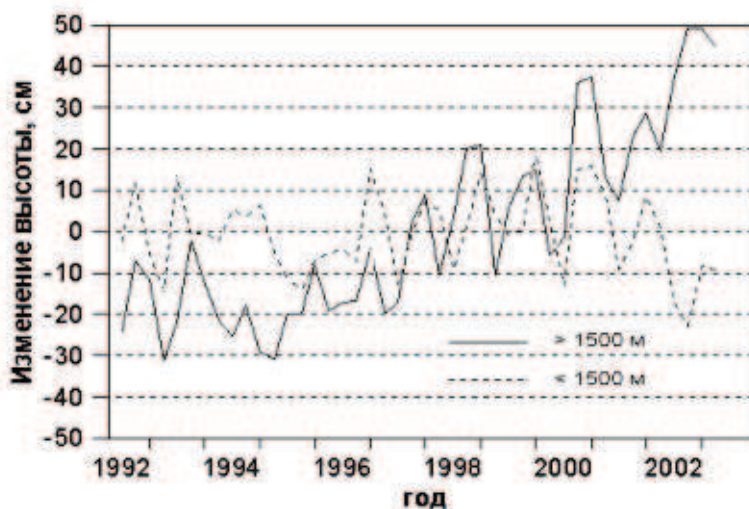


Рис. 4. Изменение высоты ледникового щита по данным спутниковых радиоальтиметрических измерений.

Гренландского щита согласно расчетам составила 5.4 см/год. При учете изостатического поднятия подстилающей поверхности ледникового щита, равного около 0.5 см/год, скорость изменения толщины ледника составляет около 5 см/год в сторону увеличения.

Построенные временные ряды позволили проанализировать изменения высоты ледникового щита за рассматриваемый период времени. На рис. 4 показан различный характер сезонных и межгодовых изменений высоты для районов с высотами больше и меньше 1500 м. Наиболее яркой особенностью графиков является их расхождение после 2000 года, произошедшее за счет разницы изменений высоты в летние месяцы, когда таяние снега летом приводит к значительному уменьшению высоты в областях ниже 1500 м, т. е. в пограничных районах.

Заключение

Колебания погоды и климата нарастают по мере продвижения из низких широт к высоким, что позволяет говорить о полярном усилении изменчивости климата. Потепление начала двадцатого века было вызвано долгопериодным низкочастотным колебанием в системе океан — атмосфера, а потепление конца века не может быть объяснено одними лишь

естественными факторами и, скорее всего, является следствием антропогенного влияния на процессы, происходящие в атмосфере.

Результаты наблюдений за ледовым покрытием Арктики говорят о том, что общая площадь арктического льда уменьшается со скоростью -3.2% (что соответствует сокращению площади на $0.3 \cdot 10^6$ км²) за декаду, а площадь многолетнего льда сокращается в 2.5–3 раза быстрее. Модельные расчеты показывают, что при продолжении антропогенного воздействия площадь арктических льдов будет неуклонно уменьшаться, причем наибольшее сокращение ледового покрытия будет отмечаться в летние месяцы.

Список литературы

- [1] THE Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001.
- [2] АЛЕКСЕЕВ Г.В., СВЯЩЕННИКОВ П.Н. Естественная изменчивость климатических характеристик Северной полярной области и Северного полушария. СПб.: Гидрометеоздат, 1991. 159 с.
- [3] JOHANNESSEN O.M., BENGTTSSON L., MILES M.W. ET AL. Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea ice variability // Tellus. 2004. Vol 56A. P. 328–341.
- [4] HOERLING M.P., HURRELL J.W., XU. Tropical origins for recent North Atlantic climate change // Science. 2001. Vol. 275. P. 805–807.
- [5] PARKINSON C.L., CAVALIERI D.J., GLOERSEN P. ET AL. Arctic Sea ice extents, areas, and trends, 1978–1996 // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104(C9). P. 20,837–20,856.
- [6] JOHANNESSEN O.M., SHALINA E.V., MILES M.W. Satellite evidence for an Arctic sea ice cover in Transformation // Science. 1999. Vol. 286. P. 1937–1939.
- [7] COMISO J.C. A rapidly declining Arctic Perennial Ice Cover // Geophys. Res. Letts., 2002. Vol. 29(20). 1956. doi:10.1029/2002GL015650.

Поступила в редакцию 2 июня 2005 г.