

ИЗМЕНЕНИЕ АРКТИЧЕСКОГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ПАССИВНОГО МИКРОВОЛНОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Л.П.БОБЫЛЕВ¹, Е.В.ШАЛИНА¹, О.М.ЙОХАННЕССЕН², Е.В.ЗАБОЛОТСКИХ¹,
С.САНДВЕН², О.И.БАБИНА¹

¹ – Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию
им. Нансена (Фонд Нансен-центр), Санкт-Петербург, Россия

² – Центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена, Берген, Норвегия

В статье приведены оценки изменения площади морских льдов Северного полушария, полученные при обработке данных пассивных микроволновых спутниковых наблюдений за период с ноября 1978 г. по сентябрь 2007 г. Выполнен анализ изменений, происходивших на этом фоне в морях, омывающих с севера территорию России, а также в Канадском секторе Арктики. Показано, что на фоне статистически значимого сокращения общей площади арктических льдов (4,48 % за десятилетие) изменения в сибирских морях, Баренцевом море и морях Канадского сектора Арктики не были столь же однозначны за указанный период, хотя общая тенденция сокращения площади морских льдов в этих морях также безусловно прослеживается.

Арктические льды, являясь важной составляющей климатической системы Земли, в то же время могут служить и индикатором происходящих в этой системе изменений. В значительной мере важность роли морского льда в климатических процессах обусловлена наличием положительной обратной связи между изменениями температуры системы океан–атмосфера и площадью морских льдов [11, 17]. Морской лед имеет гораздо более высокое альbedo (> 0,6), чем водная поверхность (~ 0,07), что определяет различие в уровнях поглощения поступающей солнечной энергии. Увеличение температуры должно вызывать усиление таяния льдов, что, в свою очередь, способствует увеличению количества поступающего в систему тепла, т.к. площадь льдов, имеющих высокое альbedo, сокращается, а площадь воды, имеющей существенно более низкое альbedo, увеличивается.

Наблюдающееся глобальное потепление и сокращение площади морских льдов в последние десятилетия определяют пристальное внимание к трансформации ледяного покрова Арктики [8, 14, 18], что требует его постоянного мониторинга. Такой мониторинг для обширных и удаленных районов Арктики может быть осуществлен только на основе спутниковых наблюдений. По сравнению с обычными *in situ* наблюдениями спутники обеспечивают ежедневное квазиглобальное покрытие с очень высокой статистической точностью, достигаемой в результате осреднения миллионов единичных измерений [20]. Однако получение долговременных трендов климатических переменных, в том числе и ледяного покрова, по спутниковым данным является трудной задачей, что обусловлено проблемой интеркалибровки спутниковых датчиков и их дрейфом [6, 12, 13, 20]. Для мониторинга морских льдов используются данные спутникового пассивного дистанционного

зондирования в микроволновом диапазоне спектра, доступные с 1997 г. Помимо сказанного выше о важности спутниковых наблюдений измерения в микроволновом диапазоне имеют и еще одно существенное преимущество, заключающееся в возможности измерений в любое время суток и при наличии облачности, что для Арктики является исключительно важным обстоятельством.

Настоящая работа посвящена исследованию трансформации морского ледяного покрова Арктики за период ноябрь 1978 – сентябрь 2007 гг. (около 29 лет) на основе спутниковых микроволновых наблюдений, выполненному в петербургском и бергенском (Норвегия) Нансен-центрах, и анализу полученных результатов.

В качестве основного источника данных об изменениях параметров ледяного покрова Арктики использованы результаты дистанционных измерений в микроволновом диапазоне, 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). Наблюдения радиометром SMMR проводились с частотой раз в два дня с ноября 1978 г. по август 1987 г. Измерения осуществлялись на длинах волн 6,63; 10,69; 18; 21 и 37 ГГц. Наблюдения с помощью SSM/I были начаты в июле 1987 г. и продолжаются по сей день. Прибор измеряет радиацию, приходящую от поверхности Земли и атмосферы, на длинах волн 19,35; 22,24; 37,0 и 85,5 ГГц. Данные, покрывающие весь Арктический бассейн, поступают со спутника ежедневно.

В течение почти двух месяцев оба прибора проводили измерения одновременно, что позволило выполнить их интеркалибровку и получить надежный ряд данных измерений микроволнового излучения, относящихся к территории всего Арктического бассейна [3, 5]. Полученный таким образом ряд спутниковых пассивных микроволновых измерений является в настоящее время наиболее надежным источником информации о состоянии арктического морского ледового массива за указанный промежуток времени.

Рассматриваемые данные спутниковых измерений поступают из Центра NSIDC (National Snow and Ice Data Center, Боулдер, США) в виде полей яркостной температуры, представленных в полярной стереографической проекции с размером ячейки 25×25 км. Как видно, эти данные имеют достаточно низкое пространственное разрешение, что накладывает определенные ограничения на возможности их использования. В частности, это позволяет проводить исследования в глобальном масштабе, но не дает возможности получения достаточно детальной картины ледяного покрова.

При проведении расчетов параметров морского ледяного покрова на основе рассмотренных выше данных использовался алгоритм NORSEX [19], который позволяет различать морскую поверхность, свободную ото льда, однолетний и многолетний лед, а также количественно оценивать сплоченность указанных типов льда. Этот алгоритм, как и другие алгоритмы подобного назначения [7, 9], основан на предположении, что зондируемый участок морской поверхности может быть описан как комбинация трех типов поверхностей: «однолетний лед», «многолетний лед» и «чистая (свободная ото льда) вода». Основное уравнение, на котором строится метод, выглядит следующим образом [19]:

$$T_B = C_{MY} e_{MY} T_{MY} + C_{FY} e_{FY} T_{FY} + C_{OW} e_{OW} 272,$$

где T_B – яркостная температура зондируемого участка поверхности в градусах Кельвина, C_{MY} , C_{FY} , C_{OW} – сплоченности многолетнего льда, однолетнего льда и чистой

воды соответственно, e_{MY} , e_{FY} , e_{OW} — излучательные способности соответствующих поверхностей, а T_{MY} и T_{FY} — температуры многолетнего и однолетнего льда, которые вычисляются с использованием средней климатической приповерхностной температуры воздуха и «эффективной» температуры водной поверхности (272 К).

Для вычисления T_b по измеряемой на спутнике яркостной температуре T_{sat} используется упрощенная форма уравнения переноса излучения в микроволновом диапазоне, в котором учитываются поглощение атмосферы (среднее климатическое в зависимости от сезона), собственное излучение атмосферы и излучение космоса [19]. В алгоритме использован тот факт, что вода, однолетний и многолетний лед имеют разные излучательные способности на длинах волн, на которых проводятся измерения спутниковыми микроволновыми радиометрами. Для минимизации влияния погодных условий на результаты расчетов использован погодный фильтр, предложенный в [4, 10, 19].

Публиковавшиеся ранее данные об изменении площади арктического морского ледового массива, полученные также из спутниковых пассивных микроволновых наблюдений, в том числе и авторами настоящей работы, констатировали уменьшение площади льдов с 1978 по 2003 г. со скоростью чуть более 3 % за декаду [1, 2, 3, 14, 15, 16]. Анализ данных, выполненный на конец 2006 г., показал увеличение скорости сокращения площади арктических льдов уже до 3,9 % за декаду. Однако экстремальное сокращение морского ледового массива прошедшим летом, вызванное отчасти аномально высокой температурой воздуха в весенние и летние месяцы (особенно в апреле) и сильными ветрами, способствовавшими усиленному выносу льдов из Арктики [8], привело к тому, что средняя скорость сокращения арктических льдов возросла еще более.

Глобальная трансформация морского ледяного покрова Арктики за период спутниковых наблюдений с ноября 1978 г. по сентябрь 2007 г. иллюстрируется на рис. 1. Здесь представлены нормированные относительно среднемесячных значений отклонения общей площади морских льдов от средних. Каждое из отклонений рассчитывалось как разница между среднемесячным значением площади льда, полученным при обработке всего ряда наблюдений, и величиной площади льда, полученной для конкретного месяца. Линия тренда представляет собою линию,

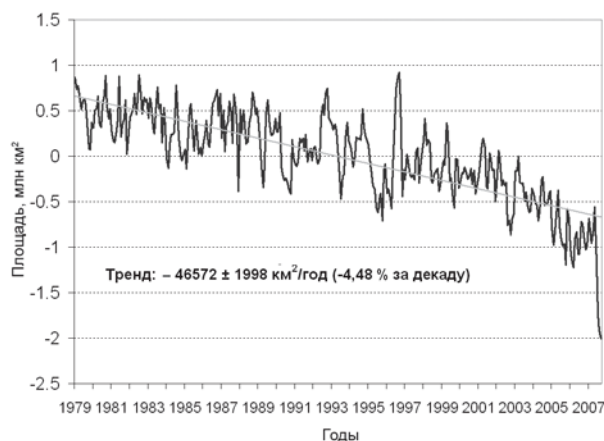


Рис. 1. Изменения общей площади морских льдов в Арктике согласно спутниковым наблюдениям за период с ноября 1978 г. по сентябрь 2007 г. и соответствующий им линейный тренд



Рис. 2. Площадь арктических льдов в сентябре (среднемесячные данные) за период спутниковых наблюдений и линейный тренд, представляющий тенденцию сокращения сентябрьского ледяного покрова

полученную с помощью метода наименьших квадратов и наилучшим образом аппроксимирующую имеющиеся результаты. Расчеты показывают, что за период микроволновых спутниковых наблюдений площадь морских льдов сокращалась в среднем на $46572 \pm 1998 \text{ км}^2$ в год, или на 4,48 % за десятилетие. Недавно опубликованные результаты аналогичных расчетов [8] по алгоритму Bootstrap [7] весьма близки к полученным в настоящей работе данным. Согласно [8] тренд уменьшения площади морских льдов составляет $46766 \pm 2112 \text{ км}^2$ в год, или 4,32 % за десятилетие. Величины трендов, полученные в данной работе и в [8] и выраженные в процентах, различаются больше, чем их абсолютные значения, очевидно, из-за разницы в значениях средней площади ледяного покрова.

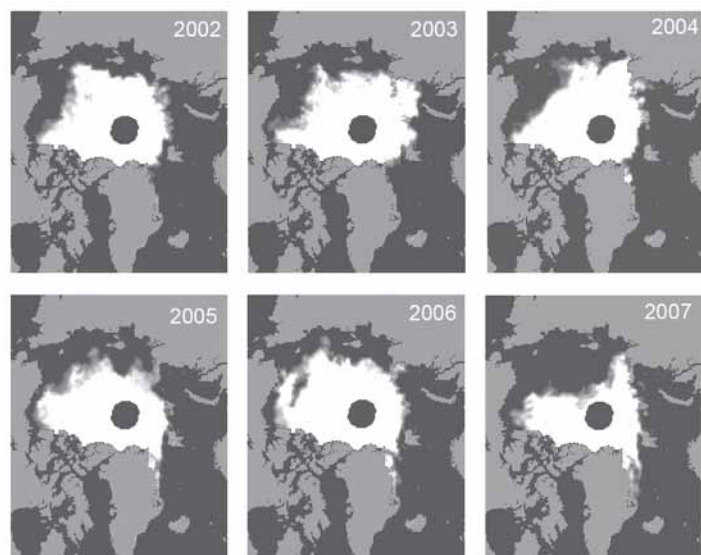


Рис. 3. Карты сплоченности ледяного покрова, полученные по данным спутниковых измерений для сентября с 2002 по 2007 г.

Площадь ледяного покрова существенно меняется в течение года, увеличиваясь в зимний сезон и сокращаясь в летний. Минимального значения площадь арктических морских льдов достигает, как правило, в сентябре, в конце сезона таяния. Анализ результатов расчетов площади ледяного покрова за период спутниковых наблюдений позволяет выявить тенденцию более быстрого сокращения площади морских льдов в летний сезон, чем в зимнее время. На рис. 2 показано изменение площади арктических льдов в сентябре. Видно, что, хотя вариации площади от года к году весьма значительны, наблюдается безусловная тенденция сокращения площади сентябрьского ледяного покрова, причем линейный тренд, описывающий эту тенденцию и составляющий уже $-9,6\%$ за декаду, больше в абсолютном выражении ($58805 \pm 9700 \text{ км}^2$ в год), чем тренд, характеризующий изменение площади арктических льдов в целом (см. рис. 1). Особенно четко тенденция сокращения площади сентябрьского ледяного массива стала проявляться в текущем столетии. Наглядную картину изменения сентябрьского льда в Арктике можно получить, обратившись к рис. 3, где показаны карты сплоченности ледяного покрова, рассчитанные по данным спутниковых наблюдений с 2002 по 2007 г. В 2002 г. наблюдался первый в текущем столетии минимум сентябрьского ледяного покрова, который составлял около $5,3$ млн км^2 . После 2002 г. наблюдалось все более раннее наступление сезона таяния в Арктике, а в 2005 г. был зафиксирован следующий минимум, когда площадь ледяного покрова сократилась до $\sim 5,1$ млн км^2 . Однако все рекорды были побиты в сентябре 2007 г., когда площадь ледяного покрова сократилась драматически — до $\sim 4,1$ млн км^2 .

На рис. 4 показаны региональные изменения морского льда в Арктике с начала 1979 г. по конец 2006 г. Основные выводы, которые можно сделать, анализируя представленные карты, состоят в следующем. Зимой и весной (с декабря по июнь) наибольшее уменьшение льда наблюдалось в той части арктического ледового массива, который примыкает к Атлантике, в основном — в Баренцевом и Гренландском морях. Летом и осенью (с июля по ноябрь) наибольшие изменения произошли в противоположной части Арктики, причем наиболее сильные изменения имели место в Чукотском море и море Бофорта.

Вариации общей площади морских льдов в арктических морях, омывающих с севера территорию России, а также в морях Канадского сектора Арктики за период пассивных микроволновых спутниковых наблюдений показаны на рис. 5. На этом рисунке приведены средние данные для четырех сезонов.

Баренцево море, будучи наиболее подверженным влиянию теплых вод Атлантики, имеет особый ледовый режим. В то время как Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и другие моря полностью покрыты льдом в течение зимы, Баренцево море не бывает в зимнее время целиком покрыто льдом и его зимний ледяной покров имеет сильную временную изменчивость (см. рис. 5а). В целом в Баренцевом море, как и в остальных рассматриваемых в этой статье морях, также наблюдалось сокращение площади льдов. Как показывают расчеты, в зимний период за рассматриваемое время сокращение площади ледяного покрова Баренцева моря составило $9074 \pm 3033 \text{ км}^2/\text{год}$. Соответствующее сокращение весной составило $10770 \pm 3298 \text{ км}^2/\text{год}$, летом $3032 \pm 1358 \text{ км}^2/\text{год}$ и осенью $4748 \pm 2108 \text{ км}^2/\text{год}$. Сокращение, наблюдавшееся в летний и осенний периоды, хотя и не столь велико в абсолютном выражении, в процентном отношении весьма значительно. Наиболее же значительное в процентном отношении сокращение зафиксировано для периода апрель—июнь — около 16% за десятилетие. Анализ среднемесячных изменений площади льдов Баренцева моря показывает, что зимой, весной и в первой половине лета сокращение площади ледяного покрова значимо со статистической вероятностью 95% , а вариации, наблюдавшиеся в период с августа по ноябрь, имеют слишком большую изменчивость от одного года к другому и полученные отрицательные

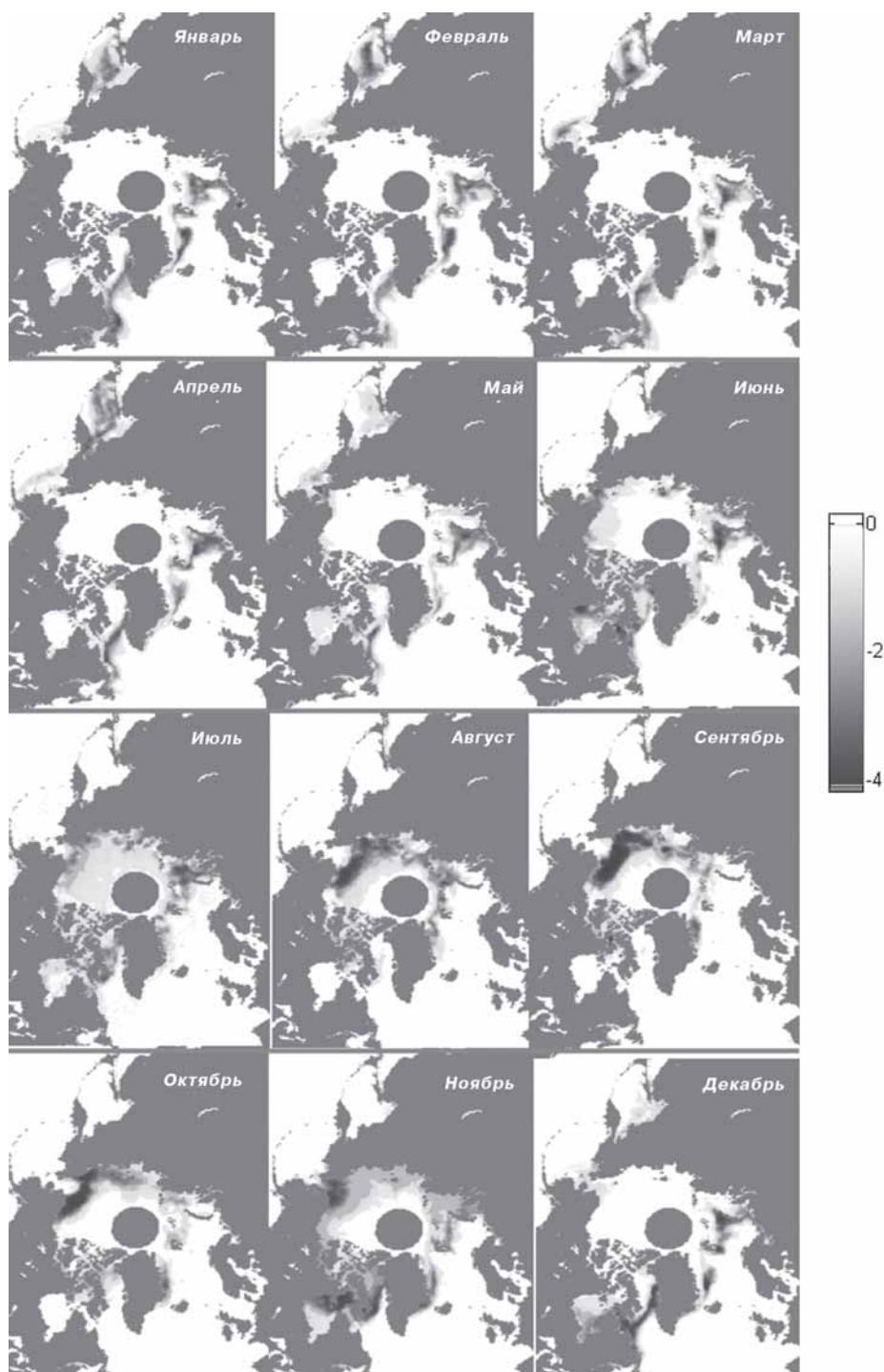


Рис. 4. Карты линейных трендов среднемесячных значений сплоченности льда (% в год)

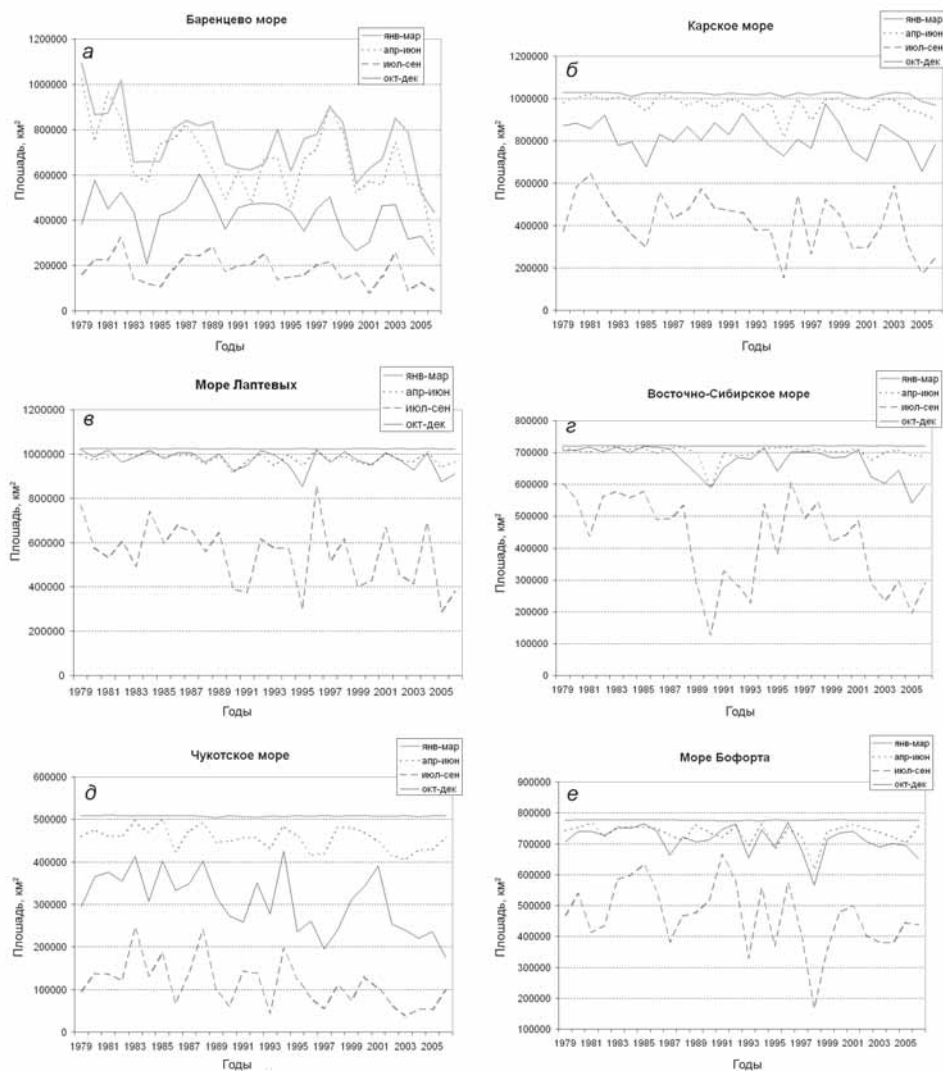


Рис. 5. Вариации общей площади морских льдов арктических морей по сезонам (январь–март, апрель–июнь, июль–сентябрь, октябрь–декабрь) за период 1979–2006 гг.

линейные тренды для этих месяцев нельзя признать статистически значимыми (см. табл. 1).

В Карском море (см. рис. 5б) наблюдалось следующее сокращение ледяного покрова по сезонам: в период с января по март – в среднем 970 ± 285 км²/год, с апреля по июнь – 2258 ± 956 км²/год, с июля по сентябрь – 7202 ± 2722 км²/год и с октября по декабрь – 2492 ± 1724 км²/год. Статистически значимые отрицательные среднемесячные тренды изменения площади льдов Карского моря зафиксированы для всех месяцев, кроме сентября, октября и ноября (см. табл. 1).

Изменения, происходившие с ледяным покровом в море Лаптевых, показаны на рис. 5в. Зимой вариации площади льдов и их средние изменения были минимальны: сокращение ледяного покрова зафиксировано на уровне лишь 21 ± 15 км²/год.

Таблица 1

Море	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Баренцево	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Карское	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Лаптевых	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Восточно-Сибирское	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Чукотское	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Бофорта	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

В весенний период сокращение было хотя и больше – 854 ± 585 км²/год, но также незначительно, причем на фоне существенных вариаций площади льда от года к году. Наибольшие изменения произошли в летний период, когда среднее уменьшение площади ледяного покрова составило 6956 ± 3105 км²/год. Сокращение площади льда в осенний сезон было на уровне 2300 ± 947 км²/год.

Похожая картина с точки зрения изменения по сезонам наблюдалась в Восточно-Сибирском море, хотя здесь тенденция уменьшения площади ледяного покрытия летом проявилась сильнее, что подтверждается анализом статистической значимости трендов, представленным в таблице. Зимой площадь льдов Восточно-Сибирского моря за период спутниковых наблюдений (см. рис. 5г) оставалась практически неизменной. Сокращение площади льдов в весенний период составило 421 ± 572 км²/год, в летний период – 9013 ± 2873 км²/год и осенью – 3370 ± 909 км²/год.

В Чукотском море (см. рис. 5д) наблюдались следующие изменения по сезонам: сокращение ледяного покрова в период с января по март было незначительным и статистически незначимым – 32 ± 31 км²/год, с апреля по июнь уменьшение составило 1472 ± 547 км²/год, с июля по сентябрь – 3320 ± 1144 км²/год, а с октября по декабрь сокращение площади ледяного покрова было максимальным – 5043 ± 1345 км²/год. С мая по декабрь тренды сокращения площади льдов Чукотского моря были статистически значимыми (см. табл. 1).

Изменения, происходившие с ледяным покровом в море Бофорта, показаны на рис. 5е. Зимой вариации площади льдов и их средние изменения были незначительны и статистически незначимы. Сокращение ледяного покрова в весенний период зафиксировано на уровне 847 ± 718 км²/год. Летом сокращение площади льдов было весьма значительным – 5028 ± 2355 км²/год, а осенью уменьшение площади ледяного покрова составило 2026 ± 966 км²/год. Статистически значимые среднемесячные тренды были зафиксированы в сентябре и октябре (см. табл. 1).

Изменения морского ледяного покрова Арктики относятся к наиболее точно установленным трансформациям, произошедшим в этом регионе с начала 80-х гг. прошлого столетия. Благодаря доступности последовательных глобальных спутниковых измерений, проводившихся начиная с ноября 1978 г. радиометрами микроволнового диапазона, можно с уверенностью говорить о сокращении ледяного покрова Арктики со средней скоростью 4,48 % за десятилетие за рассматриваемый почти 30-летний период. Особенно драматические изменения произошли в сентябре 2007 г., когда площадь ледяного покрова сократилась, по сравнению с сентябрем 2005 г., когда наблюдался предыдущий минимум, сразу на 19,6 %, или на 1 млн км², став равной приблизительно 4 млн км². Благодаря вкладу сентябрьского минимума 2007 г. средняя скорость сокращения арктического морского ледяного массива за указанный период увеличилась с 3,9 % до 4,5 % за десятилетие.

Сокращение площади морского льда в морях, омывающих с севера территорию России, и в Канадском секторе Арктики также зафиксировано спутниковыми измерениями, причем проявлялось оно по-разному в разных областях. В зимние и весенние месяцы наиболее сильное сокращение ледяного покрова отмечено в части Арктики, примыкающей к Атлантическому океану. В летние и осенние месяцы наибольшие изменения произошли в противоположном секторе Арктики, в основном – в Чукотском море и море Бофорта.

Сравнение изложенных в работе данных спутниковых наблюдений с результатами глобальных климатических моделей показывает, что наблюдаемое сокращение морского ледяного покрова Арктики происходит быстрее, чем в любом из модельных расчетов, проведенных для четвертого оценочного отчета Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Это наблюдаемое сокращение приблизительно на 30 лет опережает среднее для модельного ансамбля уменьшение ледяного покрова, согласно чему Арктика летом может оказаться свободной ото льда уже к 2050 г. Совместный анализ рассмотренных в работе данных наблюдений и модельных результатов может быть полезен в дальнейших исследованиях трансформации ледяного покрова и климата Арктики.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Йоханнесен О.М., Бобылев Л.П., Кузьмина С.И., Шалина Е.В., Хворостовский К.С.* Изменчивость климата Арктики в контексте глобальных изменений // Вычислительные технологии. 2005. Т. 10. Ч. 1. С. 56–62.
2. *Шалина Е.В., Йоханнесен О.М.* Изменение ледового покрытия Баренцева, Карского, Восточно-Сибирского морей и моря Лаптевых по данным приборов SMMR и SSMI/1 за период с 1978 по 1999 г. // Исследование Земли из космоса. 2001. № 5. С. 45–52.
3. *Bjorgo E., O.M. Johannessen, M.W. Miles.* Analysis of merged SMMR-SSMI time series of Arctic and Antarctic sea ice parameters 1978–1995 // Geophys. Res. Lett. 1997. Vol. 24. P. 413–416.
4. *Carsey F.* Microwave remote sensing of sea ice. Geophysical Monograph 68, AGU. 1992. 462 p.
5. *Cavalieri D.J., Crawford J.P., Drinkwater M.R., Eppler D.T., Farmer L.D., Jentz R.R., Wackerman C.C.* Aircraft active and passive- microwave validation of sea ice concentration from the DMSP SSMI // J. Geophys. Res. 1991. Vol. 96. P. 21989–22008.
6. *Christy J. R., Spenser R. W., and Lobl E. S.* Analysis of the merging procedure for the MSU daily temperature time series // J. Clim. 1998. Vol. 11. P. 2016–2041.
7. *Comiso J.* Characteristics of Arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations // J. Geophys. Res. 1986. Vol. 91. P. 975–994.
8. *Comiso J.C., Parkinson C.L., Gersten R., Stock L.* Accelerated decline in the Arctic sea ice cover // Geophys. Res. Lett. 2008. Vol. 35. L01703, doi:10.1029/2007/GL031972.
9. *Gloersen P., Campbell W., Cavalieri D., Comiso J., Parkinson C., Zwally H.* Arctic and Antarctic sea ice, 1978–1987. Satellite passive-microwave observations and analysis. NASA, Washington, D.C., 1992. 289 p.
10. *Gloersen P., Cavalieri D.* Reduction of weather effects in the calculation of sea ice concentration from microwave radiances // J. Geophys. Res. 1986. Vol. 91. P. 3913–3919.
11. *Hall A.* The role of surface albedo feedback in climate // J. Clim. 2004. Vol. 17. P. 1550–1568.
12. *Hurrell J. W., Trenberth K. E.* Spurious trends in satellite MSU temperatures from merging different satellite records // Nature. 1997. Vol. 386. P. 164–167.
13. *Hurrell J. W., Trenberth K. E.* Difficulties in obtaining reliable temperature trends: reconciling the surface and satellite microwave sounding unit records // J. Clim. 1998. Vol. 11. P. 945–967.
14. *Johannessen O.M., Miles M., Bjorgo E.* The Arctic's shrinking ice // Nature. 1995. Vol. 376. P. 126–127.
15. *Parkinson C.L., Cavalieri D.* A 21 year record of Arctic sea ice extents and their regional, seasonal and monthly variability and trends // Ann. Glaciol. 2002. Vol. 34. P. 441–446.

16. Parkinson C.L., Cavalieri D., Gloersen P., Zwally H., Comiso J. Arctic sea ice extents, areas, and trends, 1978–1996 // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104. P. 20837–20856.
17. Perovich D.K., Light B., Eicken H., Jones K.F., Runciman K., Nghiem S.V. Increase in solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas, 1979-2005: Attribution and role in the ice-albedo feedback // Geophys. Res. Lett. 2007. Vol. 34. L19505, doi:10.1029/2007GL031480.
18. Stroeve J., Holland M. M., Meier W., Scambos T., and Serreze M. Arctic sea ice decline: Faster than forecast // Geophys. Res. Lett. 2007. Vol. 34. L09501, doi: 10.1029/2007GL029703.
19. Svendsen E., Kloster K., Farrelly B., Johannessen O.M., Johannessen J.A., Campbell W.J., Gloersen P., Cavalieri D.J., Matzler C. Norwegian Remote Sensing Experiment: Evaluation of the Nimbus-7 SMMR for sea ice research // J. Geophys. Res. 1983. Vol. 88(C5). P. 2781–2791.
20. Wentz F. J., Schabel M. Precise climate monitoring using complementary satellite data sets // Nature. 2000. Vol. 403. P. 414–416.

L.P.BOBYLEV, E.V.SHALINA, O.M.JOHANNESSEN, E.V.ZABOLOTSKIKH, S.SANDVEN,
O.I.BABINA

ARCTIC SEA ICE TRANSFORMATION REVEALED FROM SATELLITE PASSIVE MICROWAVE DATA

The paper contains estimations of the sea ice transformation in the Northern Hemisphere retrieved from satellite passive microwave data from November 1978 to September 2007. It is shown that during this period the total Arctic sea ice cover has been declining with the statistically significant rate of 4,48 % per decade. The analyses of changes that have occurred over the mentioned period in the Arctic seas taken separately is carried out and quantitative estimations fulfilled. These changes in the Arctic seas can also be described as general decline, however statistically significant trends have not been derived for every month of the year.