

## Сокращение ледяного покрова Арктики по данным спутникового пассивного микроволнового зондирования

Е.В. Шалина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет  
Факультет географии и геоэкологии. Санкт-Петербург, 10 линия, 33/35

E-mail: elena.shalina@gmail.com

<sup>2</sup> Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», Санкт-Петербург, 14 линия, 7

В статье приведены данные об изменении площади льдов северного полушария, полученные при обработке данных пассивных микроволновых спутниковых наблюдений за период с ноября 1978 г. по декабрь 2012 г. Отмечено, что изменения ледяного покрова Арктики неодинаково распределены по сезонам. Процесс сокращения площади ледяного покрова, наблюдаемого в сентябре, в конце сезона летнего таяния, происходит намного интенсивнее, чем уменьшение площади льдов арктического бассейна в целом. Рассмотрено также сокращение ледяного покрова в морях Российской Арктики. Представлены данные, свидетельствующие об ускорении темпов отступления льдов в летний период в морях Российской Арктики в текущем столетии.

**Ключевые слова:** морской лед, сокращение ледяного покрова, Арктика, моря Российской Арктики, дистанционное зондирование в микроволновом диапазоне, потепление климата.

### Введение

Наблюдающееся в последние десятилетия глобальное потепление и сопровождающее его сокращение площади морских льдов определяют пристальное внимание к трансформации ледяного покрова Арктики. Эти процессы оказывают влияние как на условия обитания представителей фауны Арктического бассейна, так и на возможности ведения хозяйственной деятельности в этом регионе. Исследования показывают, что сокращение ледяного покрова оказывает угнетающее влияние на популяцию белых медведей, ставя их в экстремальные условия и вынуждая напрягать адаптационные способности, чтобы выжить в изменившихся условиях (Stirling, Parkinson, 2006). С другой стороны, более раннее отступление льдов способствует расширению возможностей судоходства в Арктических морях, в частности более интенсивному использованию Северного морского пути.

Полноценный мониторинг ледяного покрова для обширных и удаленных районов Арктики может быть осуществлен только на основе спутниковых наблюдений. Длительный мониторинг морских льдов обеспечивают данные спутникового пассивного дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне спектра, доступные с конца октября 1978 г. Важным преимуществом измерений в микроволновом диапазоне является возможность измерений в любое время суток и при наличии облачности, что для Арктики является исключительно важным обстоятельством. Настоящая работа посвящена исследованию трансформации ледяного покрова Арктики за период с ноября 1978 по декабрь 2012 г. (около 34 лет) на основе спутниковых пассивных микроволновых наблюдений.

## Данные

В качестве основного источника данных об изменениях параметров ледяного покрова Арктики использованы пассивные дистанционные измерения в микроволновом диапазоне, начатые на спутнике Nimbus-7 прибором SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) и продолженные на серии спутников DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) прибором SSM/I (Special Sensor Microwave / Imager), а затем прибором SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder). В расчетах использовались данные, расположенные в открытом доступе на сайте центра NSIDC (National Snow and Ice Data Center, Colorado, USA) nsidc.org/data/.

Наблюдения радиометром SMMR проводились с частотой раз в два дня с ноября 1978 г. по август 1987 г. Наблюдения с помощью SSMI были начаты в июле 1987 г. В течение почти двух месяцев оба прибора проводили измерения одновременно, что позволило выполнить их интеркалибровку и получить в рамках возможного однородный ряд данных измерений микроволнового излучения, относящихся к территории всего Арктического бассейна начиная с 1978 г. (Bjorgo et al., 1997; Cavalieri et al., 1991).

Радиометр SSMI был установлен на спутники F8, F10, F11, F12, F13 и F15 серии DMSP, однако центр NSIDC предоставляет данные лишь с 8-го, 11-го и 13-го спутников, что обеспечивает, по мнению экспертов этого центра, наилучшую однородность данных для ряда измерений SSMI. В мае 2009 г. инструмент SSMI, установленный на спутнике F13, был признан негодным для проведения достоверных измерений, и NSIDC стал предоставлять пользователям данные прибора SSMIS, который работает в космосе с 2003 г. и размещен на спутнике DMSP-F17. Анализ проблем с яркостными температурами, полученными со спутника F13, вынудил поставщика данных разместить на сайте рекомендацию не использовать данные, полученные с указанного спутника после 31 декабря 2007 г. С целью обеспечить возможность сопоставления разных измерений и провести интеркалибровку данных SSMI и SSMIS, NSIDC предоставил данные параллельных измерений приборами SSMI и SSMIS для 2007, 2008 и 2009 годов; эти измерения и были использованы в настоящей работе для обеспечения наилучшей стыковки данных двух датчиков. Измерения радиометром SSMIS продолжаются по настоящее время.

Все описанные выше данные спутниковых измерений доступны для скачивания на сайте центра NSIDC в виде осредненных за день полей яркостной температуры, представленных в полярной стереографической проекции с размером ячейки 25x25 км. Как видно, эти данные имеют достаточно низкое пространственное разрешение, что накладывает определенные ограничения на возможности их использования. Данные пассивных микроволновых измерений позволяют проводить исследования в глобальном масштабе, но не дают возможности получения детальной картины ледяного покрова для решения локальных задач. Данные активного микроволнового зондирования обладают тем же преимуществом всепогодности, но имеют гораздо более высокое разрешение и могут быть использованы при решении проблем, требующих обработки подробной пространственной информации. В данной работе они не используются, потому что основной целью здесь является получение глобальной картины

изменений ледяного покрова Северного Ледовитого океана и прилегающих к нему морей за последние несколько десятилетий, а эту информацию можно извлечь лишь из описанного выше ряда данных пассивного микроволнового зондирования.

### **Алгоритм**

Расчеты параметров морского ледяного покрова проведены на основе рассмотренных выше данных с использованием алгоритма NORSEX (Svendsen et al., 1983), 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 (Comiso, 1986; Gloersen et al., 1992), основан на предположении, что зондируемый участок морской поверхности Арктики может быть описан как комбинация трех типов поверхностей: «однолетний лед», «многолетний лед» и «чистая (свободная ото льда) вода». Соответственно яркостная температура зондируемого участка поверхности (пикселя изображения) представляется суммой яркостных температур занимающих этот участок типов поверхностей.

Для вычисления яркостной температуры зондируемого участка по измеряемой на спутнике яркостной температуре используется упрощенная форма уравнения переноса излучения в микроволновом диапазоне, в котором учитывается поглощение атмосферы (среднее климатическое в зависимости от сезона), собственное излучение атмосферы и излучение космоса (Svendsen et al., 1983). 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. Использовано также предположение, что излучательные способности воды, однолетнего и многолетнего льда не меняются ни в пространстве, ни во времени (от одного сезона к другому), что, скорее всего, не соответствует действительности, но мы не располагаем достаточными данными, которые позволили бы промоделировать изменение этих величин.

### **Результаты расчетов и их анализ**

Сокращение ледяного покрова Арктики привлекло внимание ученых уже в конце прошлого столетия (Johannessen et al., 1999; Vinnikov et al., 1999). В текущем столетии исследования трансформации морских льдов северного полушария констатировали все убыстряющееся сокращение ледяного покрова: от 3% за декаду в начале столетия до 4,6% к 2007 г. (Йоханнессен и др., 2005; Шалина и др., 2008; Comiso et al., 2008; Stroeve et al., 2007; Stroeve et al., 2012a). В 2012 г. мы наблюдали в Северном Ледовитом океане наименьший уровень ледовитости из когда-либо зафиксированных. Наблюдавшаяся в середине сентября 2012 г. площадь ледяного покрова Арктики была меньше предыдущей рекордно малой площади 2007 г. примерно на 15%.

Постепенное сокращение площади ледяного покрова Арктики за период пассивных спутниковых наблюдений в микроволновом диапазоне по данным до декабря 2012 г.

показано на рис. 1. Здесь представлены отклонения средней за каждый месяц площади морских льдов от среднемесячных за весь период наблюдений, нормированные относительно тех же среднемесячных за весь период наблюдений значений. Линия тренда представляет собою линию, полученную с помощью метода наименьших квадратов, наилучшим образом аппроксимирующую имеющиеся результаты. Расчеты показывают, что за период микроволновых спутниковых наблюдений с января 1979 по декабрь 2012 г. площадь морских льдов сокращалась в среднем на  $51\,600 \pm 1800 \text{ км}^2$  в год или на 5% за декаду.



*Рис. 1. Изменения общей площади морских льдов в Арктике согласно спутниковым наблюдениям за период с января 1979 г. по декабрь 2012 г. и соответствующий им линейный тренд. На графике представлена разница между величиной площади льда, рассчитанной для каждого месяца, и среднемесячным значением площади льда, полученным при обработке всего ряда наблюдений. Тенденция изменения площади представлена линейным трендом*

Анализ изменений площади морских льдов, представленных на рис. 1, позволяет выделить три временных промежутка, характеризующихся разными тенденциями изменения площади. С начала измерений до конца 1997 г. сокращение площади морских льдов составляло в среднем  $33\,200 \text{ км}^2$  в год или 3,1% за декаду, с 1998 по 2006 г. (включительно) тенденция изменилась и составила  $106\,000 \text{ км}^2$  в год, т.е. увеличилась в абсолютных значениях до -10% за декаду. В последние годы – с 2007 по 2012 г. – сокращение составляло в среднем  $61\,400 \text{ км}^2$  в год или 6% за декаду. Последний период характеризуется наибольшей изменчивостью площади льдов по отношению к средним значениям.

Площадь ледяного покрова Арктики 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. Максимальное покрытие льдами Арктики наблюдается в марте. Анализ результатов расчетов площади ледяного покрова за период спутниковых наблюдений позволяет выявить тенденцию наиболее

быстрого сокращения площади морских льдов в летний сезон. 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  $-13\%$  за декаду, больше в абсолютном выражении ( $-77\,400 \pm 8500$  км $^2$  в год), чем тренд, характеризующий изменение площади арктических льдов в целом (рис. 1). Особенно явно тенденция сокращения площади сентябрьского ледяного массива стала проявляться в текущем столетии. Если разбить весь период спутниковых наблюдений на два – до 2000 г. и после, а затем оценить тенденции изменения площади сентябрьского льда, то получается, что в промежуток 1988–2000 гг. скорость сокращения составляла лишь 5,9% за десятилетие, а с 2000 по 2012 г. она выросла до 36%.

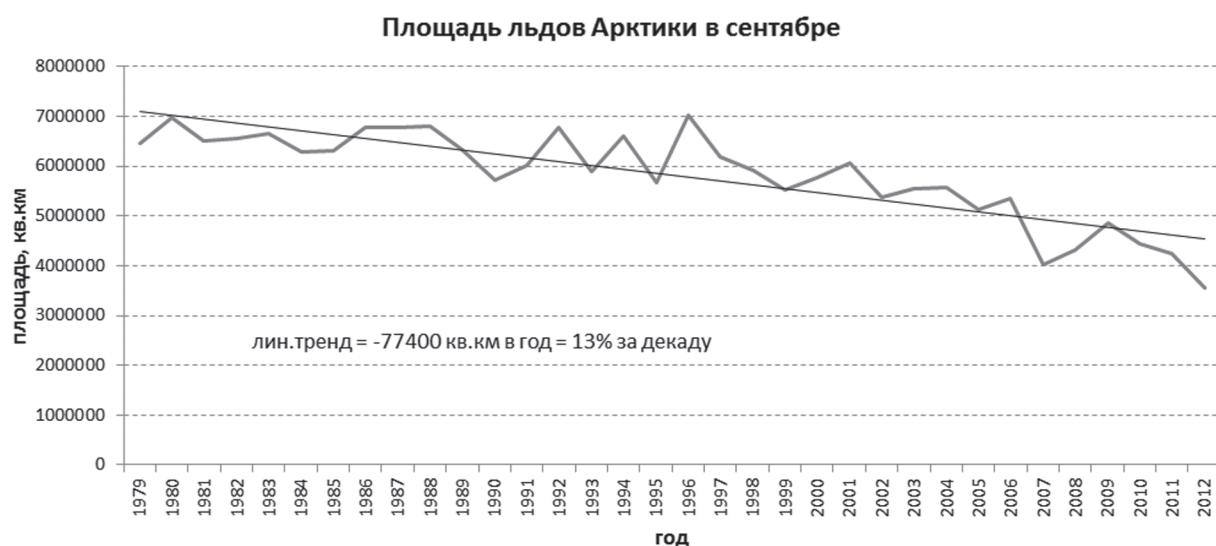


Рис. 2. Площадь арктических льдов в сентябре (среднемесячные данные) за период спутниковых наблюдений, а также линейный тренд, представляющие тенденцию сокращения сентябрьского ледяного покрова

Значительная скорость сокращения летнего ледяного покрова Арктики, которая усиливается в последнее время, делает актуальным вопрос, станет ли Арктика с течением времени свободной ото льда летом и когда это произойдет. Увеличение площади свободной ото льда воды, имеющей низкое альбедо, а значит способной поглотить гораздо больше тепла, чем ледяной массив, имеющий высокое альбедо, а также наблюдающееся сокращение толщины ледяного покрова Арктики (Kwok et al., 2009) – вот факторы, склоняющие к заключению, что тенденция сокращения площади ледяного покрова сохранится. Расчеты, сделанные с помощью климатических моделей последнего поколения, показывают, что Арктика станет летом свободной ото льда ранее 2035 г. (Stroeve et al., 2012b).

Изменения протяженности ледяного покрова морей Российской Арктики представлены на рис. 3. На графиках показаны среднемесячные значения с 1988 г. по настоящее время (период работы датчиков SSMI и SSMIS). Видно, что во всех морях тенденция сокращения ледяного покрова проявлена, однако в разных морях по-разному.

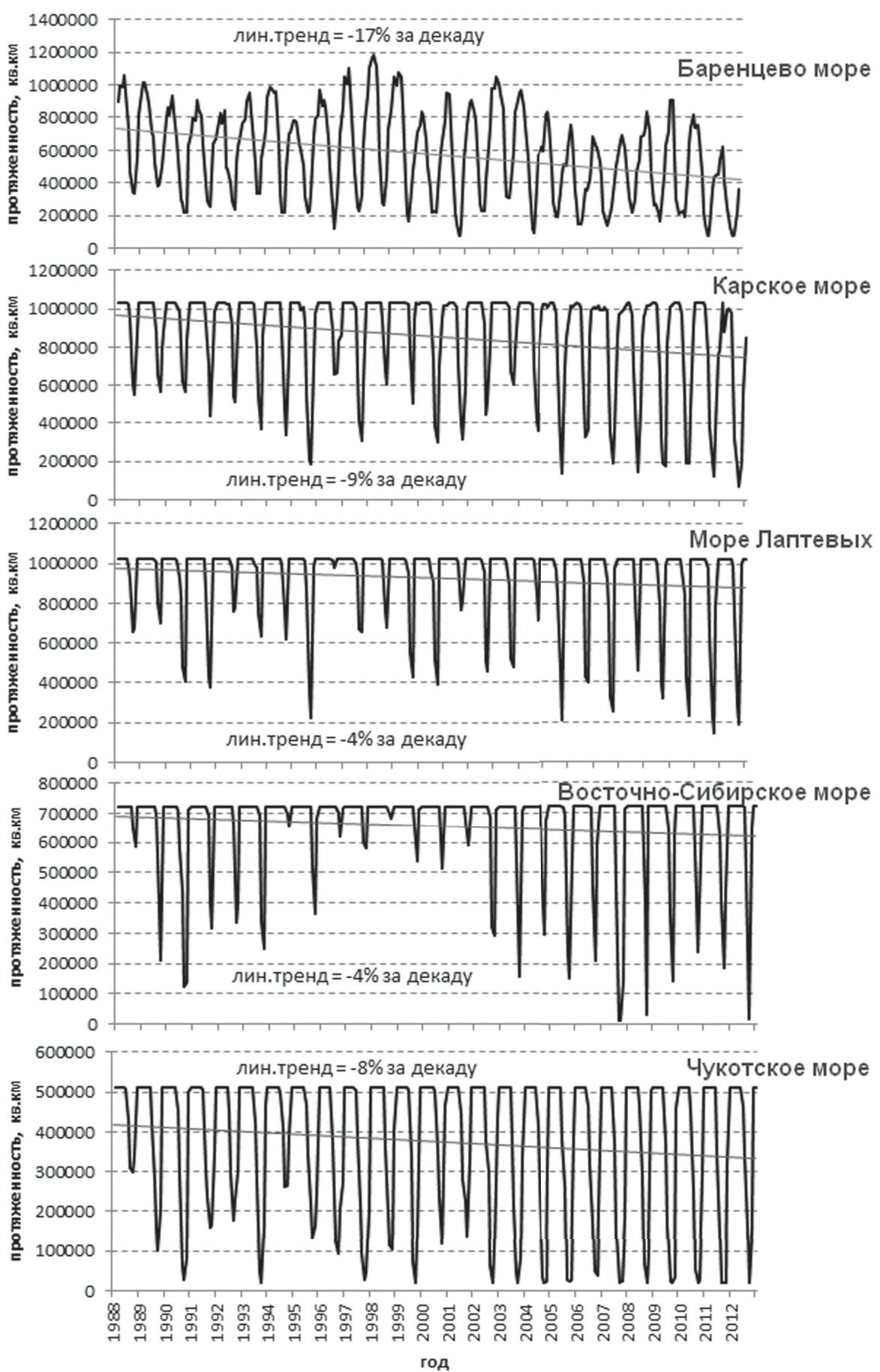


Рис. 3. Протяженность ледяного покрова (среднемесячные данные) в морях Российской Арктики с 1988 по 2012 г.

Баренцево море, будучи наиболее подверженным влиянию теплых вод Атлантики, имеет особый ледовый режим. В то время как Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское 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. Наибольшая протяженность ледяного покрова наблюдалась в Баренцевом море зимой 1998 г., наименьшая – в 2011 и 2012 гг. Расчеты показывают, что среднее сокращение протяженности ледяного покрова Баренцева моря за последние 25 лет (определенное линейным трендом) составляет 17% за декаду.

Моря Карское, Лаптевых и Восточно-Сибирское демонстрируют схожие тенденции изменения протяженности ледяного покрова: в текущем столетии летний ледяной покров имеет тенденцию к значительному сокращению. Так, в предыдущем столетии ледяной покров Карского моря сокращался летом до уровня 20% полного ледяного покрова лишь один раз, а в текущем столетии это произошло 7 раз. В итоге средняя скорость сокращения ледяного покрова в этом море составляет 9% за декаду. В море Лаптевых и в Восточно-Сибирском море также наблюдается негативный тренд изменения протяженности ледяного покрова, хотя и меньший по величине – 4% за декаду. Эти два моря, где средняя скорость сокращения ледяного покрова наименьшая, наиболее удалены от влияния неарктических водных масс. В текущем столетии (2000–2012 гг.) тенденция сокращения ледяного покрова составляет 28% за декаду в Карском море, 13% и 15% в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском.

Чукотское море испытывает влияние вод Тихого океана, а также встречает все атмосферные процессы, идущие из тихоокеанского региона, которые оказывают влияние на перенос, разрушение и таяние ледяного покрова. *Рис. 3* показывает, что протяженность летнего ледяного покрова этого моря в текущем столетии начиная с 2002 г. была минимальной. Тренд сокращения протяженности ледяного покрова в этом море составляет по нашим расчетам в среднем 8% за декаду за период с 1988 по 2012 г. и 21% в текущем столетии (с 2000 г. по настоящее время).

## Заключение

Последовательные глобальные спутниковые наблюдения, проводившиеся начиная с ноября 1978 г. американскими радиометрами микроволнового диапазона, позволяют с уверенностью говорить о сокращении ледяного покрытия Арктики со средней скоростью  $51\,600 \pm 1800$  км<sup>2</sup> в год, что составляет 5% за десятиление в период с 1979 по 2012 г. Изменения ледяного покрова Арктики неодинаково распределены по сезонам. Процесс сокращения площади ледяного покрова, наблюдавшегося в сентябре, в конце сезона летнего таяния в Арктике, проходит намного интенсивнее, чем уменьшение площади льдов, зафиксированное для всего Арктического бассейна в целом. Средняя скорость сокращения сентябрьского ледяного покрова в 2,6 раз выше, чем скорость сокращения ледяного массива Арктики в целом и составляет 13% за декаду. Общая тенденция сокращения

ледяного покрова проявляется и в морях Российской Арктики. Наиболее интенсивно этот процесс происходит в Баренцевом море, испытывающем значительное влияние теплых вод Атлантики. Наименьшая скорость изменения наблюдается в море Лаптевых и в Восточно-Сибирском море, которые, напротив, наиболее удалены от влияния неарктических водных масс.

## Литература

1. Йоханнессен 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., Йоханнессен О.М., Бобылев Л.П. Изменение арктического ледяного покрова по данным спутникового пассивного микроволнового зондирования с 1978 по 2007 год // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 228–233.
3. Bjorgo E., Johannessen O.M., Miles M.W. 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. 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 SSMMI // J. Geophys. Res. 1991. Vol. 96. P. 21989–22008.
5. Comiso J. Characteristics of Arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations // J. Geoph. Res. 1986. Vol. 91. P. 975–994.
6. Comiso J.C., Parkinson C.L., Gersten R., Stock L. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover // Geophys. Res. Lett. 2008. 35, L01703, doi:10.1029/2007/GL031972.
7. 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.
8. Johannessen O.M., Shalina E.V., Miles M.W. Satellite evidence for an Arctic sea ice cover in transformation // Science, 1999. 286. P. 1937–1939.
9. Kwok R., Cunningham G.F., Wensnahan M., Rigor I., Zwally H.J., Yi D. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008 // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114, C07005, doi:10.1029/2009JC005312.
10. 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.
11. Stirling I., Parkinson C.L. Possible effects of climate warming on selected populations of polar bears (*Ursus maritimus*) in the Canadian Arctic // Arctic 59 (3). 2006. P. 261–275.
12. Stroeve J., Holland M.M., Meier W., Scambos T., Serreze M. Arctic sea ice decline: Faster than forecast // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34. Issue 9. 109501, doi: 10.1029/2007gl029703.

13. Stroeve J.C., Serreze M.C., Holland M.M., Kay J.E., Maslanik J., Barrett A.P. (a) The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis // *Climatic Change*. 2012. Vol. 110. Issue 3–4. P. 1005–1027. doi:10.1007/s10584-011-0101-1.
14. Stroeve J.C., Kattsov V., Barrett A., Serreze M., Pavlova T., Holland M., Meier W.N. (b) Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations // *Geophys. Res. Lett.* 1012. Vol. 39.L16502. doi:10.1029/2012GL052676.
15. 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. V. 88 (C5). P. 2781–2791.
16. Vinnikov K.Y., Robock A., Stouffer R.J., Walsh J.E., Parkinson C.L., Cavalieri D.J., Mitchell J.F., Garrett D., Zakharov V.F. Global warming and Northern Hemisphere sea ice extent // *Science*. 1999. 286. P. 1934–1937.

## **Arctic sea ice retreat from satellite passive microwave observations**

**E.V. Shalina<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University. Saint Petersburg, 10<sup>th</sup> Line, 33/35  
E-mail: elena.shalina@gmail.com

<sup>2</sup> Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, Saint Petersburg, 14 Line, 7

Arctic sea ice cover transformations derived from passive microwave satellite data for the period November 1978 – December 2012 are reported and discussed in the paper. The average overall trend of the ice cover for the whole Arctic is negative and sea ice coverage demonstrates acceleration in the decline. The sharpest downward trend is observed for the sea ice left at the end of each summer. Ice conditions in the seas of the Russian Arctic are analyzed in details. Increasing speed of the ice retreat in summer in the present century is reported.

**Keywords:** sea ice, sea ice retreat, Arctic, seas of the Russian Arctic, remote sensing in the microwave region, climate change.