

УДК 551.467

И.А. Репина<sup>1,2</sup>, В.В. Тихонов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

<sup>3</sup>*Институт космических исследований РАН*

I.A. Repina<sup>1,2</sup>, V.V. Tikhonov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS,*

<sup>2</sup>*M.V. Lomonosov Moscow State University*

<sup>3</sup>*Space Research Institute RAS*

iar.ifaran@gmail.com ; vtikhonov@asp.iki.rssi.ru

**Снежицы на поверхности льда в летний период и их связь с  
климатическими изменениями в Арктике**

**Melt pond on the sea ice surface during summer and its connection with  
Arctic climate change**

Образование снежиц на поверхности морского льда в летний период является основным фактором, приводящим к изменению его альбедо. Но снежицы также влияют и на температурный режим поверхности, на характер ее взаимодействия с атмосферой. Роль снежиц в формировании потока углекислого газа, его величины и знака также может быть значимой. В статье на основании данных наземных измерений исследуются термические, радиационные свойства снежиц, их влияние на энерго- и газообмен ледовой поверхности с атмосферой. Использование результатов спутниковых измерений в микроволновом диапазоне позволило проследить динамику изменчивости относительной площади снежиц за последние десятилетия и их роль в формировании сентябрьского минимума льда.

The formation of melt ponds on the surface of sea ice during summer is one of the main factors affecting variability in surface albedo over the ice cover. Also melt ponds influence on the surface temperature regime and on air-surface interaction. The role and impact of pond formation on both the direction and size of CO<sub>2</sub> fluxes between air and sea is also significant. In the paper on the base on data field measurement the thermal, radiative properties of melt ponds

are investigated. Also its effect on energy- and gas air-surface exchange is studied. The passive microwave satellite data were used. Processing of satellite data permits to estimate the trend of mean relative melt pond fraction in the Arctic and its role in ice extend minimum formation.

**Ключевые слова:** морской лёд, климат Арктики, снежницы, альbedo, дистанционное зондирование

**Key Words:** sea ice, Arctic climate, melt ponds, albedo, remote sensing

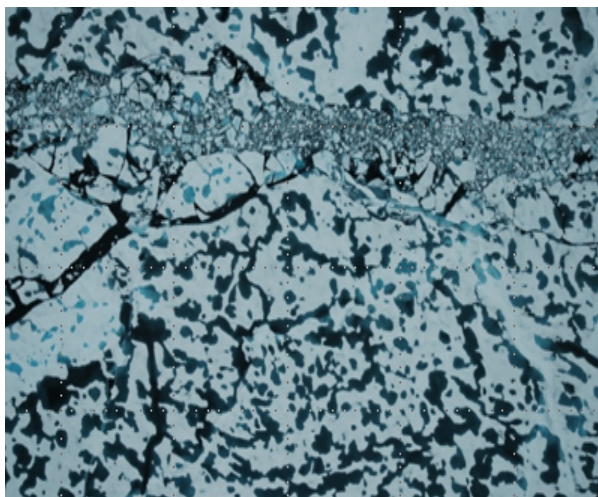
Состояние морского ледяного покрова связано с изменениями климатической системы Арктики благодаря так называемому эффекту полярного усиления, которое из-за ряда положительных и отрицательных обратных связей приводит к более быстрому потеплению в Арктике, чем в других регионах планеты [1; 2]. Полярное усиление объясняется как региональными причинами, так и влиянием “удаленных связей” вследствие атмосферных и океанических переносов [2]. Но все-таки определяющую роль играет альбедный механизм, действие которого заключается в том, что альbedo (отражающая способность) открытой воды гораздо меньше, чем льда и снега (вода отражает около 10% приходящего солнечного излучения, а лед – 80-95% в зависимости от состояния поверхности). И, чем больше свободных ото льда пространств в Северном Ледовитом океане, тем больше тепла он поглощает за летний сезон.

С начала 2000-х годов летнее сокращение площади арктического морского льда заметно ускорилось по сравнению с предшествующими двумя десятилетиями [3], и фактические темпы этого уменьшения превышают прогнозы климатических моделей даже по самым пессимистичным сценариям [4]. Но изменяется не только площадь ледяного покрова - еще более значительные изменения произошли с его толщиной [5; 6]. В результате, в настоящее время количество многолетних льдов в Арктике существенно сократилось – если в середине 1980-х годов многолетние льды занимали 70% площади ледяного покрова Арктики, то к 2012 году их осталось всего 30-40% [7]. И этот процесс продолжается. Изменения наблюдаются и в структуре ледяных полей – их торосистости, площади разводий в зимний период, площади снежниц. Также изменилась продолжительность сезона летнего таяния морского льда – за время спутниковых наблюдений с 1978 года он увеличивается на 5 дней за десятилетие [8].

Если мы посмотрим на фотографию ледяного массива где-нибудь в центре Арктики в июле (рис. 1), то увидим не белое ледяное поле, а будто пятнистую шкуру какого-то зверя. Но все-таки это сплошной лед. А пятна – это снежницы, лужи или небольшие озера талой воды, которые образуются на льду в летний период из-за

воздействия солнечного излучения и таяния снега и верхнего слоя льда. Начало формирования снежниц – конец мая, в августе они начинают замерзать и к концу сентября практически исчезают с поверхности ледяного покрова.

а)



б)



Рисунок 1. Снежницы (талые пруды) на льду в Арктике в июле: а - фотография с самолета, б - с борта судна.

Эти, столь незначительные на первый взгляд, лужи являются одним из важнейших элементов арктической климатической системы [9]. Их глубина может изменяться от нескольких сантиметров до полутора метров, а площадь достигает сотни квадратных метров. Пространственное распределение на льду, размер и глубина снежниц, также как и их цвет, очень изменчивы и зависят от топографии, поверхностных и атмосферных условий. На ровном однолетнем льду их доля в общем покрытии может достигать 90% [10]. В среднем в летний период снежницы покрывают 50-60% площади ледяной поверхности, и, обладая низким альбедо, поглощают в несколько раз больше приходящей коротковолновой радиации, чем остальная часть снежно-ледяного покрова. Присутствие снежниц на льду приводит к уменьшению альбедо поверхности с 80–90 % до 30–60%, что вызывает дополнительный её нагрев и, следовательно, снежницы оказывают значимое влияние на таяние льда [11] и изменение площади многолетних льдов [12]. Поэтому минимум альбедо ледяного покрова Арктики (Рис. 2) наблюдается как раз в июле, когда площадь открытых снежниц наибольшая.

Также снежницы, поглощая больше солнечной радиации, чем окружающий лед, способствуют его неравномерному таянию. И поступление тепла от солнечного излучения к океану через покрытый снежницами лед на порядок больше, чем через лед, ими не

покрытый, и лёд со снежницами тает в 2-3 раза быстрее, чем чистый. А уменьшение площади многолетних льдов и связанное с этим увеличение однолетних увеличивает относительную площадь снежниц [13; 14], и снежницы вносят дополнительный вклад в альбедный механизм полярного усиления. Еще существенное значение снежниц при таянии припайных льдов, где они являются основной причиной разрушения ледяного покрова.

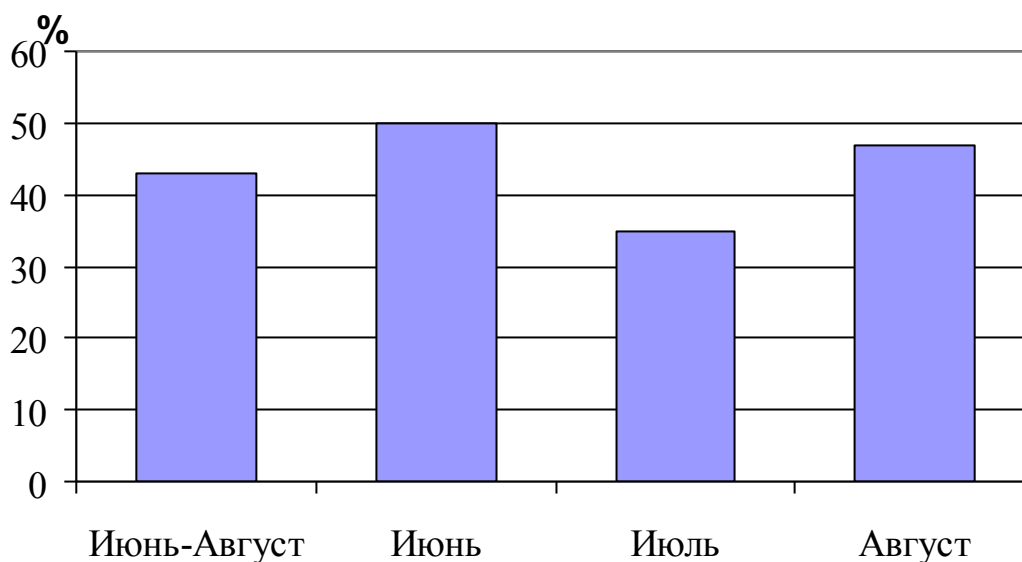


Рисунок 2 - Среднее альbedo поверхности покрытой льдом части Северного Ледовитого океана в летний период

Фазовые превращения на поверхности льда оказывают существенное влияние и на формирование термического режима приводного слоя атмосферы. В основном, лед препятствует энергообмену. Потoki тепла и влаги в зимний период в Арктике близки к нулю [15]. В летний период температура воздуха близка к температуре как льда, так и открытой воды, тепловые потоки малы, и основную роль в формировании баланса тепла играет радиационный баланс за счет потоков коротковолновой радиации [16]. При переходе к отрицательным температурам воздуха в августе-сентябре снежницы начинают замерзать, но сначала покрываются тонким льдом, температура которого выше температуры окружающего льда (Рис. 3). И, следовательно, они становятся источником положительных потоков тепла в атмосферу (Рис. 4).

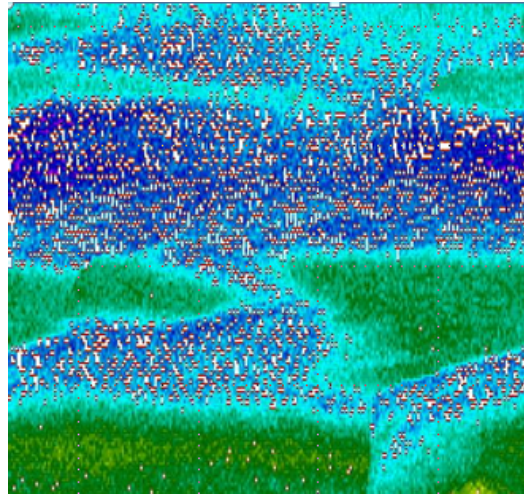


Рисунок 3 - Термограмма участка поверхности льда, покрытого замерзающими снежинками. Температуры сплошного льда (синий цвет)  $-8^{\circ}\text{C}$ , температура покрытой тонким льдом снежинцы (зеленый цвет)  $-4^{\circ}\text{C}$ . Температура воздуха  $-7^{\circ}\text{C}$

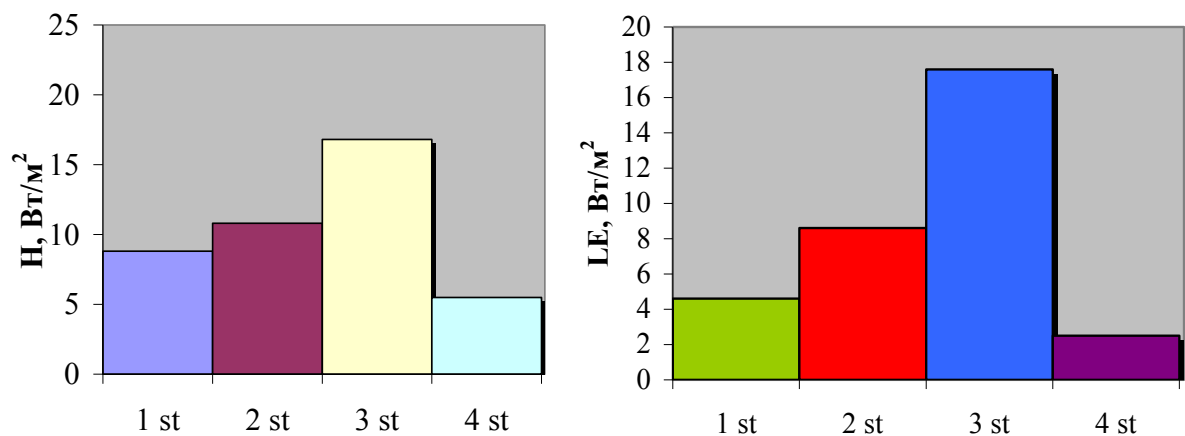


Рисунок 4 - Поток тепла (а) и влаги (б) измеренные на 4 ледовых станциях в Арктике в августе-сентябре. На всех станциях на поверхности льда находились снежинцы в стадии замерзания. Наибольшая площадь покрытия наблюдалась на третьей станции

Также снежинцы служат стоком для углекислого газа из атмосферы из-за низкого содержания в их воде растворенного углерода. Поток углекислого газа из атмосферы в воду снежиц может достигать десятка ммоль/(м<sup>2</sup> день) [18] (Рис.5).

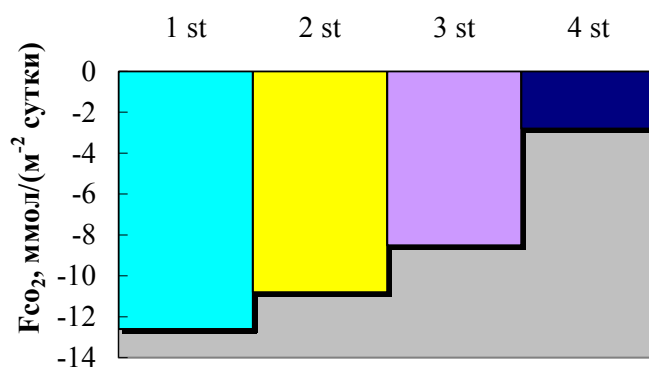


Рисунок 5 - Поток углекислого газа, измеренный на четырех ледовых станциях в июле-августе. Наибольшая площадь снежниц наблюдалась на первой станции. На четвертой станции (август) снежницы начали покрываться льдом

Все вышесказанное подтверждает климатическую значимость снежниц. Кроме того, относительная площадь снежниц, образовавшихся в период таяния ледяного покрова, может служить индикатором интенсивности будущего уменьшения его площади и одним из факторов, определяющих значение сентябрьского минимума площади льда [18].

Но снежницы - и одна из основных причин занижения летней сплоченности морского льда, определяемой по спутниковым данным. Поэтому и для климатических оценок, и для интерпретации данных дистанционного зондирования важно определение площади покрытия снежницами ледяных массивов Арктики. Правильные оценки площади снежниц на льду дают информацию для коррекции спутниковых данных и для прогноза площади ледового покрытия в осенне-зимний период.

В первых попытках определять наличие снежниц на морском льду с помощью данных дистанционного зондирования использовались космические радиолокаторы синтезированной апертуры [19], далее были разработаны методики идентификации снежниц по данным спутниковых альтиметров и скаттерометров, в частности скаттерометра QuikSCAT [20]. Но эти спутниковые системы не дают возможности проследить глобальную динамику изменчивости структуры ледяных полей как в пространственном, так и во временном масштабе. В настоящее время с этой целью используются данные спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) [11; 21]. Метод определения по MODIS основан на различных спектральных свойствах снежницы, льда, открытой воды и снега в полосе наблюдений спектрорадиометра: для каждой из перечисленных поверхностей строятся спектральные модели, а потом решается обратная задача [11]. Результаты анализа в виде карт

распределения снежниц на поверхности льда Арктики находятся в открытом доступе на сайте университета Гамбурга (ICDC, <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/daten/cryosphere/arctic-meltponds.html>). На рис. 6 показано пространственное распределение снежниц в июне 2007 и 2011 годов, предшествующих минимумам площади ледяного покрова в сентябре по данным MODIS. Карты показывают относительную площадь снежниц в одном пикселе изображения, разрешение – 12,5 км.

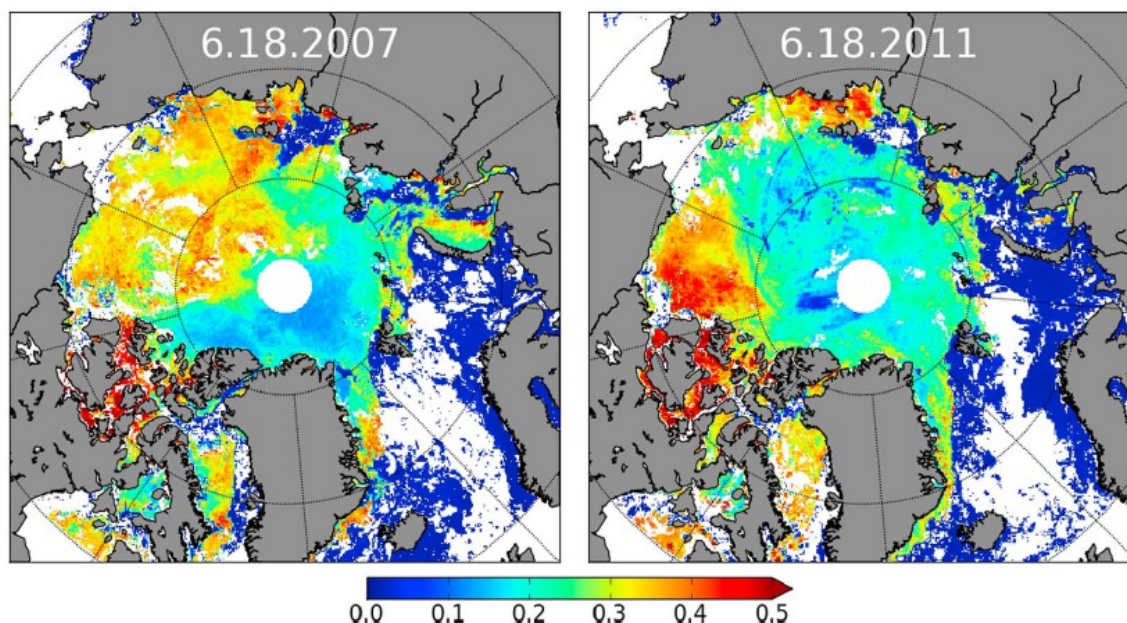


Рисунок 6. Пространственное распределение относительной площади снежниц в Арктике 18 июня 2007 и 2011 годов [21]

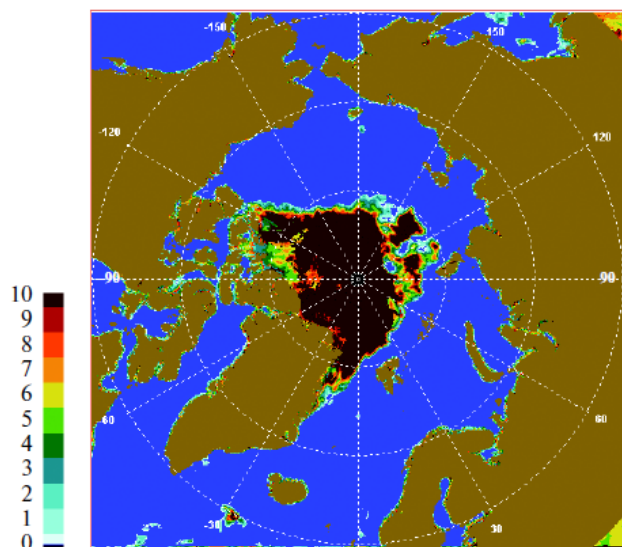
Но недостатком данных MODIS является, во-первых, относительно короткий ряд наблюдений (с 2000 года), и, главное, невозможность получать данные при наличии облачности, что для Арктики является критичным, ибо большую часть года она покрыта сплошными облаками [22].

Получать всепогодные, ежедневные, независимые от освещенности и наличия облачности данные о сплоченности и площади морского льда позволяет пассивное микроволновое зондирование. Среди ныне действующих программ наиболее продолжительной является миссия, начатая на спутнике Nimbus\_7 (1978–1987 гг., прибор SSMR) и продолжающаяся по настоящее время на спутниках серии DMSP (приборы SSM/I и SSMIS). Используемые в рамках этой программы сканирующие многоканальные микроволновые радиометры позволяют эффективно распознавать покрытую льдом поверхность и открытую воду с помощью различных алгоритмов обработки радиометрических данных [23]. Непрерывно пополняемый набор данных является общедоступным, что наряду с почти 40-летней продолжительностью ряда наблюдений

делает его важнейшим источником фактической информации о состоянии арктического ледяного покрова. Но наличие снежиц на поверхности приводит к занижению летней площади и сплоченности льда, так как радиометрические свойства открытой воды и воды снежиц одинаковы [24]. Толщина скин-слоя воды в микроволновом диапазоне менее 1 мм, поэтому даже очень тонкий слой воды на поверхности льда будет восприниматься радиометром как участок открытой воды.

Для устранения проблемы занижения сплоченности льда в разработанный в институте космических исследований алгоритм определения площади и сплоченности льда по данным пассивного микроволнового зондирования VASIA была включена модель эффективной диэлектрической проницаемости снежиц [25; 26]. Модель основана на том, что с электродинамической точки зрения, снежица представляет собой смесь трех диэлектрических сред: воды, льда и воздуха, а эффективную диэлектрическую проницаемость такого рода сред можно определить с помощью электростатических моделей смеси [27]. Алгоритм позволяет определять не только сплоченность ледового покрова, но и площадь снежиц, покрывающих лед в летнее время. Площадь снежиц можно определить, найдя разницу результатов определения сплоченности, полученных с применением модели снежиц и без нее. На рис.7 представлены карты сплоченности ледового покрова Арктики и относительной площади снежиц в баллах, полученные из этого алгоритма для 30 августа 2012 г.

а)



б)

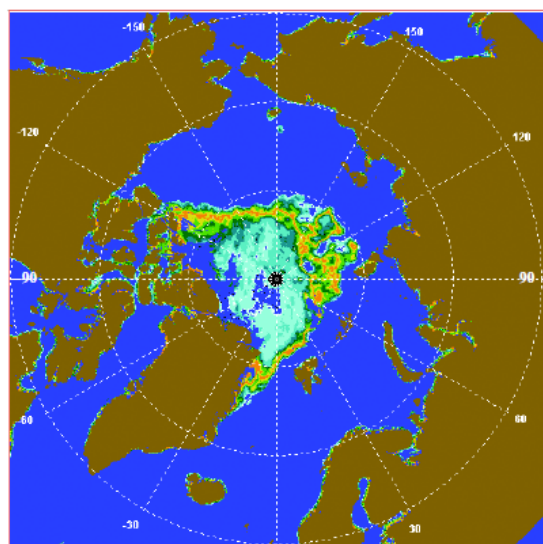


Рисунок 7 - Сплоченность ледяного покрова Арктики за 30.08.2012, рассчитанная по алгоритму VASIA (а), а также удельная площадь снежиц на поверхности льда (б)

Представленный алгоритм позволяет оценить и динамику изменения относительной площади снежниц за достаточно продолжительный период наблюдений. На рисунке 8 показано изменение относительной площади снежниц, осредненной по всему летнему сезону и всей площади арктического ледяного покрова за период с 1992 по 2014 годы. Наблюдается слабый тренд увеличения относительной площади снежниц, а также максимумы в 2007 и в 2012 годах, когда в сентябре наблюдался минимум площади ледяного покрытия Арктики. Результаты качественно совпадают с данными, полученными по MODIS за период с 2000 по 2011 годы [21], что свидетельствует о том, что оба алгоритма отражают реальные тенденции изменения состояния ледяного покрова Арктики.

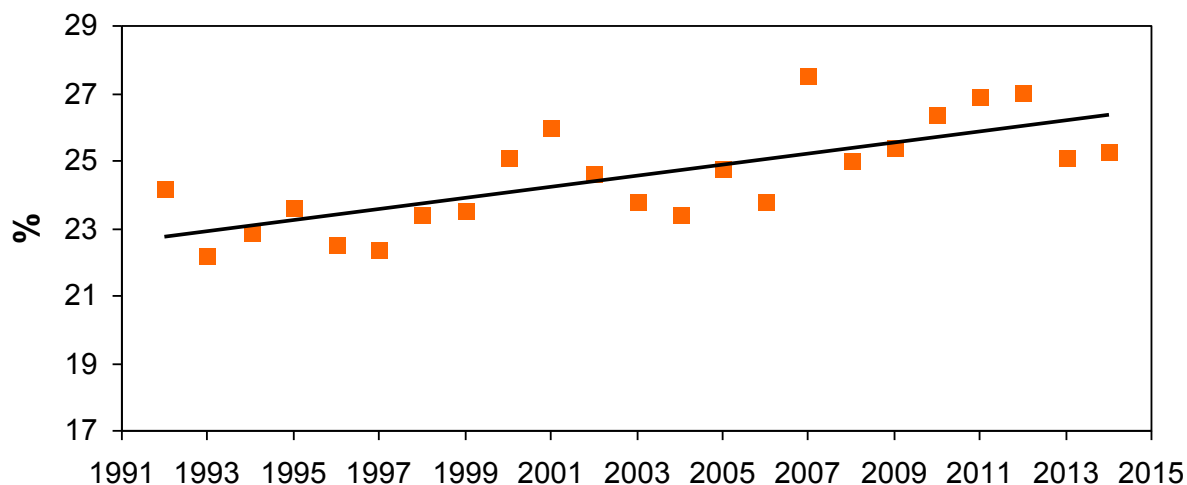


Рисунок 8 - Изменение относительной площади снежниц, осредненной по всему летнему сезону и всей площади арктического ледяного покрова (1992-2014 гг)

Важным свойством морского льда является его сложная поверхностная структура. Это связано и с особенностями ледообразования, и с дрейфом ледяных полей. Каждая поверхностная неоднородность (торосы, разводья, снежницы) играет свою роль как во взаимодействии с приводным слоем атмосферы, так и в термическом и радиационном режиме поверхности. И учет этих морфометрических особенностей важен не только для расчетов, связанных с динамикой и термодинамикой самого льда, но и для климатического моделирования. В данной статье в качестве объекта исследования выбраны снежницы – талые лужи на льду, изменяющие как его альбедо, так и теплофизические свойства. На основании данных наземных измерений исследуются термические, радиационные свойства снежниц, их влияние на энерго- и газообмен ледовой поверхности с атмосферой. Установлено, что снежницы изменяют альбедо

поверхности в несколько раз, над замерзающими снежницами поток тепла меняет знак, а также они служат стоком углекислого газа из атмосферы. Использование результатов спутниковых измерений в микроволновом диапазоне позволило проследить динамику изменчивости относительной площади снежниц за последние десятилетия. Наряду с незначительным трендом видно, что максимумы площади снежниц совпадают с годами, когда наблюдался сентябрьский минимум площади ледяного покрова, то есть подтверждено, что количество снежниц может служить одним из индикаторов дальнейшей изменчивости состояния морского льда.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-05-60184.

## Литература

1. Алексеев Г.В. Исследования изменений климата Арктики в XX столетии // Тр. ААНИИ. 2003. Т. 446. С. 6–21.
2. Alexeev V.A., Jackson C.H. Polar amplification: is atmospheric heat transport important? // *Climate Dynamics*. 2012. V.39. N12. P. 215–239.
3. Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А., Колдунов Н.В., Репина И.А., Смирнов А.В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // *Исследования Земли из космоса*. 2013. № 4. С. 50–65.
4. IPCC 2014. *Climate Change 2014 – Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Geneva: IPCC.
5. 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. V. 114. № C07005.
6. Kwok R., Untersteiner N. The thinning of Arctic sea ice // *Phys. Today*. 2011. V. 41. P. 36–41.
7. Polyakov I.V., Walsh J.E., Kwok R. Recent Changes of Arctic Multiyear Sea Ice Coverage and the Likely Causes // *Bull. Amer. Meteorol. Societ.*, 2012, p.145-151.
8. Stroeve J.C., Markus T., Boisvert L., Miller J., Barrett A. Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41. P. 1216–1225.
9. Макштас А. П., Богородский П. В. К вопросу о формировании снежниц в Арктическом бассейне // *Метеорология и гидрология*. 1996. № 8. С. 72–80.
10. Perovich D.K., Jones K.F., Light B., Eicken H., Markus T., Stroeve J., Lindsay R. Solar partitioning in a changing Arctic sea-ice cover // *Ann. Glaciol.* 2011. V. 52(57). P. 192–196.
11. Tschudi M.A., Maslanik J.A., Perovich D.K. Derivation of melt pond coverage on arctic sea ice using MODIS observation // *Remote Sens. Environ.* 2008. V. 112. P. 2605–2614.
12. Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis // *Global Planet. Change*. 2011. V.77. P. 85–96.
13. Agarwal S., Moon W., Wettlaufer J.S. Decadal to seasonal variability of Arctic sea ice albedo // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38, L20504.
14. Ehn J.K., Mundy C.J., Barber D.G., Hop H., Rossnagel A., Stewart J. Impact of horizontal spreading on light propagation in melt pond covered seasonal sea ice in the Canadian Arctic // *J. Geophys. Res.* 2011. V.116. C00G02.
15. Макштас А.П. Тепловой баланс Арктических льдов в зимний период. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 87 с.

16. Репина И.А., Артамонов А.Ю., Смирнов А.С., Чечин Д.Г. Исследование взаимодействия океана и атмосферы в полярных районах в рамках международного полярного года // Метеорологические и геофизические исследования. Под ред. Г.В. Алексеева. М. - СПб., 2011. С. 236–250.
17. Geilfus N.-X., Galley R. J., Crabeck O., Papakyriakou T., Landy J., Tison J.-L., Rysgaard S. Inorganic carbon dynamics of melt-pond-covered first-year sea ice in the Canadian Arctic // *Biogeosciences*. 2015. V. 12. P. 2047–2061.
18. Liu J., Song M., Horton R.M., Hu Y. Revisiting the potential of melt pond fraction as a predictor for the seasonal Arctic sea ice extent minimum// *Environ. Res. Lett.* 2015. V.10. 054017.
19. Yackel J.J., Barber, D.G. Melt ponds on sea ice in the Canadian Archipelago, 2: on the use of RADARSAT-1 synthetic aperture radar for geophysical inversion // *Journal of Geophysical Research*. 2000. V. 105(C9). P. 22061–22069.
20. Howell S.E.L., Yackel J. J., De Abreu R., Goldsetzer T., Breneman C. On the utility of SeaWinds/QuikSCAT data for the estimation of the thermodynamic state of first-year sea ice // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2005. V.43(6). P. 1338–1350.
21. Rösel A., Kaleschke L. Exceptional melt pond occurrence in the years 2007 and 2011 on the Arctic sea ice revealed from MODIS satellite data // *J. Geophys. Res.* 2012. V.117. C05018.
22. Чернокульский А.В., Климатология облачности в арктических и субарктических широтах по спутниковым и наземным наблюдениям и данным реанализа.// *Солнечно-земная физика*, Изд. Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, 2012.
23. Тихонов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Репина И.А., Комарова Н.Ю. Спутниковая микроволновая радиометрия морского льда полярных регионов. Обзор. // *Исследование Земли из космоса*. V. 2016. № 4. С. 65–84.
24. Cavalieri D.J., Gloersen P., Campbell W.J. Determination of Sea Ice Parameters With the NIMBUS 7 SMMR // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. № D4. P. 5355–5369.
25. Тихонов В.В., Репина И.А., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю. Комплексный алгоритм определения ледовых условий в полярных регионах по данным спутниковой микроволновой радиометрии (VASIA2) // *Исследование Земли из космоса*. 2015. № 2. С. 78-93.
26. Tikhonov V.V., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Ivanov V.V., Boyarskii D.A., Alexeeva T.A., Komarova N.Yu. A physical algorithm to measure sea ice concentration from passive microwave remote sensing data // *Adv. Space Res.* 2015. V. 56. № 8. P. 1578–589.
27. Tikhonov V.V., Boyarskii D.A., Sharkov E.A., Raev M.D., Repina I.A., Ivanov V.V., Alexeeva T.A., Komarova N.Yu. Microwave model of radiation from the multilayer “Ocean–atmosphere” system for remote sensing studies of the Polar Regions // *Progr. in Electromagn. Res.* 2014. V. 59. P. 123–133.

## References

1. Alekseev, G. V. Issledovaniya izmenenij klimata Arktiki v XX stoletii / 2003. Trudy AANII, 446, 6–21.
2. Alexeev V.A., Jackson C.H. Polar amplification: is atmospheric heat transport important? // *Climate Dynamics*. 2012. V.39. N12. P. 215–239.
3. Ivanov V.V., Alexeev V.A., Alekseeva T.A., Koldunov N.V., Repina I.A., Smirnov A.V. Does Arctic ocean ice cover become seasonal? // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2013. V 4. p. 50–65.
4. IPCC 2014. Climate Change 2014 – Synthesis Report. Contribution of Working Groups

- I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Geneva: IPCC.
5. 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. V. 114. № C07005.
  6. Kwok R., Untersteiner N. The thinning of Arctic sea ice // *Phys. Today.* 2011. V. 41. P. 36–41.
  7. Polyakov I.V., Walsh J.E., Kwok R. Recent Changes of Arctic Multiyear Sea Ice Coverage and the Likely Causes // *Bull. Amer. Meteorol. Societ.*, 2012, p.145-151.
  8. Stroeve J.C., Markus T., Boisvert L., Miller J., Barrett A. Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41. P. 1216–1225.
  9. Makshtas A.P., Bogorodskiy P.V. A slush-field formation in the Arctic Basin // *Meteorology and Gydrolgy.* 1996 (8), 72–80. (Russian, English abstract).
  10. Perovich D.K., Jones K.F., Light B., Eicken H., Markus T., Stroeve J., Lindsay R. Solar partitioning in a changing Arctic sea-ice cover // *Ann. Glaciol.* 2011. V. 52(57). P. 192–196.
  11. Tschudi M.A., Maslanik J.A., Perovich D.K. Derivation of melt pond coverage on arctic sea ice using MODIS observation // *Remote Sens. Environ.* 2008. V. 112. P. 2605–2614.
  12. Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis // *Global Planet. Change.* 2011. V.77. P. 85–96.
  13. Agarwal S., Moon W., Wettlaufer J.S. Decadal to seasonal variability of Arctic sea ice albedo // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38, L20504.
  14. Ehn J.K., Mundy C.J., Barber D.G., Hop H., Rossnagel A., Stewart J. Impact of horizontal spreading on light propagation in melt pond covered seasonal sea ice in the Canadian Arctic // *J. Geophys. Res.* 2011. V.116. C00G02.
  15. Makshtas A.P. Teplovoy balans arkticheskikh l'dov v zimniy period [Heat balance of Arctic ice in winter]. 1984. Leningrad, Gidrometeoizdat. USSR. 67p. (In Russian)
  16. Repina I.A., Artamonov A.Yu., Smirnov A.S., Chechin D.G. (2011) Investigation of the oceanatmosphere interaction in polar regions in frames of the International Polar Year. *Meteorological and Geophysical Research.* Ed. by Alekseev G.V., Moscow-St.Petersburg, pp. 236-250. (in Russian).
  17. Geilfus N.-X., Galley R. J., Crabeck O., Papakyriakou T., Landy J., Tison J.-L., Rysgaard S. Inorganic carbon dynamics of melt-pond-covered first-year sea ice in the Canadian Arctic // *Biogeosciences.* 2015. V. 12. P. 2047–2061.
  18. Liu J., Song M., Horton R.M., Hu Y. Revisiting the potential of melt pond fraction as a predictor for the seasonal Arctic sea ice extent minimum// *Environ. Res. Lett.* 2015. V.10. 054017.
  19. Yackel J.J., Barber, D.G. Melt ponds on sea ice in the Canadian Archipelago, 2: on the use of RADARSAT-1 synthetic aperture radar for geophysical inversion // *Journal of Geophysical Research.* 2000. V. 105(C9). P. 22061–22069.
  20. Howell S.E.L., Yackel J. J., De Abreu R., Goldsetzer T., Breneman C. On the utility of SeaWinds/QuikSCAT data for the estimation of the thermodynamic state of first-year sea ice // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2005. V.43(6). P. 1338–1350.
  21. Rösel A., Kaleschke L. Exceptional melt pond occurrence in the years 2007 and 2011 on the Arctic sea ice revealed from MODIS satellite data // *J. Geophys. Res.* 2012. V.117. C05018.
  22. Chernokulsky A.V., Cloudiness climatology in the Arctic and subarctic regions from satellite and surface observations and reanalysis data // *Solnechno-zemnaya physica,* Irkutsk. 2012 (21), 73-78.

23. Tikhonov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarsky D.A., Repina I.A., Komarova N.Yu. Satellite microwave radiometry of sea ice of polar regions: a review // *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 4. p. 65–84.
24. Cavalieri D.J., Gloersen P., Campbell W.J. Determination of Sea Ice Parameters With the NIMBUS 7 SMMR // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. № D4. P. 5355–5369.
25. Tikhonov V.V., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Komarova N.Yu. Kompleksnii algoritm opredeleniya ledovikh uslovii v polyarnikh regionakh po dannim sputnikovoyi mikrovolnovoyi radiometrii (VASIA2) (An integrative algorithm for ice conditions determination in polar regions from satellite microwave radiometry (VASIA2)), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 2, pp. 78–93.
26. Tikhonov V.V., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Ivanov V.V., Boyarskii D.A., Alexeeva T.A., Komarova N.Yu. A physical algorithm to measure sea ice concentration from passive microwave remote sensing data // *Adv. Space Res.* 2015. V. 56. № 8. P. 1578–589.
27. Tikhonov V.V., Boyarskii D.A., Sharkov E.A., Raev M.D., Repina I.A., Ivanov V.V., Alexeeva T.A., Komarova N.Yu. Microwave model of radiation from the multilayer “Ocean–atmosphere” system for remote sensing studies of the Polar Regions // *Progr. in Electromagn. Res.* 2014. V. 59. P. 123–133.