

УДК 551.576.2+551.576.36

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОЛИЧЕСТВА ОБЩЕЙ  
ОБЛАЧНОСТИ В АРКТИКЕ КАК СЛЕДСТВИЕ АТМОСФЕРНОГО ПЕРЕНОСА  
ТЕПЛА И ВЛАГИ**

**SPATIOTEMPORAL VARIABILITY OF TOTAL CLOUD COVER IN THE ARCTIC AS A  
CONSEQUENCE OF ATMOSPHERIC HEAT AND MOISTURE TRANSPORT**

*Другоруб Александр Александрович  
Drugorub Aleksandr Aleksandrovich*

г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет  
Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State University  
alexanderdrugorub@gmail.com

Научный руководитель: к.г.н. Священников Павел Николаевич  
Research advisor: PhD Svyashchennikov Pavel Nikolaevich

**Аннотация:** В данной статье анализируется пространственно-временная изменчивость количества общей облачности в Арктике по данным наземных наблюдений за период с 1985 по 2020 гг. и ее взаимосвязь с атмосферными переносами тепла и влаги в высокоширотную Арктику.

**Abstract:** This article focused on spatiotemporal variability of total cloud cover in the Arctic for the 1985-2020 period based on surface observations and its relationship with the atmospheric heat and moisture transport to the high-latitude Arctic.

**Ключевые слова:** облачность, климат Арктики, изменения климата, водяной пар, атмосферный перенос тепла и влаги

**Key words:** cloud cover, Arctic climate, climate change, water vapour, atmospheric heat and moisture transport

*Введение.* Климатическая система Арктики является чувствительной к внешним воздействиям, связанными с изменениями климата [5]. Предыдущие исследования показали, что повышение приземной температуры воздуха в Арктике в зимний период за последние десятилетия могло произойти не только в результате изменений облачного покрова и содержания водяного пара в атмосфере, но также и в результате усиления атмосферной циркуляции и связанного с ним переносов тепла и влаги [2].

В данной статье анализируется пространственно-временная изменчивость количества общей облачности в Арктике за период с 1985 по 2020 год по данным наземных наблюдений, которая рассматривается как одно из следствий влияния атмосферных переносов тепла и влаги в Арктику. Водяной пар поступает в Арктику путем переноса из более низких умеренных и тропических широт, причем неравномерно по пространству и своей интенсивности [1]. В связи с этим увеличение количества общей облачности в областях высоких положительных трендов общей облачности может свидетельствовать об усилении переносов влаги и тепла в этих областях. Для исследования пространственно-временной изменчивости общей облачности был выбран период с 1985 по 2020 гг. в течение которого наблюдаются значительные тренды повышения температуры воздуха в Арктике [1].

*Методы и данные.* В ходе работы были проанализированы визуальные наблюдения количества общей облачности в Арктике с 1985 по 2020 гг. на 86 метеорологических станциях, 60 из которых расположены за северным полярным кругом, а 31 станция – севернее 70° с.ш. Данные о визуальных наблюдениях количества общей облачности были взяты из баз данных ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», NCEI-NOAA и European Climate Assessment & Dataset.

Для количественного учета облачности и последующего анализа тенденций был выбран метод разбиения случаев количества общей облачности на градации с выборкой повторяемости пасмурного состояния неба (случаев с количеством общей облачности в 9-10 баллов), так как распределение частоты повторяемости общего балла облачности, в отличие от других климатических параметров, является бимодальным  $\beta$ -распределением [3,7]. Был проведен регрессионный анализ всех случаев повторяемости пасмурного состояния неба для каждого месяца в году и по каждой станции были получены уравнения линейных трендов и соответствующие величины тенденций (угловые коэффициенты в уравнениях линейного тренда). Затем при помощи метода Multilevel B-Spline Interpolation в программе SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) была проведена интерполяция полученных значений величин тенденций с их последующим нанесением на карту исследуемого региона в виде

процентных изменений за 10 лет. Для оценки статистической значимости полученных тенденций использовался t-тест Стьюдента и тест Манна-Кендалла. Достаточным порогом статистической значимости обоих тестов считался уровень  $\alpha=0,05$ .

Также был проведен анализ трендов нисходящей длинноволновой и суммарной радиации с использованием осредненных по месяцам данных наземных актинометрических измерений сети Baseline Surface Radiation Network – BSRN на станции Нью-Алесунд с 1992 по 2020 гг. с целью сравнения с изменениями повторяемости пасмурного состояния неба. Сделать вывод о трендах потоков длинноволновой радиации в других районах Арктики пока не представляется возможным по причине того, что станция Нью-Алесунд является единственной станцией в Арктике, располагающей данными о потоках длинноволнового излучения за достаточный для исследования тенденций изменения климата период времени (исключение составляет только станция Барроу на Аляске, которая имеет наблюдения за 1992-2017 гг.). Остальные пункты наблюдений (например, Тикси и Алерт) располагают наблюдениями за достаточно коротким промежутком времени.

*Результаты и обсуждения.* Пространственно-временная изменчивость общей облачности в феврале, мае, августе и октябре в 1985-2020 гг. в Арктике представлена на картах на рисунке 1. По результатам анализа было получено, что с октября по апрель над Северной Атлантикой в районе акваторий Гренландского, Баренцева и Карского моря (от 20° з.д. до 90° в.д), а также в районе акваторий Восточно-Сибирского, Чукотского и моря Бофорта (от 150° в.д. до 150° з.д.) наблюдается увеличение повторяемости пасмурного состояния неба. Это может быть вызвано поступлением более теплого и влажного воздуха из прилегающих районов Атлантического и Тихого океанов по 70° с.ш. через атлантические и тихоокеанские «ворота» для атмосферных притоков явного и скрытого тепла в Арктику высоких широт [2]. Ранее было отмечено о связи высокой частоты повторяемости пасмурного неба в западной и восточной частях побережья Российской Арктики с преобладанием влажных воздушных масс, происходящих из Атлантического и Тихого океанов [4]. Многие другие исследователи находили что максимальные потоки переноса тепла и влаги происходят через атлантические «ворота», например, в статье [6] перенос сосредоточен между 20° з.д. и 10° в.д. через Норвежское море и Скандинавский полуостров.

Повторяемость пасмурного состояния неба в 1985-2020 гг. уменьшалась в течение всего года (за исключением октября и ноября) в районе моря Лаптевых (включая также Новосибирские острова) и на его побережье в сторону континента к югу. Это может быть следствием влияния переноса холодного, с меньшим содержанием водяного пара воздуха из Евразии через 80-150° в.д., где зимой преобладает направление ветра с юга на север [2]. Другой возможной причиной может являться расширение влияния действия Азиатского антициклона на север в зимний период, что вызывает уменьшение повторяемости пасмурного состояния неба в этом районе. Вероятно, именно перенос водяного пара через атлантические «ворота» является определяющим фактором наблюдаемого по результатам данного исследования самого сильного в Арктике увеличения повторяемости пасмурного состояния неба в области Баренцева и Карского моря, наблюдаемого с октября по февраль.

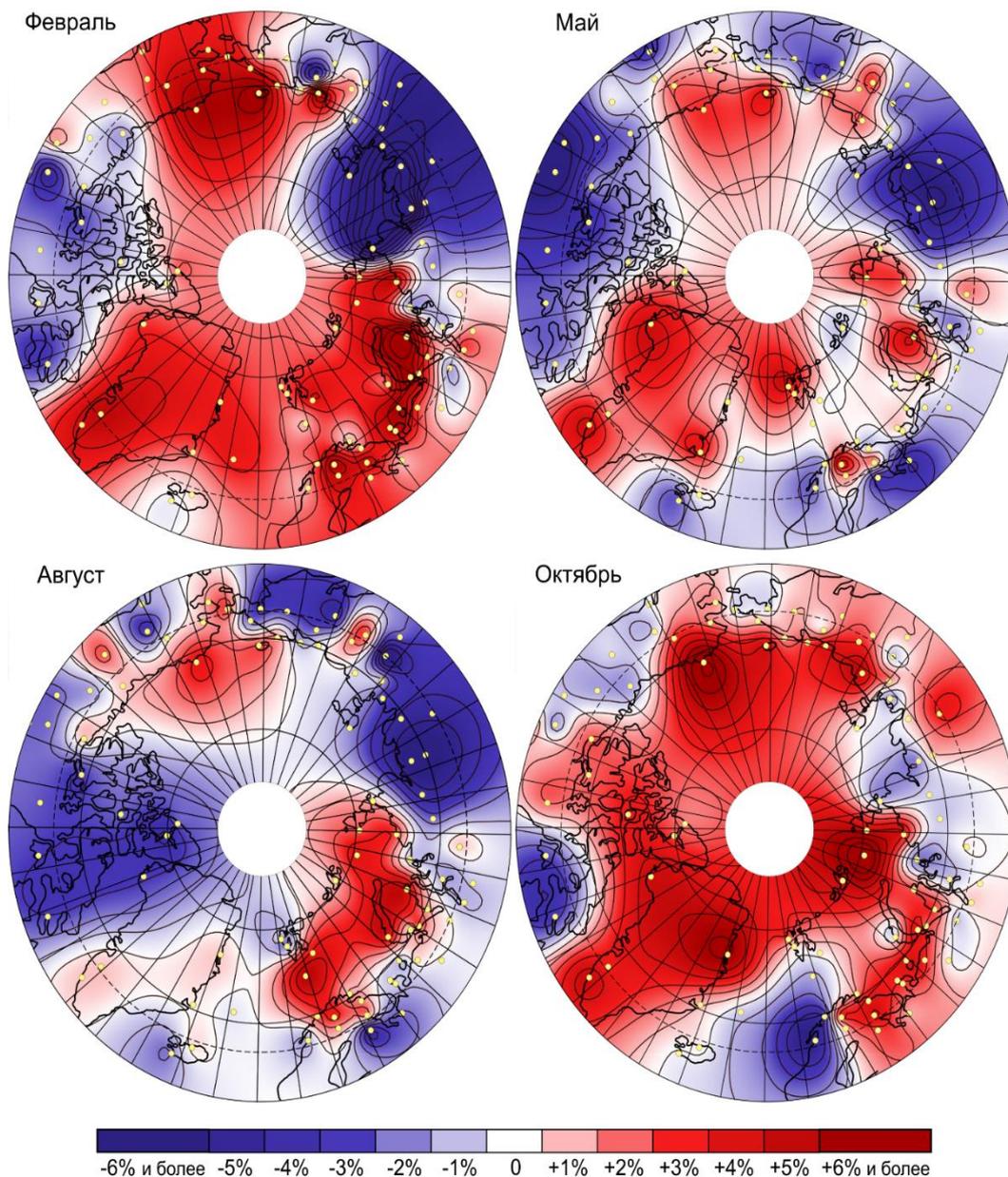


Рисунок 1. Изменение повторяемости пасмурного состояния неба (в % за 10 лет) в феврале, мае, августе и октябре за период с 1985 по 2020 гг., составлено автором

Ранее был отмечен высокий вклад переноса водяного пара в его тренд и изменчивость полного его содержания зимой в области  $70-90^{\circ}$  с.ш. в 1980-2014 гг., а максимумы влияния притока тепла через атлантические «ворота» на зимнюю приповерхностную температуру воздуха в Арктике были отмечены над областями Баренцева и Карского моря [2]. Наблюдаемое за последние три десятилетия увеличение облачности в районе Восточно-Сибирского, Чукотского и море Бофорта в зимний период может также являться следствием переносов тепла и влаги через тихоокеанские «ворота», хотя и с гораздо меньшим влиянием, чем через «атлантические» ворота. В целом в 1985-2020 гг. в течение всего года над всей акваторией Северного Ледовитого океана наблюдается увеличение общей облачности (за исключением моря Лаптевых), что вызвано поступлением более теплого и влажного воздуха из прилегающих районов Атлантического и Тихого океанов через атлантические и тихоокеанские «ворота». Над континентальными частями Арктики в большей степени доминирует процесс уменьшения общей облачности, наибольший эффект достигается на территории Канадского арктического архипелага и азиатской части Российской Арктики.

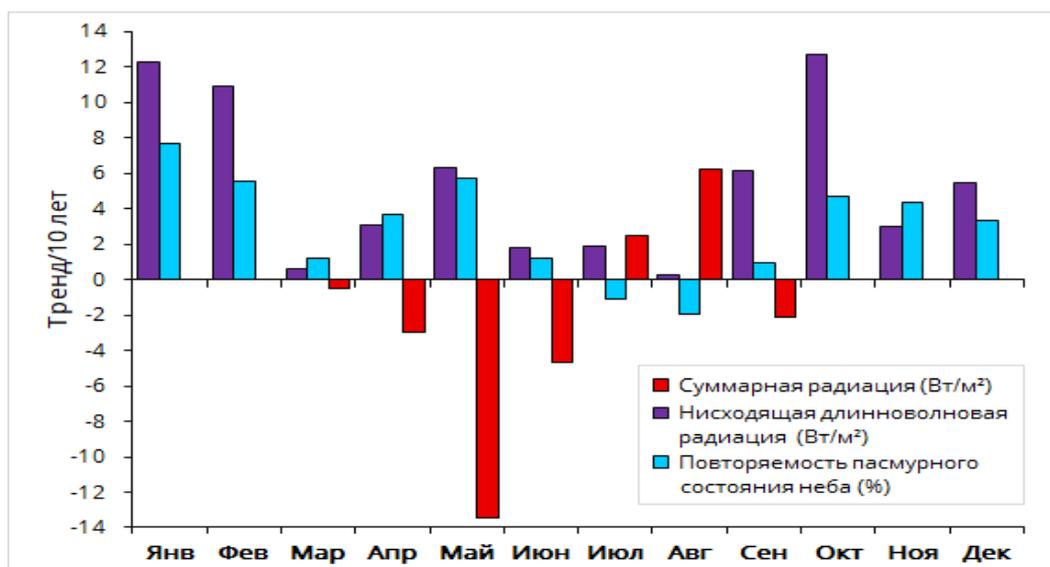


Рисунок 2. Линейные тренды потоков нисходящего длинноволнового излучения, суммарной радиации и повторяемости пасмурного состояния неба на станции Нью-Алесунд в 1992-2020 гг., составлено автором

Тренды потоков нисходящей длинноволновой и суммарной радиации, а также тренды повторяемости пасмурного состояния неба на станции Нью-Алесунд за период с 1992 по 2020 гг. представлены на рисунке 2. Согласно рисунку 2, с октября по февраль на станции Нью-Алесунд наблюдаются значительные положительные тренды потоков нисходящей длинноволновой радиации с декадными трендами в 3-13 Вт/м<sup>2</sup>, что происходит наряду со значительным увеличением повторяемости пасмурного состояния неба с декадным увеличением в 3-8%. В период с апреля по июнь, а также в сентябре в 1992-2020 гг. на станции Нью-Алесунд наблюдается значительное уменьшение потоков суммарной радиации с наибольшим декадным трендом в 13,4 Вт/м<sup>2</sup> в мае. Следует отметить, что данный процесс происходит при положительных трендах повторяемости пасмурного состояния неба с ее максимальным декадным увеличением также в мае на 5,7% за 10 лет. Наоборот, в июле и августе, небольшое уменьшение общей облачности способствует увеличению потоков суммарной радиации.

В целом, с 1992 по 2020 гг. в течение всего года на станции Нью-Алесунд наблюдается увеличение повторяемости пасмурного неба (с максимальным декадным увеличением на 7,7% в январе) которое сопровождается увеличением потоков нисходящей длинноволновой радиации также в течении всего года. В зимний период года (с октября по февраль) наблюдается наибольшее увеличение потоков нисходящей длинноволновой радиации с максимальным декадным трендом 12,7 Вт/м<sup>2</sup> в октябре. С март по сентябрь облачный покров способствует уменьшению потоков суммарной радиации, при этом также вызывая увеличение потоков нисходящей длинноволновой радиации, однако зимой влияние облачного покрова на нисходящие потоки длинноволновой радиации сильнее по причине их небольшой величины относительно летнего периода и в зимний период они являются единственным источником радиации при отсутствии потоков коротковолновой радиации.

*Выводы.* По результатам анализа пространственно-временной изменчивости количества общей облачности в Арктике по данным наземных наблюдений получено, что за период с 1985 по 2020 год с октября по апрель над Северной Атлантикой в районе акваторий Гренландского, Баренцева и Карского моря (от 20° з.д. до 90° в.д), а также в районе акваторий Восточно-Сибирского, Чукотского и моря Бофорта (от 150° в.д. до 150° з.д) наблюдается увеличение повторяемости пасмурного состояния неба, что может быть вызвано поступлением более теплого и влажного воздуха из прилегающих районов Атлантического и

Тихого океанов через атлантические и тихоокеанские «ворота». В районе моря Лаптевых и на его побережье к югу с декабря по март наблюдается уменьшение повторяемости пасмурного состояния неба, что вероятно может являться следствием влияния переноса холодного и сухого воздуха из Евразии через 80-150 в.д.

В результате анализа потоков нисходящей длинноволновой и суммарной радиации на станции Нью-Алесунд было получено, что за период с 1992 по 2020 гг. в течение всего года наблюдается увеличение повторяемости пасмурного неба с максимальным декадным увеличением на 7,7% в январе, которое сопровождается увеличением потоков нисходящей длинноволновой радиации также в течении всего года. В зимний период года (с октября по февраль) наблюдается наибольшее увеличение потоков нисходящей длинноволновой радиации с максимальным декадным трендом 12,7 Вт/м<sup>2</sup> в октябре. С март по сентябрь облачный покров способствует уменьшению потоков суммарной радиации, при этом также вызывая увеличение потоков нисходящей длинноволновой радиации, однако зимой влияние облачного покрова на нисходящие потоки длинноволновой радиации сильнее по причине их небольшой величины относительно летнего периода и в зимний этот период они являются единственным источником радиации при отсутствии потоков коротковолновой радиации.

#### **Список литературы:**

- [1] Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. Т. 1. С. 11-26.
- [2] Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Уразгильдеева А.В., Бобылев Л.П. Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на усиление потепления в Арктике в зимний период // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2016. Т. 1. С. 43-63.
- [3] Васильева Д.А., Священников П.Н. Межгодовая изменчивость облачности и длинноволновой атмосферной радиации в Центральном Арктическом Бассейне // *Вестник СПбГУ. Серия географии и геологии*. 2003. Вып. 4. № 31. С. 143-148.
- [4] Воскресенский А.И., Брызгин Н.Н. О мониторинге облачности Арктики // *Мониторинг климата Арктики*. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 87-96.
- [5] Arctic Climate Impact Assessment (ACIA). Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 1042 p.
- [6] Bengtsson L., Hodges K.I., Koumoutsaris S., Zahn M., Keenlyside N. The changing atmospheric water cycle in Polar Regions in a warmer climate // *Tellus A*. 2011. Vol. 63(5). P. 907-920.
- [7] Makshtas A.P., Andreas E.L., Svyashchennikov P.N. Timachev V.F. Accounting for clouds in sea ice models // *Journal of Atmospheric Research*. 1999. Vol. 52. P. 77-113.