

ИССЛЕДОВАНИЯ СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ, ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕОСФЕР

ISSN 2304-7380

Поступила в редакцию 07.09.2018 г. Принята к печати 25.09.18 г.

УДК 528.7:[551.582.21+551.324.63]+550.38+537.291+551.521.3+551.521.6

### ВОЗМОЖНАЯ СВЯЗЬ ДВИЖЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЮСА И ИЗМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ С КЛИМАТОМ АРКТИКИ. ЧАСТЬ 1

Ю.Е. Беликов, В.А. Буров, С.В. Дышлевский, Н.Г. Котонаева, В.Б. Лапшин, А.Ю. Репин

Выдвинута гипотеза о влиянии ускоренного движения Северного магнитного полюса и уменьшения солнечной активности в последние десятилетия на климат Арктики. Наблюдения изменения ледового покрытия Арктики показывают, что потепление захватывает, в основном, Российскую зону Арктики и акваторию моря Бофорта, области, к которым приближается магнитный полюс. В то же время в арктических областях Канады, от которых магнитный полюс удаляется, этого эффекта не наблюдается или он слабый. Возможный эффект потепления в Российской зоне Арктики и море Бофорта связан с тем, что вместе с движением северного магнитного полюса Земли перемещается зона вторжения галактических космических лучей. Этот процесс совпал с периодом уменьшения солнечной активности, и соответственно, с периодом роста галактического космического излучения. Увеличение галактического космического излучения, приводит к возрастанию количества заряженных частиц на высотах ~4-50 км, при этом максимум ионообразования приходится примерно на высоты ~15-20 км. Образование ионных кластеров способствует образованию аэрозоля и тонких облаков на указанных высотах. Оценки показывают, что в Арктике суммарный баланс энергии, поступающий к поверхности за счет рассеяния солнечного света на образовавшемся аэрозоле и тонких облаках в указанном высотном диапазоне, может быть положительным при специфических условиях рассеяния солнечного света в условиях сумерек и присутствии облачности в нижней тропосфере в течение длительного периода. Увеличение солнечной радиации, проникающей к арктической поверхности, происходит внутри некоторой эффективной зоны в определенных местах, где существуют условия для конденсационного роста ионных кластеров в диапазоне высот ~4-50 км. Эта зона движется вместе с магнитным полюсом и ее горизонтальный размер по нашим оценкам составляет примерно ~2500-3000 км.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АРКТИКА, КЛИМАТ, ДВИЖЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЮСА, ГАЛАКТИЧЕСКОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ ОБРАЗОВАНИЕ ОБЛАКОВ, СУМЕРЕЧНЫЙ ЭФФЕКТ РАССЕЯНИЯ

#### введение

В последние годы наблюдаются значительные погодные аномалии, как на территории России, так и в других регионах мира. Неустойчивая погода, вызванная изменениями климата, наносит серьезный ущерб всем аспектам человеческой жизни. Вклад в эти природные аномалии в значительной степени могут внести климатические изменения в Арктике. Действительно, увеличение температуры в Арктике влияет на всю динамику северного полушария: уменьшение температурного контраста между полярными и средними, а также тропическими широтами приводит к застою

Беликов Юрий Евгеньевич, д.ф.-м.н., с.н.с, зав. лабораторией ФГБУ «Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Фёдорова», т.(499) 181-61-22, e-mail: <u>yury\_belikov@mail.ru</u>

Буров Вячеслав Анатольевич, к.ф.-м.н., с.н.с, зав. отдела ФГБУ «Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Фёдорова», e-mail: globur2000@yahoo.com

Дышлевский Сергей Викторович, с.н.с., ФГБУ «Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Фёдорова», e-mail: sergiodd@mail.ru Котонаева Надежда Геннадиевна, д.ф.-м.н, доцент, зам. зав. отдела ФГБУ «Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Фёдорова», e-mail: kongt@yandex.ru

**Лапшин Владимир Борисович**, д.ф.-м.н, главный научный сотрудник ФГБУ «Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Фёдорова», e-mail: lapshin-vb1@mail.ru

Репин Андрей Юрьевич, д.ф.-м.н, директор ФГБУ «Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Фёдорова», e-mail: repin\_a\_yu@mail.ru

воздушных масс и изменению их обычной траектории движения, что может быть причиной наблюдаемых природных аномалий.

Быстрое таяние ледникового покрытия в Арктике, безусловно, привлекло пристальное внимание научного сообщества. Существует целый ряд климатических моделей, которые предсказывают потепление в Арктике и скорость таяния ледников. В основном это модели, в которых климатические изменения в Арктике основаны на изменении количества углекислого газа CO<sub>2</sub> в атмосфере [Eisenman et al., 2007; Holland and Stroeve, 2011; Holland et al., 2010; Holland et al., 2014; Johannessen et al., 2004]. При этом большинство моделей дают относительно меньшую скорость таяния льда, чем наблюдается в действительности [Катцов и др., 2012; Stroeve et al., 2007]. В ряде работ [Chen et al., 2013; Lovett, 2013] было выдвинуто предположение, что движение полюсов – следствие изменения климата. Однако наш анализ показывает, что связь здесь обратная, а именно: ускоренное движение магнитного полюса и уменьшение солнечной активности на протяжении последних десятилетий влияет на климат Арктики.

Из-за уменьшения солнечной активности в последние десятилетия и, как следствие, увеличения галактического космического излучения возрастает количество заряженных частиц и ионных кластеров на высотах ~ 4–50 км, что способствует образованию аэрозолей и облаков на указанных высотах в Арктике [Лапшин и др., 2002; Belikov and Nikolayshvili, 2016; Svensmark and Friis-Christensen, 1997; Marsh and Svensmark, 2000a; Marsh and Svensmark, 2000b]. Вместе с полюсом движется и область наиболее вероятного образования аэрозоля и облаков на рассматриваемых высотах. Когда Солнце находится ниже горизонта, рассеяние света на аэрозоле и тонких облаках в направлении неосвещенной поверхности может увеличивать приток энергии, поступающий к поверхности Земли во всем спектральном диапазоне – от УФ до ближней ИК областях спектра. Когда Солнце поднимается выше горизонта, аэрозольные и облачные слои в условиях отсутствия нижней облачности ослабляют солнечный свет в видимой области. В то же время в сумеречных условиях может увеличиваться его поступление к поверхности в определенной части УФ области спектра, а также в ближней ИК области спектра в полосах поглощения. В условиях низкой облачности в тропосфере возможно увеличение притока энергии к поверхности в видимой области спектра, а также вне сильных полос поглощения в УФ и ближней ИК областях спектра.

Эффект увеличения притока солнечной энергии к поверхности при появлении рассеивающих слоев над поглощающей атмосферой исследовался в целом ряде работ и получил название сумеречного эффекта [Davies, 1993; Tsitas and Yung, 1996; Ogigina et al., 1996; Belikov, 2000]. Однако этот эффект анализировался только применительно к УФ области спектра в полосах поглощения озона [Tsitas and Yung, 1996; Ogigina et al., 1996; Belikov, 2000]. Наши оценки показывают, что аналогичный эффект существует в полосах поглощения в ближней ИК области спектра. Важным является то, что в условиях облачности в нижней тропосфере, которая наблюдается значительную часть времени в течение года в Арктике [Schweiger et al., 1999; Wang et al., 2003] сумеречный эффект начинает работать в УФ и ИК областях спектра в условиях отсутствия или малого поглощения, а также в видимой области спектра. Этот новый эффект, который впервые предложен нами в работе [Беликов и др. 2017], обобщает сумеречный эффект для случая двух рассевающих слоев с различными индикатрисами рассеяния и находящихся на разных высотных уровнях.

Таким образом, присутствие аэрозоля и тонкой облачности на высотах ~4–50 км может при определенных условиях, характерных для Арктики, увеличить поступление солнечной энергии к арктической поверхности. В данной работе сделаны только предварительные оценки рассматриваемого эффекта, которые послужат основой для дальнейшего уточнения и численных оценок влияния движения магнитного полюса на климат Арктики.

Увеличение солнечной радиации, проникающей к арктической поверхности, происходит внутри некоторой эффективной зоны и только в определенных местах внутри этой зоны, где существуют условия для конденсационного роста ионных кластеров, образующихся в результате ионизации атмосферы космическими лучами. Эта зона, внутри которой существует повышенная вероятность образования аэрозоля и тонких облаков на высотах ~4–50 км, движется вместе с магнитным полюсом, и ее горизонтальный размер, по нашим оценкам, составляет примерно ~2500–3000 км. Изменение климата Арктики, по нашему мнению, может быть связано не только с увеличением количества углекислого газа в атмосфере, но и с движением магнитного полюса, а также уменьшением солнечной активности в последние годы. Результатом этих процессов и являются наблюдаемые особенности изменения ледового покрова Арктики в последние десятилетия.

Работа представлена в трех частях.

Первая часть посвящена изложению принципов влияния движения магнитного полюса и изменения солнечной активности на климат Арктики на основе данных наблюдений и модельных оценок. При этом будут даны оценки пространственно-временных параметров зоны вторжения заряженных частиц, а также показана связь этой зоны вторжения с образованием аэрозольных и облачных слоев, конкретизированы высоты и виды рассеивающих слоев, которые могут влиять на увеличение потока излучения, проникающего к поверхности арктической зоны в УФ и ближней ИК областях спектра, а также климат арктической зоны.

Во второй части работы рассмотрены особенности проявления сумеречного эффекта увеличения солнечного потока, поступающего к поверхности, в полосах поглощения в УФ и ближней ИК областях спектра при образовании облачных и аэрозольных слоев в высотном диапазоне ~4-50 км. Оценки этого эффекта будут сделаны на основе модели, основанной на решения уравнения переноса излучения.

В последней, третьей части статьи, рассмотрен наиболее важный вопрос о переносе излучения в видимой области спектра и вне сильных полос поглощения в УФ и ближней ИК областях спектра в условиях сумерек. При этом основное внимание будет уделено особенностям переноса излучения при наличии облачности в нижней тропосфере. В этих условиях появление аэрозоля и тонких облаков на высотах ~4-50 км может увеличить приток солнечной энергии к арктической поверхности в рассматриваемых областях спектра. Поэтому полный радиационный баланс и приток солнечной энергии к поверхности существенным образом зависят от количества облачных дней в Арктике. Эти вопросы также будут обсуждаться в последней, третьей части статьи.

# 1. ИЗМЕНЕНИЕ ЛЕДОВОГО ПОКРЫТИЯ АРКТИКИ И ЕГО СВЯЗЬ С ДВИЖЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЮСА ЗЕМЛИ

В последние десятилетия происходит беспрецедентное по геологическим масштабам событие, которое может являться одной из причин таяния ледников и изменения климата на нашей планете. Это быстрое, ускоренное движение магнитного полюса от берегов Канады к Северному географическому полюсу. На рисунке 1 сопоставляется изменение ледового покрытия Арктики для сентября 1984г. и сентября 2016 г. (https://meteo59.ru/articles/002-led-arktiki.php). Кроме того, на рис. 2 показано положение Северного магнитного полюса с начала прошлого века по 2020 г. согласно модели International Reference Geomagnetic Field (IRGF, http://deeptow.whoi.edu/northpole.html).

Результаты анализа данных, представленных на рис. 1, показывают, что потепление, которое сопровождается усиленным таянием ледового покрова, захватывает, в основном, Российскую зону Арктики и акваторию моря Бофорта. В то же время в арктических областях Канады, от которой магнитный полюс удаляется, этого эффекта не наблюдается или он слабый. При этом у берегов Канады сохраняется значительная доля многолетнего льда по сравнению с Российской зоной Арктики и акваторией моря Бофорта.

Как видно из рис. 2, магнитный полюс, начиная примерно с 1980 г., ускоренным темпом двигался от берегов Канады как раз в сторону Российской зоны Арктики, приближаясь и к акватории моря Бофорта. Координаты магнитного полюса согласно модели IGRF в 1984 году составляли – 77.3° с.ш., 257.6° з.д., а в 2016 – 86.4° с.ш., 193.7° з.д. В настоящее время магнитный полюс находится недалеко от Северного географического полюса. Именно это движение, по нашему мнению, и является одной из основных причин изменения наблюдаемого изменения ледового покрытия Арктики и изменения ее климата. Ниже рассматривается возможный механизм влияния движения северного полюса на климат Арктики.

#### 2. СВЯЗЬ ДВИЖЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЮСА С ОБРАЗОВАНИЕМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ОБЛАЧНЫХ СЛОЁВ В ПОЛЯРНОЙ АТМОСФЕРЕ ПРИ УМЕНЬШАЮЩЕЙСЯ СЛОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Согласно нашей гипотезе связь между таянием ледников и движением магнитного полюса может быть следующая. Вместе со смещением магнитного полюса смещается зона вторжения космических лучей. Космические лучи являются источником ионизации в основном стратосферы и верхней тропосферы, и при движении магнитного полюса увеличивается ионизация областей атмосферы над одними географическими районами и убывает над другими. При этом смещается и зона наиболее вероятного образования аэрозоля и облачности в стратосфере и верхней тропосфере.

Именно эти рассеивающие слои, по нашему мнению, и играют ключевую роль в климатических изменениях в Арктике. Особенности рассеяния солнечного света на этих образованиях в условиях Арктики при уменьшающейся солнечной активности будут подробно рассмотрены.



Рис. 1. Изменение ледового покрытия Арктики. Показано ледовое покрытие Арктики в сентябре 1984 г. (вверху) и сентябре 2016 г. (внизу) по данным НАСА (https://meteo59.ru/articles/002-led-arktiki.php), на рисунках также отмечен возраст льда различными оттенками от серого до белого цветов по мере увеличения возраста.

4



Рис. 2. На карте Арктики показано положение северного магнитного полюса Земли в различные годы последнего столетия согласно модели IGRF (http://deeptow.whoi.edu/northpole.html).

Фокусировка заряженных частиц магнитным полем Земли создает некоторую эффективную зону вторжения заряженных частиц вокруг магнитного полюса, где их концентрация увеличена. На рисунке За приведены контуры линий жесткости обрезания энергии протонов на высоте 100 км при нулевой геомагнитной активности (Kp=0) для 2001 г. [Rodger et al., 2006]. Контуры линий показывают энергию обрезания протонов в единицах МэВ. Согласно [Rodger et al., 2006] при увеличении геомагнитной активности контуры линий раздвигаются по направлению к экватору. Это означает, что при уменьшении солнечной активности, наблюдаемой в последние десятилетия, контуры линий жесткости обрезания энергии протонов стремятся к их значениям, соответствующим небольшой геомагнитной активности. Поэтому для оценки зоны вторжения космических лучей в атмосферу Арктики и ее движения вместе с магнитным полюсом мы будем использовать данные, соответствующие  $K_p=0$ . Отметим, что контуры линий жесткости обрезания, показанные на рис. За, для высот меньших 100 км вплоть до уровня Земли будут оставаться практически неизменными из-за очень небольших изменений магнитного поля на рассматриваемых высотах.

На рисунках 3b–3d приведены контуры линий жесткости обрезания при энергиях протонов, соответственно, 0.001 МэВ, 10 МэВ и 100 МэВ для эпох 1984 и 2018 гг. При этом за основу взяты контуры линий 2001 г. для соответствующих энергий (рис. 3a), которые были построены в соответствии с положением северного магнитного полюса в 1984 г. и 2018 г. (рис. 2).

Анализ показывает, что область Арктики, ограниченная контурами линий, соответствующих жесткости обрезания 100 МэВ, гораздо шире и для 1984 г. лежит гораздо ближе к материковой части Арктики в направлении движения полюса, чем для 10 МэВ и 0.001 МэВ. В то же время область, ограниченная контурами линий, соответствующих жесткости обрезания 500 МэВ, выходит далеко в средние широты и лежит в материковой части Арктики и прилегающих к ней географических областях при любых положениях магнитного полюса с 1984 по 2018 гг. Таким образом, влияние на изменение таяния льдов в Российской зоне Арктики и частично в море Бофорта могут оказать, в основном, перемещения зон, ограниченных контурами линий, соответствующих энергиям, меньшим ~ 100 МэВ (рис.3). Однако здесь необходимо уточнить нижнюю границу указанного диапазона энергий.



Рис. 3. Показаны графические контуры линий жесткости обрезания энергии протонов на 100 км в северном полушарии в 2001 г. для K<sub>p</sub>=0 согласно [Rodger et al., 2006]. Контуры линий указаны в МэВ (a). Показаны перемещения областей, ограниченных контурами жесткости обрезания энергии протонов соответственно 0.001 МэВ (b), 10 МэВ (c), 100 МэВ (d). Синим цветом ограничены области, соответствующие положению магнитного полюса в 1984 г. Красным цветом обозначены положения рассматриваемых областей в 2016 г. Серым цветом отмечены изменения площадей рассматриваемых областей при перемещении магнитного полюса от его положения в 1984 г. до положения 2016 г. (*см. текст*).

Рассмотрим, какой глубине проникновения заряженных частиц соответствует рассматриваемый диапазон энергий ~ 0.001–100 МэВ. На рисунке 4 приведены оценки глубины проникновения галактического космического излучения в расчете на одну частицу с различными энергиями, создающую каскад моноэнергетических электронов согласно [Vasilyev et al., 2007]. Как видно из этого рисунка, при увеличении энергии частицы в пределах ~10 кэВ–100 МэВ увеличивается глубина проникновения ионизирующей радиации. В то же время, согласно расчетам, при энергии частицы больше примерно ~450 МэВ ионизирующая радиация достигает поверхности Земли.

На рисунке За показано, что контур линии 500 МэВ достаточно далеко заходит в средние широты и, передвижение этого контура вместе с полюсом не сказывается на формировании аэрозольных и облачных слоев в Российской зоне Арктики и море Бофорта, где наблюдается усиленное таяние ледового покрытия. Если учесть, что уровень энергии частиц в 500 МэВ достаточен для проникновения ионизирующей радиации к поверхности Земли, то частицы с этой энергией способствуют образованию облачности, включая нижнюю тропосферную облачность.



Рис. 4. Энергетический вклад в образование ионных пар в слое 1 км изотропного моноэнергетического электронного потока, нормированного на одну падающую частицу согласно [Vasilyev et al., 2007].

Анализ рис. 4 показывает, что частицы с энергией 100 кэВ–100 МэВ способствуют созданию ионов на высотах ~5–100 км. В то же время основной вклад в сумеречный эффект, по нашим оценкам, могут вносить аэрозольные и облачные слои в верхней тропосфере и стратосфере в высотном диапазоне ~4–50 км, который отличается от указанного высотного диапазона образования ионов. Это обусловлено слишком малой плотностью воздуха в мезосфере и термосфере, чтобы удержать достаточно крупные частицы для создания сумеречного эффекта. Кроме того, аэрозольные и облачные слои формируются в определенных условиях на основе ионных кластеров, высотное распределение которых сдвинуто вниз по направлению к земной поверхности по сравнению с распределением ионов, учитывая экспоненциальный рост к поверхности Земли молекул воды и молекул с высокими дипольными моментами, такими, как  $H_2SO_4$  и др.

Таким образом, влияние на изменение таяния льдов в Российской зоне Арктики и частично в море Бофорта могут оказать только перемещения зон, ограниченных контурами линий, соответствующих энергиям ~ 1–100 МэВ (рис. 3 и рис. 4).

Примерный размер зоны, соответствующей жесткости обрезания 10 МэВ, составляет ~2500– 3000 км. Будем считать его размером некоторой эффективной зоны, положение которой связано с положением магнитного полюса. Внутри этой зоны и происходят основные климатические изменения в арктической зоне.

Отметим также важный эффект, связанный с перемещением магнитного полюса. На рисунках 3b–3d серым цветом отмечены изменения площади зоны вторжения частиц ограниченных контурами линий жесткости обрезания для указанных энергий при перемещении полюса с 1984 по 2018 г. Фактическим результатом такого изменения являются уменьшение рассматриваемых площадей с дальней от полюса стороны и прирост соответствующих площадей с ближней от полюса стороны. В то же время влияние сумеречного эффекта, который будет рассмотрен далее, растет с увеличением зенитного угла Солнца [Davies, 1993]. Учитывая, что средние зенитные углы Солнца увеличиваются внутри рассматриваемой эффективной зоны при наблюдаемом перемещении магнитного полюса, влияние рассеивающих слоев на поступление рассеянных потоков к арктической поверхности также усиливается.

Проведенный анализ и выводы о связи движения полюса с движением зоны вторжения заряженных частиц, прежде всего, на больших высотах подтверждаются особенностями высотного хода ионизации в зависимости от геомагнитной широты.



Рис. 5. Вариации вертикального профиля скорости образования ионов на различных геомагнитных широтах [Neher, 1967].

На рисунке 5 приведены вариации высотного профиля ионизации атмосферы с геомагнитной широтой в минимуме солнечной активности, построенные на основании данных, приводимых в работе [Neher, 1967]. Анализ кривых на рис. 5 показывает, что с увеличением геомагнитной широты возрастает ионизация атмосферы на высотах, больших ~7–10 км, тогда как ионизация нижних слоев атмосферы уменьшается.

Не менее важным представляется роль солнечной активности в формировании высотного профиля зоны вторжения заряженных частиц. На рисунке 6 приведены результаты модельных расчетов высотного распределения ионизации атмосферы на различных широтах при высокой (сплошные линии) и низкой (пунктирные линии) солнечной активности согласно работе [Calisto et al., 2011]. Красными линиями на рис. 6 показаны результаты расчетов по модели [Usoskin et al., 2010], синими линиями представлены расчеты по модели [Heaps,1978].



Рис. 6. Высотные профили скорости ионизации для нескольких геомагнитных широт согласно [Calisto et al., 2011], красные линии – расчеты по модели [Usoskin et al., 2010], синие линии по модели [Heaps, 1978]. Сплошные линии соответствуют высокой солнечной активности, пунктир – низкой солнечной активности.

© Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова

Как видно из рис. 6, при высокой солнечной активности наблюдается очень незначительный широтный ход ионизации от 50 до 90 градусов северной геомагнитной широты. В то же время при низкой солнечной активности разница в высотном ходе ионизации для 50 и 90 градуса с. ш. значительна, но проявляется она, в основном, для высот, больших примерно ~7–10 км. Фактически это означает, что во время высокой солнечной активности контуры линий жесткости обрезания даже для небольших энергий протонов ограничены примерно 50 градусом с. ш., в то же время при низкой солнечной активности эти контуры сжимаются, ограничивая более высокие широты. Этот эффект, связанной с солнечной активностью, как отмечалось выше, подтверждается расчетами (рис. 3а, [Rodger et al., 2006]).

Таким образом, уменьшение солнечной активности на протяжении последних десятилетий привело согласно нашей гипотезе к потеплению арктической зоны в целом, в то же время сдвиг магнитного полюса за это время привел к региональным отличиям в изменении климата в Арктике. Механизмом такого потепления является изменение вероятности формирования аэрозолей и облачных слоев на высотах ~4–50 км на основе ионных кластеров в различных регионах Арктики при движении магнитного полюса и изменении солнечной активности.

Сумеречный эффект рассеяния на аэрозольных и облачных образованиях в указанном высотном диапазоне создает положительный радиационный баланс и увеличивает в среднем поступление солнечной энергии к арктической поверхности. Важным условием при этом является присутствие облачности в нижней тропосфере в течение достаточно продолжительного времени в течение года Арктике.

Далее рассмотрим некоторые характеристики и высотное положение аэрозольных и облачных образований, которые, согласно нашей гипотезе, могут влиять на увеличение притока солнечной энергии к поверхности и соответственно на климат арктической зоны.

#### 3. ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ АЭРОЗОЛЯ И ОБЛАКОВ В ВЫСОТНОМ ДИАПАЗОНЕ ~4–50 КМ С УЧАСТИЕМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

В полярной стратосфере и нижней тропосфере, в отличие от тропиков и средних широт, существуют условия для эффективного образования аэрозоля и облачных слоев. Особенно это относится к зимне-весенним условиям при низких температурах в полярной стратосфере и верхней тропосфере.

На рисунке 7а приведены результаты аэростатных измерений концентраций аэрозоля над Кируной (Швеция) весной 1989 г. [Hofmann, et al., 1989, Hofmann, 1990]. Как видно из этого рисунка, внутри полярного вихря, который захватывает Кируну, образуется аэрозоль на высотах ~7–23 км. Согласно [Belikov and Nikolayshvili, 2016] непосредственное участие в образовании этих аэрозольных слоев принимают ядра конденсации, представляющие собой ионные кластеры. Эти кластеры накапливаются на границах аэрозольных и облачных слоев в результате работы глобальной электрической цепи [Беликов и Николайшвили, 2015; Belikov and Nikolayshvili, 2016]. На рисунке 7b показаны распределения ядер конденсации [Hofmann, 1990]. Особенностью этого распределения являются следующие процессы. Во-первых, это накопление положительно заряженных частиц, в том числе ядер конденсации, над верхним слоем аэрозолей. Во-вторых, это уменьшение концентрации ядер конденсации и образования на их основе аэрозольных частиц и частиц полярных стратосферных облаков. Кроме того, наблюдается также накопление заряженных частиц противоположного знака на нижней границе аэрозольных и облачных и облачных слоев. Более подробно эти процессы и работа глобальной электрической цепи рассмотрены в статьях [Беликов и Николайшвили, 2015; Belikov and Nikolayshvili, 2016].

Таким образом, ионные кластеры участвуют в образовании аэрозоля в стратосфере и нижней тропосфере. Увеличение числа ионов при низкой солнечной активности увеличивает вероятность образования облаков и аэрозоля в рассматриваемой области.

Этот вывод подтверждается спутниковыми измерениями оптической толщины стратосферного аэрозоля. На рисунке 8 приводятся спутниковые данные измерений оптической толщины стратосферного аэрозоля, полученные в период 2002-2012 гг. для длин волн 555 нм, 750 нм и 755 нм по данным спутников OSIRIS, SAGEII и SAGE III для Арктики (75-85 с.ш.) [Glantz et al., 2014].



Рис. 7. Аэростатные измерения в полярной стратосфере. Вертикальные высотные профили аэрозольной концентрации (см<sup>-3</sup>) (а) и над Кируной 23 января 1989 г. [Ноfmann, et al., 1989]; концентрации ядер конденсации над Кируной 30 января 1989 г. (сплошная линия, b) и концентрация ядер конденсации в Антарктике на 78° ю.ш.: ••••• – 27 августа, 1988; ••••• – 6 сентября 1988; ----- 14 сентября 1988 [Hofmann, 1990].

Результаты анализа этого рисунка показывает, что в отдельные годы существенный вклад в содержание стратосферного аэрозоля дают выбросы вулканов. В целом содержание аэрозоля в стратосфере, если исключить влияние вулканов в стратосфере, хорошо коррелирует с интенсивностью космических лучей в стратосфере [Glantz et al., 2014] или антикоррелирует с солнечной активностью, минимум которой приходится примерно на 2009 г. Этот факт подтверждает сделанные выше выводы о влиянии солнечной активности на образование аэрозоля.



Рис. 8. Изменения оптической толщины стратосферного аэрозоля по данным спутников OSIRIS, SAGEII и SAGE III на длинах волн 755, 750 и 555 нм в период 2002–2011 гг. в Арктике (75-85 с. ш.) согласно [Glantz et al., 2014]. Серым цветом выделены периоды, связанные с влиянием извержений вулканов Касаточи, Сарычев и Набро на содержание аэрозоля в стратосфере.

На рисунке 9 приведены средние значения аэрозольной оптической толщины в средней и верхней тропосфере Арктики по спутниковым данным (SAGE II и SAGE III эксперименты) в летний и весенний период в1984–2005 гг. согласно [Treffeisen, 2006].



Рис. 9. Средний аэрозольный коэффициент экстинкции в средней и верхней тропосфере в Арктике по спутниковым данным SAGE II и SAGE III для двух длин волн 1.02 мкм и 0.52 мкм в летний (июнь, июль, август, сентябрь) и весенний (март, апрель, май) периоды [Treffeisen, 2006].



Рис. 10. Распределение частоты наблюдения высоты верхней границы перистых облаков по спутниковым данным согласно [Кох, 2014]

В значительной мере образование этого аэрозоля также происходит при участии заряженных частиц, как было отмечено выше.

При участии заряженных частиц могут образовываться не только аэрозольные слои, но и облака [Marsh and Svensmark, 2000a; Marsh and Svensmark, 2000b]. Рассмотрим, какие виды облачности верхнего яруса присутствуют в полярной зоне. Наиболее высокие – это полярные стратосферные облака (ПСО). Исследованию ПСО посвящен целый ряд работ, их оптические и другие характеристики можно найти, например, в специальном выпуске журнала Geophysical Research Letters (GRL 1990, Supplement, V.17, No.4), посвященном самолетным исследованиям арктической стратосферы (экспедиция AASE) в 1989 г. [Turco et al., 1990]

В тропосфере наиболее высокими являются перистые облака, и их роль в климатическом эффекте в Арктике необходимо учитывать. На рисунке 10 приведено широтное распределение

верхней границы перистых облаков согласно [Кох, 2014]. Как видно из этого рисунка в полярных областях верхняя граница появления перистых облаков уменьшается по сравнению с другими широтами и составляет ~5–14 км. Оптическая толщина перистых облаков невелика и составляет в среднем 0.1–0.15, однако в отдельные моменты времени может достигать значений 0.5–2.5 [Кох, 2014].

Таким образом, мы рассмотрели основные рассевающие слои в верхней тропосфере и стратосфере, в образовании которых могут участвовать заряженные частицы и которые могут, по нашему мнению, влиять на климат Арктики. Это стратосферный аэрозоль, аэрозоль в верхней и средней тропосфере, а также облачные системы – полярные стратосферные и перистые облака.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает, что изменения ледового покрытия Арктики с 1984 по 2016 гг. могут быть связаны с движением магнитного полюса, а также с уменьшением солнечной активности в рассматриваемый период. При этом уменьшение солнечной активности на протяжении последних десятилетий привело, согласно нашей гипотезе, привело к потеплению арктической зоны в целом, в то время, как сдвиг магнитного полюса за это же время привел к региональным отличиям в изменении климата в Арктике. Особенности изменение ледового покрытия - значительное уменьшение количества льда в Российской зоне Арктики и море Бофорта и небольшие изменения в арктических областях Канады – связаны с изменением положения зоны вторжения заряженных частиц. Как показал анализ, основное влияние на изменение ледового покрытия оказывает область, ограниченная контурами линий жесткости обрезания ~1-100 МэВ. Размер этой области составляет ~2500-3000 км, и она движется вместе с магнитным полюсом от берегов Канады в сторону Российской зоны Арктики. Основной климатический эффект создают аэрозольные и облачные слои на высотах ~4-50 км, образованию которых способствуют заряженные частицы, создаваемые в полярной атмосфере галактическими космическими лучами. Анализ показал, что основными рассевающими слоями, в образовании которых могут участвовать заряженные частицы в рассматриваемом высотном диапазоне, являются стратосферный аэрозоль, аэрозоль в верхней и средней тропосфере, а также облачные системы – это полярные стратосферные и перистые облака.

В следующих двух частях статьи мы рассмотрим сумеречный эффект рассеяния и его влияние на перенос солнечного излучения к арктической поверхности в различных областях спектра от УФ до ближней ИК.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант №18-05-00812-а.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Беликов Ю.Е., Николайшвили С.Ш. Озоновые дыры: новый взгляд // Земля и Вселенная, 2015, 2, с. 27-39.
- Беликов Ю.Е., Буров В.А., Котонаева Н.Г., Лапшин В.Б. Сумеречный эффект влияния тонких высоких облаков и аэрозольных слоев на прозрачность атмосферы и климат. Международный симпозиум "Атмосферная радиация и динамика" (МСАРД – 2017) 27-30 июня 2017 г. С. Петербург – Петродворец, тезисы доклада, с.175-177, http://www.rrc.phys.spbu.ru/msard17/thesis.pdf
- Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика №2 (6), 2012
- Лапшин В.Б., Яблоков М.Ю., Палей А.А., 2002. Давление пара над заряженной каплей // Журнал физ. химии, т.76, №10, с.1901-1903.
- Belikov Yu.E., Nikolayshvili S.Sh. The Role of the Dipole Interaction of Molecules with Charged Particles in the Polar Stratosphere // Journal of Earth Science and Engineering, 2016, 6, 115-149, doi: 10.17265/2159-581X/2016.03.001. http://davidpublisher.org/index.php/Home/Article/index?id=26172.html
- Belikov Yu.E. Dependence of Solar Radiation in the Polar Stratosphere on the Distribution of Ozone and Stratospheric Aerosol // J. Physics and Chemistry of the Earth, part B, 2000, v.25, No. 5-6, 423-426.

- Calisto M., Usoskin I., E. Rozanov, Peter T. Influence of Galactic Cosmic Rays on atmospheric composition and dynamics // Atmos. Chem. Phys., 2011, 11, 4547–4556. www.atmos-chem-phys.net/11/4547/2011/ doi:10.5194/acp-11-4547-2011
- Chen, J. L., Wilson, C. R., Ries, J. C Tapley, B. D. Rapid ice melting drives Earth's pole to the east// Geophysical Research Letters, 7 June 2013, doi: 10.1002/grl.50552, http://dx.doi.org/10.1002/grl.50552
- Davies, R. Increased transmission of ultraviolet radiation to the surface due to stratospheric scattering // J. Geophys. Res., 1993, vol.98, No. D4, 7251–7253.
- Eisenman I., Untersteiner N., Wettlaufer J.S. On the reliability of simulated Arctic sea ice in Global Climate Models // Geophysical Research Letters, 2007, 34 (10): L10501. doi:10.1029/2007GL029914.
- Glantz P., Bourassa A, Herber A., Iversen T., Karlsson J., Kirkevag A., Maturilli M., Seland O., Stebel K., Struthers H., Tesche M., Larry Thomason L. Remote sensing of aerosols in the Arctic for an evaluation of global climate model simulations // J. Geophys. Res. Atmos., 2014 Jul 16; 119 (13), 8169–8188. http://dx.doi.org/10.1002/2013JD021279
- Heaps, M. G.: Parametrization of the cosmic ray ion-pair production rate above 18 km // Planet. Space Sci., 1978, 26, 513–517.
- Hofmann, D. J., Deshler T. L., Aimedieu P., Matthews W. A., Johnston P. V., Kondo Y., Sheldon W. R., Byrne G. J., Benbrook J. R. Stratospheric Clouds and Ozone Depletion in the Arctic during January 1989 // Nature, July 13, 1989, v. 340, 117–121.
- Hofmann, D. J. Measurement of the Concentration Nuclei Profile to 31 km in the Arctic in January and Comparison with Antarctic Measurements // Geophys. Res. Lett., 1990, 17 (4), 357–360.
- Holland M. M., Stroeve J. Changing seasonal sea ice predictor relationships in a changing Arctic climate // Geophys. Res. Lett., 2011, 38, L18501, https://doi.org/10.1029/2011GL049303.
- Holland M. M., Serreze M.C., Stroeve J. The sea ice mass budget of the Arctic and its future change as simulated by coupled climate models // Clim. Dynam., 2010, 34, No. 2-3, 185-200, https://doi.org/10.1007/s00382-008-0493-4.
- Holland, P. R., Bruneau N., Enright C., Losch M., Kurtz N. T., Kwok, R. Modeled Trends in Antarctic Sea Ice Thickness // J. Climate, 2014, 27, 3784-3801, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00301.1.
- Johannessen O.M, Bengtsson L, Miles M.W., Kuzmina S.I., Semenov V.A., Nagurnyi A.P., Zakharov V.F., Bobylev L.P., Petterson L.H., Hasselman K., Cattle H.P. Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea ice // Tellus A, 2004, 56(5), 559-560, https://doi/10.1111/j.1600-0870.2004.00092.x
- Kox S., Bugliaro L., Ostler A. Retrieval of cirrus cloud optical thickness and top altitude from geostationary remote sensing // Atmos. Meas. Tech., 2014, 7, 3233–3246, doi:10.5194/amt-7-3233-2014. http://www.atmos-meastech.net/7/3233/2014/
- Lovett R.A. Polar wander linked to climate change //Nature, 14 May, 2013 /http://www.nature.com/news/polarwander-linked-to-climate-change-1.12994; doi:10.1038/nature.2013.12994
- Marsh N., H. Svensmark. Cosmic rays, clouds, and climate // 2000a, Space Sci. Rev., 94, 215–230.
- Marsh N., H. Svensmark. Low Cloud Properties influenced by Cosmic Rays // 2000b, Phys. Rev. Lett., 85, 5004– 5007.
- Neher H.V. Cosmic-ray particles that changed from 1954 to 1958 to 1965 // J. Geophys. Res., 1967, 72, 1527– 1539.
- Ogigina N.A., E.V. Rozanov, I.L. Karol. The role of stratospheric aerosol in a forming of ultraviolet radiation at large sun zenith angles // Bull. Sov. Acad. Sci., Phys. Atmos. Ocean, 1996, vol. 32, No.4, 456-463.
- Rodger C.J., Clilverd M.A., Verronen P. T., Ulich T., Jarvis M J., Turunen E. Dynamic geomagnetic rigidity cutoff variations during a solar proton event // J. Geophys. Res., 2006, Vol. 111 (A4), A04222, doi:10.1029/2005JA011395.
- Schweiger A.J., Lindsay R.W., Key J.R., Francis J.A. Arctic clouds in multilayer satellite data sets // Geophys. Res. Lett., 1999, 26(13), 1845—1848.
- Stroeve J., Holland M. M., Meier W., Scambos T., Serreze M. Arctic sea ice decline: Faster than forecast // Geophys. Res. Lett., 2007, 34 (9): L09501, doi:10.1029/2007GL029703.
- Svensmark, H., E. Friis-Christensen. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage–A missing link in solar-climate relationships // J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 1997, 59, 1225-1232.

- Turco R, Plumb A., Condon E. The Airborne Arctic Stratospheric Expedition: Prologue // Geophys. Res. Lett., 1990 (March 1990, Supplement), 17, No. 4, 313—316.
- Treffeisen R.E. Stratospheric Aerosol and Gas Experiment (SAGE) II and III aerosol extinction measurements in the Arctic middle and upper troposphere // J. Geophys. Res., 2006, Vol. 111, D17203, doi:10.1029/2005JD006271.
- Tsitas, S.R., Yung, Y.L. The effect of volcanic aerosols on ultraviolet radiation in Antarctica // Geophys. Res. Lett., 1996, vol.23, 157–160.
- Usoskin, I. G., Kovaltsov, G. A., Mironova, I. A.: Cosmic ray induced ionization model CRAC:CRII: An extension to the upper atmosphere // J. Geophys. Res., 2010, 115, D10302, doi:10.1029/2009JD013142.
- Vasilyev G.I., V.M.Ostryakov, A.A.Pavlov, A.K.Pavlov. Ion Production in the Atmosphere by Incident Electrons and Protons // ICRC Proceddings-Pre-Conference Edition, 30th international cosmic rays conference, Merida, Mexico, 2007/ - 4 p. https://galprop.stanford.edu/elibrary/icrc/2007/preliminary/pdf/icrc0472.pdf
- Wang X., Key R.J. Recent trends in arctic surface, cloud, and radiation properties from space // Science, 2003, 299 (5613), 1725–1728.

## POSSIBLE RELATIONSHIPS OF THE MAGNETIC POLE MOTION AND SOLAR ACTIVITIES VARIATIONS WITH ARCTIC CLIMATE CHANGE. PART 1

Yu.E. Belikov, V.A. Burov, S.V. Dyshlevsky, N.G. Kotonayeva, V.B. Lapshin, and A.Yu. Repin

A hypothesis is proposed for the effect of the accelerated motion of the North magnetic pole and decrease of the solar activity during the last decades on the Arctic climate. The results of the ice cover observation in Arctic show, that warming takes place mainly in the Russian polar zone and the Beaufort Sea area, while the magnetic pole approaches them. At the same time the effect of the warming is not observed, or it is likely very weak in the Canadian Arctic zone, from which the magnetic pole drifts apart. A possible effect of the warming in the Russian polar zone and the Beaufort Sea area is related to the galactic cosmic rays invasion zone displacement which is caused by the North magnetic pole motion. This process fell in the same time interval with the period of the solar activity decrease and, correspondingly, with the period of the galactic cosmic radiation rise. The increase of the galactic cosmic radiation results in the charged particles number rise in the altitude range of ~4-50 km with the maximum rate of the ion formation at the altitudes of about 15-20 km. The ion clusters formation contributes to the aerosol and thin clouds formation in this range. It is estimated that the net balance at the Earth surface in the Arctic region can be positive in the case of the solar radiation scattering at the emerged upper aerosol and thin clouds layer at this altitude range upon the specific conditions of the solar light scattering in twilight and the presence of clouds in the lower troposphere for long periods of time. The solar radiation increase at the Earth surface in the Arctic region takes place inside a certain effective zone at the definite sites in the above noted altitude range where the conditions for the condensation growth of ion clusters exist. This zone moves alongside with the magnetic pole and we estimate that its horizontal size is about 2500–3000 km.

KEY WORDS: ARCTIC, CLIMATE, MAGNETIC POLE MOTION, GALACTIC COSMIC RADIATION, CHARGED PARTICLES, CLOUDS FORMATION, TWILIGHT SCATTERING EFFECT