



УДК 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 4

Ю.Е. Беликов¹, В.А. Буров¹, С.В. Дышлевский¹, Н.Г. Котонаева¹, В.Б. Лапшин¹, А.Ю. Репин¹¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, Россия, г. Москва

Продолжено обсуждение и обоснование гипотезы о влиянии ускоренного движения Северного магнитного полюса и уменьшения солнечной активности в последние десятилетия на прозрачность атмосферы и климат Арктики. В результате уменьшения солнечной активности возросло количество заряженных частиц в верхней тропосфере и стратосфере Арктики. Быстрое перемещение северного магнитного полюса от берегов Канады до северного географического полюса за последние примерно сорок лет привело к следующим результатам. Из-за особенностей фокусировки заряженных частиц магнитным полем основной рост концентрации заряженных частиц по мере движения магнитного полюса происходил в верхней тропосфере и стратосфере Арктики в основном над узкой, расширяющейся по мере движения полюса, «серпообразной» зоной возле арктического побережья России и над её северными территориями. Расчеты положения этой зоны на основе двух моделей магнитного поля (Ts89 и Shea) показывают, что она находится над областью усиленного таяния ледового покрытия. При этом модель Shea дает гораздо более точное совпадение проекции указанной зоны на поверхность Арктики с областью усиленного таяния ледового покрытия. Заряженные частицы, образованные космическими лучами, увеличивают количество мелких частиц в составе облаков среднего и верхнего уровней в Арктике. Увеличение мелкодисперсной фракции частиц облаков среднего и верхнего уровней изменяет их индикатрису рассеяния. При этом увеличивается перенос излучения к поверхности в условиях присутствия нижней облачности, наблюдаемой значительную часть времени в Арктике, а также, что еще более важно, это может приводить к нагреванию и разрушению нижележащей тропосферной облачности. Исчезновение нижней облачности может в десятки и сотни раз увеличить поступление солнечного излучения к поверхности Арктики. Инициатором таких событий являются метеорологические условия, способствующие появлению средней и верхней облачности, и они не обязательно коррелируют с солнечной активностью. Однако количество мелких кластеров на основе заряженных частиц, образуемых космическими лучами, непосредственно связано с количеством солнечной энергии, которая поступит к поверхности Арктики в результате рассматриваемых процессов. Таким образом, солнечная активность и движение Северного магнитного полюса оказывают влияние на климатические изменения Арктики и возможно, всей нашей планеты.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Арктика, климат, движение магнитного полюса, галактическое космическое излучение, мелкая фракция частиц облаков, перенос излучения, разрушение нижних облаков

1. ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих частях наших статьи [Беликов и др., 2018а; Беликов и др., 2018б; Беликов и др., 2018в] показано, что смещение северного магнитного полюса в последние десятилетия может приводить к увеличению концентрации заряженных частиц в верхней тропосфере и стратосфере Арктики над областью усиленного таяния ледового покрытия. Эта область расположена, в основном,

в зоне Российской Арктики и акватории моря Бофорта. При этом усиление солнечной активности увеличивает концентрацию заряженных частиц в верхней тропосфере и стратосфере над всей территорией Арктики, но особенно над указанной областью. Было выдвинуто предположение, что заряженные частицы способствуют образованию аэрозольных слоев и облаков на высотах, больших ~ 4 км, которые и создают климатический эффект. Наиболее вероятными рассеивающими слоями, создающими этот эффект, предполагались полярные стратосферные и перистые облака, а также стратосферный аэрозоль и аэрозоль в верхней и средней тропосфере.

Предполагалось, что основным механизмом климатических изменений в Арктике может быть так называемый сумеречный эффект увеличения переноса рассеянного излучения на поверхности Арктики в полосах поглощения УФ и ближней ИК областях спектра. В УФ области спектра этот эффект могут создавать полярные стратосферные облака и стратосферный аэрозоль, расположенные (возможно, частично) над максимумом основного озонового слоя.

Аналогичный эффект могут создавать в ближней ИК области спектра рассеивающие слои в верхней тропосфере и стратосфере, расположенные над поглощающей средой. Сумеречный эффект проявляется, как правило, внутри полос поглощения водяного пара, основная масса которого находится в нижней тропосфере. В то же время анализ показал, что вне полос поглощения и между полосами поглощения атмосферных газов перенос излучения к поверхности в сумерках снижается из-за уменьшения прямого потока излучения в присутствии рассеивающих слоев в верхней атмосфере. В результате этого суммарное количество поступающего излучения в ближней ИК области может также уменьшиться.

Таким образом, существование сумеречного эффекта в отдельных спектральных диапазонах еще не означает положительного баланса поступления энергии к поверхности Арктики. Поэтому для объяснения феномена влияния движения магнитного полюса и солнечной активности на климат Арктики был найден и подтвержден рядом наблюдений, а также расчетов новый механизм указанного влияния.

Известно, что в Арктике большую часть времени в нижней тропосфере присутствует облачность [Schweiger et al., 1999; Wang et al., 2003]. Расчеты показали, что присутствие оптически тонких рассеивающих слоев в верхней тропосфере и стратосфере увеличивают пропускание нижней облачности, при этом одним из ключевых факторов является различие индикатрис рассеяния верхних слоев и нижней облачности. Вычисления с учетом вклада многократного рассеяния для зенитного угла Солнца 70 градусов были сделаны в третьей части настоящей работы [Беликов и др., 2018в]. В ней впервые было показано, что присутствие тонких облаков, состоящих из мелких частиц, рассеивающих по закону Рэлея, над оптически плотной облачностью, состоящей из крупных частиц размером несколько мкм, увеличивает пропускание нижней облачности и, соответственно, поступление солнечного излучения к поверхности. Более того, расчеты показали, что поступление солнечного излучения увеличивается не только на поверхности, но и внутри большей части нижнего облака. Эти результаты, а также анализ наблюдений в Арктике [Kau et al., 2008; Schweiger and Lindsay, 2008] послужили основой для выдвижения более радикальной гипотезы потепления Арктики (возможно и не только Арктики) которая предполагает разрушение нижней облачности – испарение капель нижнего облака при появлении аэрозольных слоев и облаков среднего и особенно верхнего уровня [Беликов и др., 2020б; Беликов и др., 2021]. Очевидно, что климатический эффект при разрушении облаков намного сильнее, чем эффект увеличения пропускания солнечного света нижней облачностью.

В работе [Беликов и др., 2019а] получено аналитическое приближение эффекта увеличения пропускания излучения нижней облачностью при появлении над ней тонких высоких облаков или аэрозольных слоев. В то же время в работах [Беликов и др., 2020а; Беликов и др., 2020б; Беликов и др., 2021] показано, что эффект увеличения пропускания излучения, а также увеличения потока излучения внутри нижней облачности существует при достаточно небольших зенитных углах Солнца: ~60 градусов и меньше, хотя раньше предполагалась, что основной вклад он вносит в сумерках. Таким образом, этот эффект может давать существенный вклад не только в зимне-весеннее время, но и в летне-осенний период в Арктике, когда наблюдается наибольшее таяние ледового покрытия. Что не менее важно, он может проявляться в средних широтах и возможно вносить вклад в изменение климата на планете [Usoskin et al., 2006].

В настоящей работе продолжен анализ изменения ионизации и концентрации заряженных частиц при движении магнитного полюса. При этом используются и сравниваются две модели магнитного поля – модель Shea [Shea and Smart, 1983] и модель Ts89 [Tsyanenko, 1989]. В первой части настоящей работы [Беликов и др., 2018а] анализировалось только модель Ts89. Как будет ясно

из дальнейшего изложения, модель магнитного поля Shea более точно согласно нашему анализу описывает взаимосвязь между движением магнитного полюса и изменением ледового покрытия в последние десятилетия.

Кроме того, впервые выдвинуто и рассмотрено предположение о важной роли космического излучения в изменении индикатрис рассеяния средней и верхней облачности при образовании частиц облаков.

Как показывает наш анализ, образуемая под действием космического излучения мелкодисперсная фракция частиц в составе облаков верхнего и частично среднего уровня изменяет индикатрису рассеяния этих облаков. Несмотря на некоторое увеличение оптической толщины атмосферы, при появлении облаков среднего и особенно верхнего уровня над нижней облачностью происходит увеличение пропускания солнечного света к поверхности. При этом если рассматривать перенос излучения в ближней ИК области спектра, то за счет поглощения рассеянного солнечного излучения внутри нижних тропосферных облаков может происходить нагрев капель и разрушение нижней облачности, возможно частичное [Беликов и др., 2020б; Беликов и др., 2021]. Отметим, что в работе [Usoskin et al., 2006] на основе анализа спутниковых данных было выявлено значительное влияние средней и верхней облачности на присутствие нижней облачности. При этом коэффициенты корреляции между средней+высокой облачностью и низкой облачностью отрицательны и имеют высокие значения, достигающие уровня $\sim 0,6$ — $0,7$ практически по всему земному шару, за исключением тропической зоны.

Аналогичные эффекты увеличения пропускания солнечного света нижележащей облачностью могут возникать при солнечных вспышках на Солнце в связи с мощными солнечными протонными событиями, когда в верхней тропосфере и стратосфере образуется большое количество мелкодисперсного аэрозоля [Shumilov, 1996; Mironova et al., 2004; Mironova et al., 2008; Mironova et al., 2012]. При этом рассеяние на этом аэрозоле близко к рэлеевскому типу, особенно в ближней ИК области спектра. Разница в индикатрисах нижней облачности и верхнего мелкодисперсного аэрозоля приводит к усилению переноса солнечного излучения к поверхности Земли.

Отметим, что ранее в целом ряде работ [Svensmark and Friis-Christensen, 1997; Marsh and Svensmark, 2000a; Marsh and Svensmark, 2000b, Yu, 2002] была высказана гипотеза о важной роли ионов, образованных космическими лучами в формировании нижней облачности. Эта гипотеза основывалась на найденной в период времени примерно с 1983 г. по 1995 г. значительной корреляции между количеством нижней облачности и изменением интенсивности космических лучей. В дальнейшем после 1995 г. эта корреляция практически пропала, и в результате этого сложилось мнение, что ионы, образованные космическими лучами, не играют значительной роли в формировании климата.

В настоящей работе показано, что именно космическое излучение и образованные им ионы играют значительную роль в климате Арктики и, возможно, в климате всей нашей планеты. Основными факторами, которые раньше не учитывались, является, как отмечалось выше, влияние верхней облачности на разрушение нижней, а также возможно непрякая и нелинейная связь солнечной активности и соответственно ионизации атмосферы с образованием верхней и средней облачности. Метеорологические условия, являющиеся одним из основных факторов появления средней и верхней облачности, не обязательно коррелируют с солнечной активностью. При этом основное влияние ионов на образование средней, а также высокой облачности и разрушение нижней облачности проявляются только в отдельные промежутки времени, когда в верхней тропосфере и/или стратосфере существуют необходимые условия для образования облаков.

В то же время влияние мелкой фракции частиц в составе верхней и частично средней облачности в указанные промежутки времени существенным образом зависит от концентрации ионов в рассматриваемых областях атмосферы, а, значит, и от солнечной активности. Даже если таких промежутков времени, благоприятных для создания облачности, меньше в годы низкой солнечной активности, чем в годы высокой; тем не менее, влияние на нижнюю облачность в такие промежутки времени может быть намного более сильной. В пределе возможно полное разрушение нижней облачности в благоприятные промежутки времени при большой концентрации ионов (низкой солнечной активности) и практически незаметное влияние при малой концентрации ионов (высокой солнечной активности). Отметим, что согласно наблюдениям, интенсивное таяние ледового покрова наблюдается именно в отдельные годы. Особенно сильные уменьшения ледового покрытия Арктики

наблюдались в последние 15 лет в условиях низкой солнечной активности, рекорды были установлены в 2007, 2012 и 2020 гг. (<http://nsidc.org/arcticseaicenews/2020/08/>; https://nsidc.org/cryosphere/sotc/sea_ice.html)

2. СВЯЗЬ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕДОВОГО ПОКРЫТИЯ АРКТИКИ С ДВИЖЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЮСА, СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ И ВАРИАЦИЯМИ ОБЛАЧНОСТИ

2.1. ДВИЖЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЮСА И ИЗМЕНЕНИЕ КОНТУРОВ ЛИНИЙ ЖЕСТКОСТИ ОБРЕЗАНИЯ ПРОТОНОВ В АРКТИКЕ И ПРИЛЕГАЮЩИХ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ СОГЛАСНО ДВУМ МОДЕЛЯМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В предыдущей части работы [Беликов и др., 2018a] был проведен анализ движения северного магнитного полюса на основании модели Ts89 [Tsyganenko, 1989]. Здесь мы дополним этот анализ расчетами, выполненными в соответствии с моделью Shea [Shea and Smart, 1983]. С этой целью численные данные жесткости обрезания протонов, приведенные в работе [Shea and Smart, 1983] для 1980 г., были представлены в виде контуров линий жесткости обрезания протонов для различных энергий.

Эти контуры линий близки к эллипсам и показаны на рис. 1 слева. На рис.1 справа для сравнения показаны аналогичные расчеты по модели Ts89 для 2001 г. для нулевой геомагнитной активности ($K_p=0$) согласно работе [Rodger et al., 2006]. На рисунке 1 также точками показаны положения магнитного полюса для 1980, 2001 и 2020 гг. согласно Международной справочной модели геомагнитного поля International Reference Geomagnetic Field (IRGF, <http://deeptow.whoi.edu/northpole.html>). Более подробная карта движения северного магнитного полюса и анализ этого движения в последние десятилетия приведены в нашей работе [Беликов и др., 2018a].

Анализ рисунка 1 показывает существенную разницу в контурах этих линий жесткости обрезания для двух моделей, несмотря на то, что они построены для различных лет. Далее мы более подробно обсудим эти результаты.

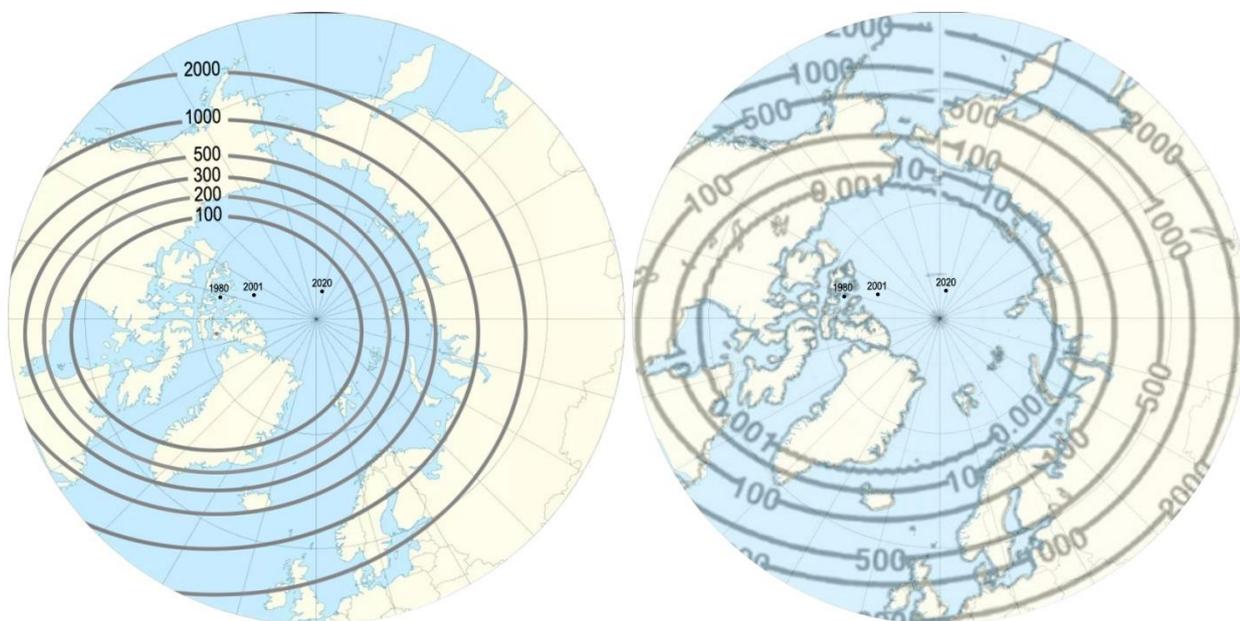


Рис. 1. Расчеты контуров линий жесткости обрезания протонов при их различных энергиях для двух моделей магнитного поля: модель [Shea and Smart, 1983] для 1980 г. (слева) и модель [Tsyganenko, 1989] согласно работе [Rodger et al., 2006] для 2001г. (справа).

Напомним, что контуры линий жесткости обрезания означают, что протоны с указанной или меньшей энергией фокусируются линиями магнитного поля внутрь этого контура. При этом величина

жесткости обрезания связана с глубиной проникновения протонов в атмосферу, и чем меньше эта величина, тем меньше глубина проникновения протонов.

На рисунке 2 представлены прямые аэростатные измерения высотного профиля концентрации ионов согласно [Ермаков et al., 1997] для различных регионов мира, характеризующихся различным значением жесткости обрезания, которые рассчитывались согласно модели Shea. Аналогичные данные можно найти в работе [Bazilevskaya et al, 2008].

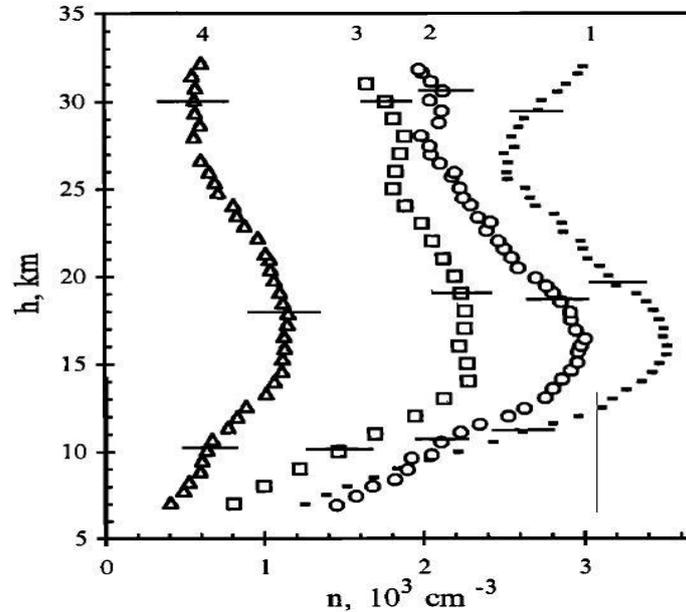


Рис. 2. Зависимость средней концентрации ионов n , от высоты h , полученная для регионов с различной жесткостью геомагнитного обрезания R_e : (1) на полярной Антарктической станции Молодежная (67° ю.ш.), $R_e=0.4$ ГэВ; (2) на среднеширотной станции Рыльск, Россия (52° с.ш.), $R_e=3.3$ ГэВ; (3) на среднеширотной станции Балхаш, Россия (46° с.ш.) $R_e=5.3$ ГэВ и на экваториальной станции Thumba, Индия (8° с.ш.), $R_e=17.3$ ГэВ. Проведены пятиточечные скользящие средние по пяти точкам. Горизонтальные полосы показывают типичные значения стандартных отклонений. *Источник:* [Ермаков et al., 1997]

Отметим, что измерения, представленные на рис. 2, были выполнены в 1990 г. при высокой солнечной активности. Согласно данным, представленным Calisto et al. [2011], а также Беликовым и др. [2018а, рис. 6], ионизация атмосферы в высоких широтах при низкой солнечной активности и, особенно, в годы минимальной солнечной активности существенно возрастает на высотах верхней тропосферы и стратосферы.

Согласно работе [Usoskin and Kovaltsov, 2006], для среднего уровня солнечной активности протоны с энергией 100 МэВ достигает высоты ~ 8 км в атмосфере Арктики, в то время как сильно ослабленный поток протонов с энергией 300 МэВ достигает уровня Земли. Высотный профиль концентрации ионов для протонов с уровнем энергий, меньших, чем 400 МэВ, показан выше на рис.2.

Учитывая приведенные замечания относительно глубины проникновения протонов, анализ рисунка 1 позволяет сделать вывод о том, что при движении магнитного полюса от берегов Канады в сторону северного побережья Российской Федерации (по направлению к полуострову Таймыр) жесткость геомагнитного обрезания увеличивается у берегов Канады и соответственно уменьшается у берегов северного побережья Российской Федерации. Это также означает (рис. 2), что уменьшается концентрация ионов в верхней тропосфере и стратосфере над северной частью Канады и увеличивается над акваторией Северного Ледовитого океана у берегов России. Жесткость обрезания изменяется при движении магнитного полюса различным образом и в других регионах северного полушария, включая средние широты.

На рисунке 3 показано изменение жесткости обрезания в течение последних десятилетий для высокогорной станции Ломницки Штит (Lomnický štít, Словакия, $49,15^\circ$ с.ш., $20,08^\circ$ в.д.) согласно [Gvozdevsky et al., 2017]. В верхней части этого рисунка красными точками показаны траекторные

вычисления согласно работе [Shea et al., 2001], а также ниже приведены расчеты согласно [Shea et al., 1965]. В средней части рисунка показаны результаты расчетов согласно модели Ts89 для различных значений K_p индекса. Внизу приведены значения K_p индекса, вычисленного авторами по специальной методике [Gvozdevsky et al., 2017]. Толстыми линиями показано изменение жесткости обрезания с учетом изменения K_p индекса, при этом пунктирные и непрерывные линии отличаются методикой расчета (подробнее см. [Gvozdevsky et al., 2017]).

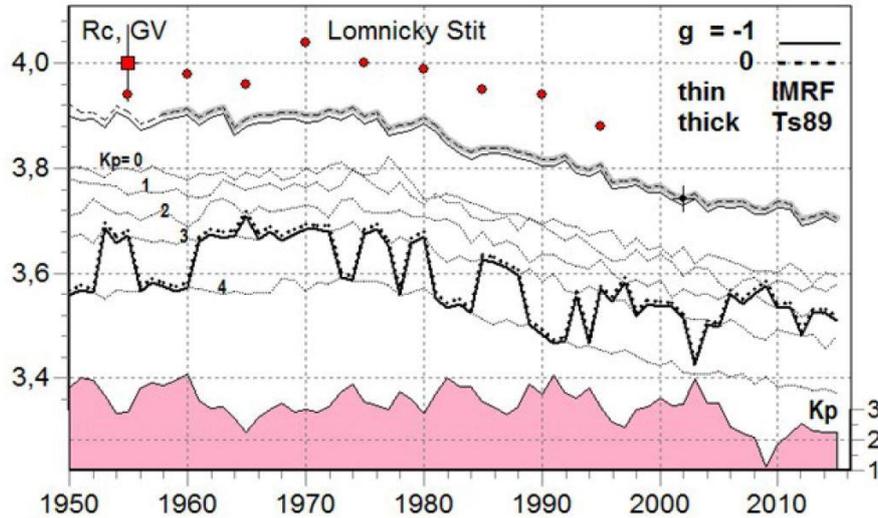


Рис. 3. Изменения жесткости обрезания протонов за 1950—2012 гг. для станции Lomnický štít, Словакия для двух моделей магнитного поля согласно [Gvozdevsky et al., 2017] (см. текст). Показаны также изменения индекса геомагнитной активности K_p .

Анализ рис. 3 показывает, что жесткость обрезания, вычисленная по модели Shea, существенно превышает расчеты, сделанные с помощью модели Ts89 даже для нулевой геомагнитной активности Солнца. При этом зависимость от геомагнитной активности в моделях Shea достаточно слабая по сравнению с зависимостью жесткости обрезания от геомагнитной активности в модели Ts89. Из этого рисунка также видно, что наиболее сильные изменения, а именно уменьшение значений жесткости обрезания, начали наблюдаться после 1980 г., что соответствует началу быстрого движения полюса от берегов Канады в сторону северных территорий России (см. рис. 2 в работе [Беликов и др., 2018a]).

Вернемся теперь к анализу рис. 1 и сравнению линий жесткости обрезания, соответствующих двум моделям магнитного поля. Анализ показывает, что если переместить линии жесткости обрезания для модели Shea в соответствии с движением полюса в направлении полуострова Таймыр с 1980 до 2001 г., то линии жесткости обрезания будут сильно отличаться от линий жесткости обрезания, соответствующих модели Ts89 для 2001 г. даже при нулевой солнечной активности ($K_p=0$). При этом изолинии жесткости обрезания, соответствующие энергиям протонов 100—300 МэВ для модели Shea в 2001 г. переместятся в акваторию моря вблизи побережья северных территорий России, тогда как аналогичные изолинии по модели Ts89 для 2001 г. находятся далеко в материковой части Российской Федерации (рис. 1). Это подтверждает сильное различие моделей Shea и Ts89, показанное ранее на рис.3.

Более подробно передвижение изолиний 100, 200 и 300 МэВ по модели Shea, соответствующих смещению магнитного полюса с 1980 по 2001 г. показан на рис. 4. Учитывая, что контуры линий жесткости обрезания должны быть симметричны относительно магнитного полюса [Bazilevskaya et al., 2008], мы центрировали все эллипсы относительно магнитного полюса.

Как видно из рис. 4, проекции изменений положений линий жесткости обрезания на земную поверхность в направлении движения магнитного полюса за указанный период времени представляется «серпообразной» зоной, лежащей вблизи северных территорий Российской Федерации.

Согласно нашей гипотезе и анализу, проведенному ранее, именно небольшие уровни энергий протонов ~100—300 МэВ определяют основные изменения концентрации заряженных частиц на высотах, больших ~4 км. Серпообразные зоны, образуемые в направлении движения магнитного полюса при движении контуров линий обрезания протонов с энергиями 100—300 МэВ (рис.4),

соответствуют, по нашему мнению, областям, над которыми в верхней тропосфере и стратосфере возможно увеличение концентрации мелкодисперсных частиц.

Увеличение мелкодисперсной фракции частиц над рассматриваемыми областями должно приводить к усиленному таянию ледового покрытия в этих областях Арктики (см. выше). В то же время расширение рассматриваемой серповидной зоны над северными территориями Российской Федерации (примерно после 2000 г.) должно приводить к потеплению северных территорий Российской Федерации и усилению переноса тепла в прибрежные области Арктики (рис.4). Такой сценарий таяния ледового покрытия Арктики и изменения климата Арктики согласуется с экспериментальными наблюдениями в Арктике за последние десятилетия. Рассмотрим некоторые из них.

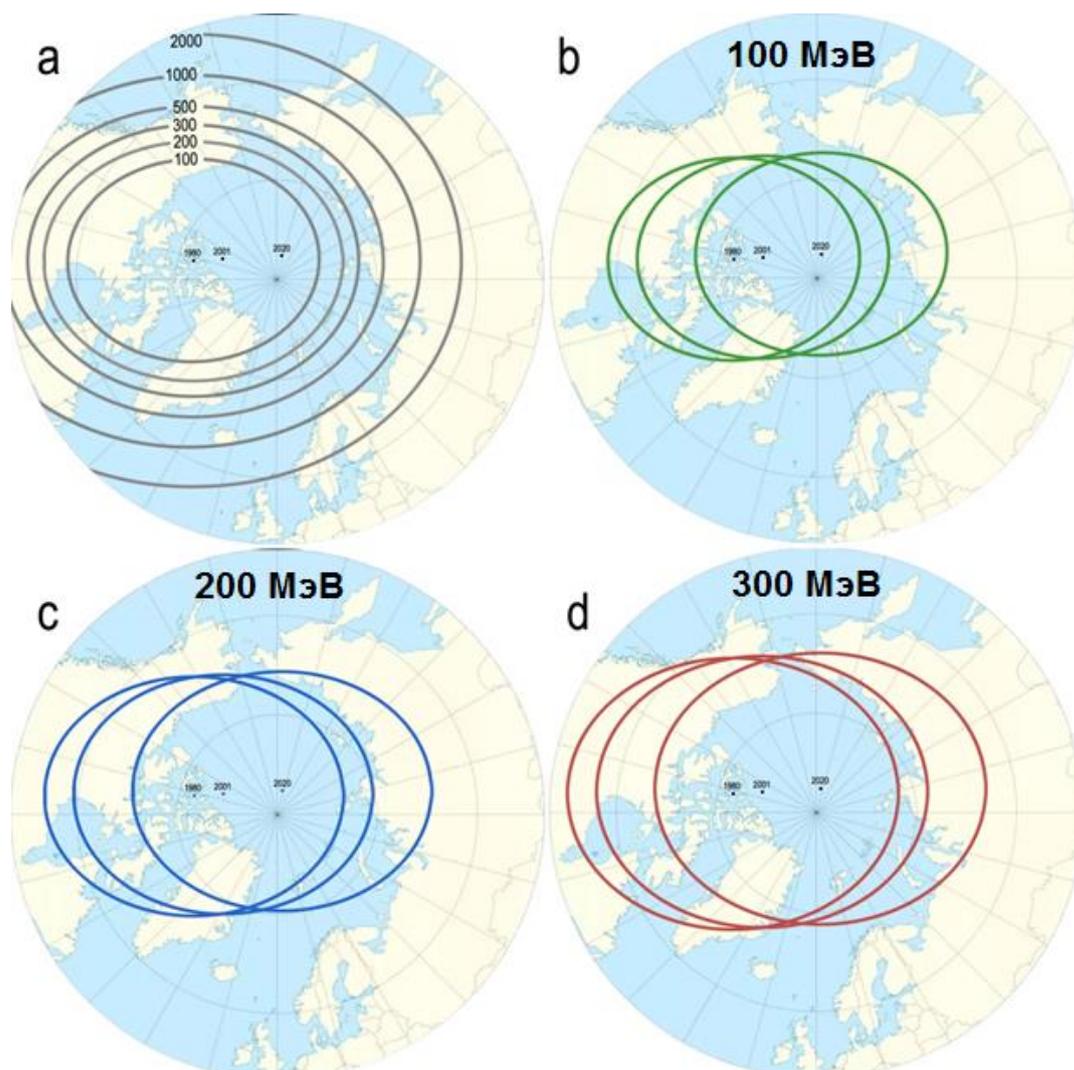


Рис.4. Контуры линий жесткости обрезания протонов согласно модели Shea для 1980 г., центрированные на положение магнитного полюса согласно модели IRGF (a); контуры линий жесткости обрезания соответствующие трем положениям магнитного полюса на начало 1980, 2001 и 2020 г. согласно модели IRGF для трех энергий протонов 100 МэВ (b) 200 МэВ (c) и 300 МэВ (d).

2.2 СВЯЗЬ ИЗМЕНЕНИЙ ЛЕДОВОГО ПОКРЫТИЯ АРКТИКИ С ДВИЖЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЮСА, И ВАРИАЦИЯМИ ОБЛАЧНОСТИ.

Отметим, что в целом ряде работ проводится анализ изменений ледового покрытия и облачности в Арктике с привлечением наземных и спутниковых наблюдений. Но только в немногих из них показывается взаимосвязь между изменением ледового покрытия и изменениями облачности, температуры и относительной влажности на различных высотах в последние десятилетия. К таким работам относится анализ изменений в арктическом регионе, выполненный в [Schweiger and Lindsay, 2008]. Рассмотрим наиболее важные результаты, полученные в этой работе.

На рисунке 5а показаны аномальные отклонения концентрации льда в Арктике в течение осени (сентябрь—ноябрь) за период 1980—2001 гг. [Schweiger and Lindsay, 2008]. Слева показаны отклонения меньшие, а справа большие, чем половина стандартного отклонения. Аномалии рассчитываются относительно среднего значения за указанный период. При этом учитываются только отклонения, составляющие не менее половины стандартного отклонения. Отклонения меньшие 10% не учитываются. Отклонения рассчитывались на основе анализа данных Европейского центра по прогнозу и реанализу погоды (ERA-40) [Schweiger and Lindsay, 2008].

Аналогичные отклонения на основе той же базы данных были рассчитаны для облаков нижнего (рис.5b), среднего (рис.5c) и верхнего ярусов (рис. 5d) [Schweiger and Lindsay, 2008]. Считается, что облака нижнего яруса находятся на высотах, меньших примерно 2 км (это соответствует диапазону атмосферного давления ~1000-800 гПа), среднего яруса между высотами 2 и 6,5 км (~800-450 гПа) и верхнего уровня – от 6,5 км и выше (атмосферное давление меньше ~450 гПа).

Сравнение рисунков 5b и 5а показывает, что при уменьшении ледового покрытия Арктики уменьшается количество нижней облачности и, наоборот, при увеличении ледового покрытия количество облаков возрастает. При этом в тех районах (ячейках), где аномалии в ледовом покрытии возрастают (в положительную или отрицательную сторону), также возрастают аномалии нижней облачности.

Для средней облачности указанные закономерности выражены слабо, хотя есть явная тенденция к увеличению средней облачности при возрастании ледяного покрытия и наоборот (рис.5c). В то же время для верхнего яруса облачности наблюдается явно выраженная противоположная закономерность, а именно: при уменьшении ледового покрытия возрастает количество верхней облачности, и наоборот (рис. 5d).

Необходимо отметить, что облака верхнего уровня затеняют облака нижнего уровня при наблюдении со спутника, из-за этого измерения относительных изменений количества нижних и верхних облаков могут быть затруднены. Поэтому с целью независимой проверки достоверности и улучшения качества используемых данных, в работе [Schweiger and Lindsay, 2008] наряду с базой данных по прогнозу и реанализу погоды ERA-40 использовалась также база данных ТТР (Polar Pathfinder (TPP) dataset [Schweiger et al. 2002]). С ее помощью вычислялась количество облаков выше уровня 800 гПа на основе восстановления высот облаков верхнего уровня.

На рисунке 5е показаны контуры линий жесткости обрезания, соответствующей энергии протонов 200 МэВ для двух положений магнитного полюса в 1980 (зеленая линия) и 2001 г. (красная линия). При этом непрерывные линии соответствуют расчетам по модели Shea, в то время как пунктирные линии соответствуют расчетам по модели Ts89 для нулевой солнечной активности. На рисунке 5е также показаны аномальные отрицательные отклонения нижнего яруса облачности за период 1980-2001 год в соответствии с рис. 5b (справа). Эта область аномальных отрицательных отклонений нижней облачности совпадает примерно с областью положительных аномалий верхнего яруса облачности 5d (справа) и в меньшей степени с положительными аномалиями средней облачности (рис 5c, справа).

Как видно из рисунка 5е, перемещение с 1980 г. по 2001 г. контура линии жесткости обрезания, рассчитанного по модели Shea, соответствующего энергии протонов 200 МэВ, происходит примерно в области указанных на рис. 5а–5е аномалий в ледовом покрытии Арктики и облачности разных уровней. Аналогичное перемещение, рассчитанное по модели Ts89 даже для нулевой солнечной активности хуже совпадает с серпообразной зоной рассматриваемых аномальных изменений в Арктике. По этой причине мы считаем, что модель Shea лучше соответствует нашей гипотезе.

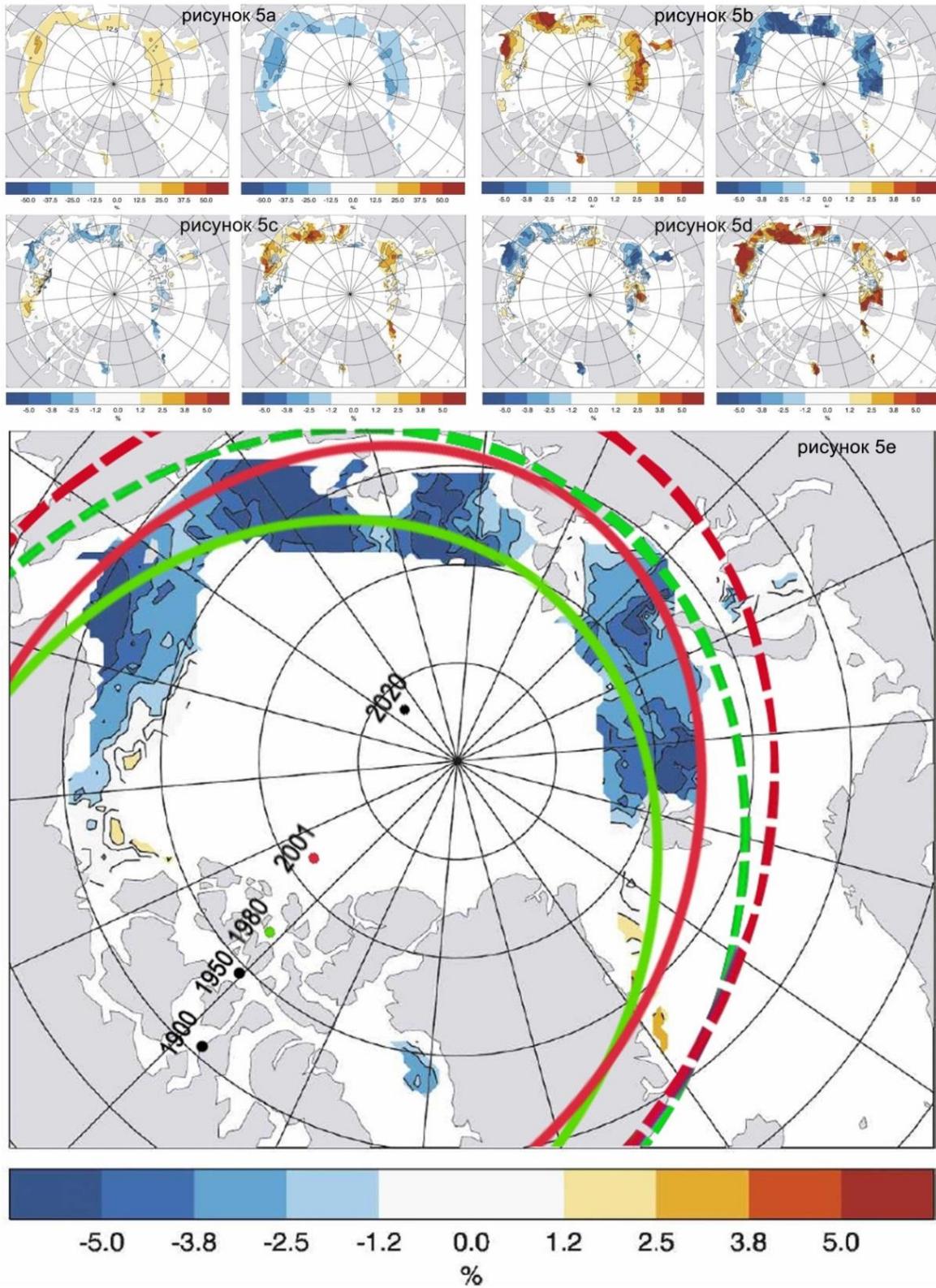


Рис.5. Аномальные отклонения (превышающие половину стандартного отклонения) от средних величин для осеннего сезона в течение 1980—2001 гг.: концентрации льда в Арктике (а), количества нижних облаков (б), средних облаков (с) и верхних облаков (д). Внизу показаны контуры линий жесткости обрезания протонов с энергией 200 МэВ, соответствующие положению магнитного полюса в 1980 г. (зеленая линия) и 2001 г. (красная линия) для двух моделей магнитного поля: модели Shea (непрерывные линии) и модели Ts89 (прерывистые линии) для нулевой солнечной активности. Точками показаны положения магнитного полюса согласно модели IRGF для 1900, 1950, 1980, 2001 и 2020 гг. (е).

В работе [Schweiger and Lindsay, 2008] показано, что в среднем при отрицательных аномалиях ледяного покрытия температура на поверхности и в пограничном слое на несколько градусов превышает аналогичную температуру при положительных аномалиях ледового покрытия. Из рисунка 5 также следует, что возможной причиной такого изменения температуры являются вариации нижней облачности. Действительно, уменьшение количества нижней облачности приводит к увеличению прямых солнечных потоков в видимой, УФ и ближней ИК областях спектра на поверхности Арктики, что способствует увеличению температуры и таянию ледового покрытия. Очевидно, что противоположный эффект – уменьшение ледового покрытия Арктики, должен наблюдаться при уменьшении количества нижней облачности.

В то же время, из рисунка 5, как мы отмечали выше, следует, что существует связь между количеством нижней, средней и высокой облачностью. При этом в большей степени эта связь проявляется между нижней и верхней облачностью.

Согласно нашей гипотезе в результате особенностей фокусировки космических лучей в 1980-2001 годы в составе облаков, которые появляются над рассматриваемой серповидной зоной (рис.5е) на высотах, больших примерно ~ 4 км (это облака верхнего и частично среднего уровней) увеличено содержание мелкодисперсной фракции частиц на основе заряженных кластеров. Это изменяет индикатрису рассеяния этих облаков, что увеличивает перенос солнечной радиации к поверхности Арктики в присутствии нижней облачности, а также может приводить к уменьшению нижней облачности в результате ее нагревания и испарения капель облаков. Расчеты показывают, что эффект увеличения переноса излучения существует не только в сумеречных условиях, как первоначально предполагалось, но и при достаточно небольших зенитных углах Солнца [Беликов и др., 2020а; Беликов и др., 2020б; Беликов и др., 2021]. Это означает, что он может влиять на сокращение ледового покрытия Арктики в летних и осенних условиях, а также оказывать влияние на климатические изменения в средних широтах.

Наряду с уменьшением солнечной активности в последние десятилетия важную роль в изменении климата Арктики играет также следующий факт. Область повышенной концентрации заряженных частиц (серповидная зона), связанная с линиями жесткости обрезания протонов с энергией $\sim 100-300$ МэВ, выдвигается в направлении Российской Федерации из малоосвещенных в среднем областей Арктики в ее периферийные районы, а также средние широты с большей среднегодовой освещенностью (рис.4). Безусловно, это увеличивает перенос излучения к поверхности Арктики, а также к поверхности северных территорий Российской Федерации, что приводит к уменьшению ледового покрытия Арктики вблизи побережья России и климатическим изменениям Арктики.

Примерно после 2000 г. основные климатические изменения происходят над северными территориями Российской Федерации (рис.4, 5). Потепление этих территорий за счет фокусировки над ними заряженных частиц приводит к увеличению потоков тепла с северных территорий Российской Федерации к побережью близлежащих областей Арктики, что ускоряют таяние ледового покрытия этих областей.

Отметим, что аналогичная серповидная зона увеличенной концентрации заряженных частиц со стороны Канады вместе с полюсом движется в менее освещенные районы Арктики, что не способствует таянию ледового покрытия со стороны Канады. Этот факт был отмечен нами в первой части настоящей работы [Беликов и др., 2018а]

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе [Беликов и др., 2019а], получены аналитические формулы решения уравнения переноса излучения в приближении однократного рассеяния для двухслойной атмосферы. Верхний слой может представлять собой облачность среднего или верхнего ярусов, в то время как нижний слой соответствует нижней тропосферной облачности. При этом, как отмечалось выше, количество мелкодисперсных частиц в составе облаков среднего и верхнего ярусов (на высотах, больших ~ 4 км) зависит от солнечной активности и особенностей фокусировки заряженных частиц, которые и способствуют образованию мелкодисперсной фракции частиц.

Полученные формулы [Беликов и др., 2019а] показывают, что увеличение переноса излучения к поверхности Земли в двухслойной атмосфере по сравнению с однослойной атмосферой возможно при определенных условиях. Одним из этих условий является отношение индикатрис рассеяния верхнего и нижнего слоев при угле рассеяния в направлении поверхности Земли. При этом более

мелкие частицы верхнего слоя, как правило, сильнее рассеивают свет в направлении поверхности по сравнению с более крупными частицами нижних тропосферных облаков при больших зенитных углах Солнца. Это является одним из основных условий увеличения солнечного потока в направлении поверхности в двухслойной атмосфере по сравнению с однослойной. Другими условиями, от которых зависит рассматриваемый эффект увеличения солнечного потока к поверхности, являются оптическая толщина верхнего слоя, альbedo однократного рассеяния нижнего слоя и некоторые другие параметры [Беликов и др., 2019а].

Более строгое моделирование на основе решения уравнения переноса излучения в сферической атмосфере [Беликов и др., 2018г; Беликов и др., 2018д; Беликов и др., 2018е] с учетом эффектов многократного рассеяния выполнено в работах [Беликов и др., 2019а; Беликов и др., 2020а; Беликов и др., 2020б; Беликов и др., 2021]. При этом анализируется перенос излучения в атмосфере Земли в приближении двухслойной атмосферы.

Расчеты сделаны для конкретных оптических параметров этих слоев. Оптическая толщина верхнего слоя принималась равной 0,2, а нижнего слоя равной 4. Индикатриса рассеяния нижнего слоя рассчитывалась по теории Ми для характерных размеров частиц нижней тропосферной облачности, в то время как частицы верхнего слоя рассеивали по закону Рэлея. Вычисления показали, что потоки излучения на поверхности Земли в двухслойной атмосфере превышают потоки в однослойной атмосфере для широкого диапазона зенитных углов Солнца примерно от 30 до 92 градусов с максимумом, приходящимся на зенитные углы Солнца 60-70 градусов [Беликов и др., 2019б; Беликов и др., 2020а; Беликов и др., 2020б; Беликов и др., 2021]. Увеличение переноса излучения к поверхности Арктики приводит к ее нагреванию и нагреванию пограничного слоя атмосферы. Основное поглощение солнечного излучения происходит в ближней ИК области спектра (см. оценки нагревания ниже).

Кроме того, в результате моделирования переноса излучения было установлено, что внутри большей части нижней облачности (за исключением верхушки облака) увеличиваются потоки излучения при появлении верхнего слоя облачности [Беликов и др., 2020б; Беликов и др., 2021]. При наличии поглощения в нижнем облаке это может приводить к его нагреву, испарению капель и разрушению облака [Беликов и др., 2021].

Предварительный анализ показал, что основной эффект нагревания происходит в ближней ИК области спектра. Увеличение потока в дневных условиях внутри вертикального слоя облака площадью 1 м^2 может достигать 10 Вт/м^2 [Беликов и др., 2020б]. Однако более детальные расчеты, выполненные в работе [Беликов и др., 2021] для зенитного угла Солнца 60 градусов с учетом поглощения солнечного излучения внутри нижнего облака показали, что увеличение потока меньше: $\sim 2,5 \text{ Вт/м}^2$. Основной вклад при этом дает ближняя ИК область спектра. Вклад в поглощение парами воды внутри облака составляет $\sim 1 \text{ Вт/м}^2$, а вклад поглощения излучения каплями воды составляет $\sim 1,5 \text{ Вт/м}^2$.

Оценки скорости нагрева нижнего облака следующие. При толщине облака 1 км скорость нагревания при поглощении энергии в единицу времени $2,5 \text{ Вт/(м}^2\text{столб)}$ составит $4\text{E-}6$ град/с. Это означает, что за 1 час облако толщиной 1000 м нагреется на 0,01 градуса. При долгом присутствии облаков нагревание усиливается, нагрев за сутки облака толщиной 1 км составляет 0,3 °C. Отметим, что если облако будет толщиной 100 м, то за счет нагрева капельками воды меньшего количества молекул воздуха увеличение температуры за сутки составит 2,5 градуса.

Анализ результатов моделирования переноса излучения в рассматриваемой постановке задачи [Беликов и др., 2020б; Беликов и др., 2021] показывает, что на выходе из нижней облачности и вблизи земной поверхности увеличение потоков солнечного излучения при появлении верхней облачности в 3-5 раз меньше увеличения потоков солнечного излучения внутри нижней облачности при зенитных углах Солнца $\sim 60\text{-}70$ градусов. Отсюда можно получить оценку нагрева пограничного слоя атмосферы за счет поглощения рассеянного ИК излучения парами водяного пара при появлении верхних облаков над нижней тропосферной облачностью, которая составит $\sim 0,3^\circ\text{C}$ за 10 суток.

В работе [Беликов и др., 2021] оценено влияние изменения температуры нижней тропосферы на испарение капель облака. В ней на основе работы [Райст, 1978] показано, что время образования и испарения капель облака достаточно мало для частиц размером несколько микрометров или десятков микрометров и зависит от давления паров воды над поверхностью капли. Если это давление меньше давления насыщенного пара, то капля будет испаряться. Например, для капли диаметром 20 мкм при относительной влажности 99,4% время испарения составит 19 сек. В то же время, если давление

превышает давление насыщенного пара, будет наблюдаться быстрый рост капли, размер которой ограничивается количеством воды в атмосфере. Часто капли воды в облаке находятся в состоянии неустойчивого равновесия, когда давление паров воды над каплей близко к состоянию насыщения. В этом случае достаточно небольшого изменения температуры, чтобы нарушить равновесие либо в сторону испарения капель, либо в сторону увеличения их размера. Анализ показывает, что даже небольшое увеличение температуры атмосферы на один градус или даже на десятые доли градуса достаточно для быстрого (десятки секунд) испарения капель облака [Райст, 1987; Беликов и др., 2021].

Как следует из нашего анализа, появление тонких облаков и аэрозольных слоев над нижней облачностью может привести к увеличению температуры воздуха внутри нижних облаков примерно на ~ 0.1 — 1 °C в течение суток и, следовательно, к быстрому испарению капель облаков или к их частичному исчезновению. В результате уменьшения нижней тропосферной облачности потоки солнечного излучения на поверхности Арктики могут вырасти в десятки и даже сотни раз. Это увеличивает таяние ледового покрытия Арктики, влияет на ее климат. Отметим, что влияние верхнего и частично среднего яруса облачности на количество нижней облачности наблюдается над областью наибольших изменений в ледовом покрытии Арктики за период с 1980 по 2001 г. (рис.5).

При этом появление среднего и верхнего ярусов облачности может быть не связано прямым образом с солнечной активностью и фокусировкой заряженных частиц магнитным полем в определенные области Арктики. Однако концентрация мелких частиц, образуемых космическими лучами [Shumilov, 1996; Mironova et al., 2004; Mironova et al., 2008; Mironova et al., 2012] непосредственно связана с солнечной активностью и движением магнитного полюса. Поэтому появление средней и, особенно, верхней облачности над нижней тропосферной облачностью в условиях Арктики по мере движения магнитного полюса во всё более возрастающей степени вызывает сокращение ледового покрытия в последние десятилетия. Это происходит в результате изменения индикатрисы рассеяния средних и верхних облаков и увеличения переноса солнечного излучения к поверхности Арктики [Шалина и Бобылев, 2017; Schweiger and Lindsay, 2008; Kay et al., 2008].

Как было отмечено выше, в работе [Schweiger and Lindsay, 2008] показано, что во время аномальных сильных изменений концентрации льда в период 1980—2001 г. температура вблизи поверхности на уровне ~ 700 - 1000 мбар при пониженной концентрации льда превышает в среднем на несколько градусов температуру для случаев повышенной концентрации льда. В то же время, в работе [Kay et al., 2008] показано, что сильное уменьшение ледового покрытия в 2007 г. по сравнению с 2006 г. сопровождалось не только увеличением температуры в нижней тропосфере, но и значительным понижением температуры (на ~ 7 К) и одновременным увеличением относительной влажности на высотах 9—13,9 км, что могло способствовать образованию на этих высотах мелкодисперсных частиц.

Эти наблюдения, наряду с анализом фокусировки заряженных частиц (рис.5), результатами моделирования переноса излучения и его влияния на нагревание поверхности Арктики, а также разрушение нижней облачности подтверждают выдвинутую авторами гипотезу о влиянии движения магнитного полюса и солнечной активности на климат Арктики.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

ЛИТЕРАТУРА

- Беликов Ю.Е., Буров В.А., Дышлевский С.В., Котонаева Н.Г., Лапшин В.Б., Репин А.Ю. Возможная связь движения магнитного полюса и изменения солнечной активности с климатом Арктики. Часть 1 // Гелиогеофизические исследования, выпуск 19, 1—14, 2018а.
- Беликов Ю.Е., Буров В.А., Дышлевский С.В., Котонаева Н.Г., Лапшин В.Б., Репин А.Ю. Возможная связь движения магнитного полюса и изменения солнечной активности с климатом Арктики. Часть 2 // Гелиогеофизические исследования, вып. 19, 15—24, 2018б.
- Беликов Ю.Е., Буров В.А., Дышлевский С.В., Котонаева Н.Г., Лапшин В.Б., Репин А.Ю. Возможная связь движения магнитного полюса и изменения солнечной активности с климатом Арктики. Часть 3 // Гелиогеофизические исследования, вып. 19, 25—31, 2018в.

- *Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Николайшвили Ш.С.* Математическая модель переноса излучения в сферической гетерофазной среде. Часть 1 // Гелиогеофизические исследования, вып.17, 77—86, 2018г.
- *Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Николайшвили Ш.С.* Математическая модель переноса излучения в сферической гетерофазной среде. Часть 2 // Гелиогеофизические исследования, вып. 18, 18—31, 2018д.
- *Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Николайшвили Ш.С.* Математическая модель переноса излучения в сферической гетерофазной среде. Часть 3 // Гелиогеофизические исследования, вып. 18, 32—39, 2018е.
- *Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Репин А.Ю.* Влияние тонких высоких облаков и аэрозольных слоев на перенос солнечного излучения к поверхности Земли в условиях сумерек // Оптика атмосферы и океана, т.32, № 10, 844-847, 2019а. DOI: 10.15372/AOO20191007
- *Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Репин А.Ю.* Особенности влияния тонких высоких облаков и аэрозольных слоев на перенос излучения к поверхности Арктики // Гелиогеофизические исследования выпуск 24, 13—19, 2019б.
- *Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Репин А.Ю.* Особенности влияния тонких высоких облаков и аэрозольных слоев на перенос излучения к поверхности Арктики (продолжение) // Гелиогеофизические исследования выпуск 25, 36—49, 2020а.
- *Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Репин А.Ю.* Особенности влияния тонких высоких облаков и аэрозольных слоев на перенос излучения к поверхности Арктики (заключение) // Гелиогеофизические исследования выпуск 25, 50—58, 2020б.
- *Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Репин А.Ю.* Возможное влияние тонких высоких облаков и аэрозольных слоев на нагревание и разрушение нижней облачности в Арктике // Метеорология и гидрология, 2021 г. (в печати).
- *Райст П.* Аэрозоли // М.: Мир, 1987. — 278 с.
- *Шалина Е., Бобылев Л.* Изменение ледовых условий в Арктике согласно спутниковым наблюдениям // Пятнадцатая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», М.: ИКИ РАН, 13—16 ноября 2017 г. – 34 с. http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/
- *Bazilevskaya G.A., Usoskin I.G., Flückiger E.O., Harrison R.G., Desorgher L., Bütikofer R., Krainev M.B., Makhmutov V.S., Stozhkov Y.I., A.K. Svirzhevskaya, Svirzhevsky N.S., Kovaltsov G.A.* Cosmic Ray Induced Ion Production in the Atmosphere // Space Sci. Rev. (2008) 137: 149–173, DOI 10.1007/s11214-008-9339-y
- *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
- *Ermakov V. I., Bazilevskaya G. A., Pokrcvsky P. E., Stozhkov Y. I.* Ion balance equation in the atmosphere // J. Geophys. Research, vol. 102, No. D19, pp. 23,413—23,419, 1997.
- *Gvozdevsky B., Dorman L., Belov A., Gushchina R., Eroshenko E., Preobrazhensky M., Yanke V.* The secular variations of cosmic ray cutoff rigidities, caused by century variations in geomagnetic field, and cosmic ray variations // International Cosmic Ray Conference - ICRC201710-20 July, 2017, Bexco, Busan, Korea
- *Kay J. E., L'Ecuyer T., Gettelman A., Stephens G., O'Dell C.* The contribution of cloud and radiation anomalies to the 2007 Arctic sea ice extent minimum // Geophys Res., Lett., v. 35, L08503, 2008
- *Marsh, N.D.* Cosmic rays, clouds and climate / N.D. Marsh, H. Svensmark // Space Sci. Rev. – 2000а. - V. 94. - P. 215-230.
- *Marsh, N.D.* Low clouds properties influenced by cosmic rays / N.D. Marsh, H. Svensmark // Phys. Rev. Lett. – 2000б. - V. 85. - P. 5004-5007.
- *Mironova, I. A., Pudovkin, M. I., Böckmann, C.* Variations of Aerosol Optical Properties and Solar Proton Events / 22nd International Laser Radar Conference (ILRC 2004) // Proceedings of the Conference held 12-16 July, 2004 in Matera, Italy. Ed. Gelsomina Pappalardo and Aldo Amodeo. ESA SP-561. Paris: European Space Agency, 2004, p.617-619.
- *Mironova I. A., Desorgher L., Usoskin I. G., Flückiger E. O., Bütikofer R.* Variations of aerosol optical properties during the extreme solar event in January// 2005, Geophys. Res., Lett., Vol. 35, L18610, doi:10.1029/2008GL035120, 2008.

- *Mironova I. A., Usoskin I. G., Kovaltsov G. A., Petelina S. V.* Possible effect of extreme solar energetic particle event of 20January 2005 on polar stratospheric aerosols: direct observational evidence // *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 769–778, 2012 www.atmos-chem-phys.net/12/769/2012/doi:10.5194/acp-12-769-2012
- *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.
- *Schweiger, A. J., R. W. Lindsay, J. A. Francis, J. Key, J. M. Intriери, M. D. Shupe.* Validation of TOVS Path-P data during SHEBA // 2002, *J. Geophys. Res.*, 107, 8041, doi:10.1029/2000JC000453
- *Schweiger A.J., Lindsay R.W.* Relationships between Arctic sea ice and Clouds during autumn // *J. of Climate*, 2008, v.21, 4799—4810, doi: 10.1175/2008JCLI2156.1 2008.
- *Shea M.A., Smart D.F., McCracken K.G.* A study of vertical cutoff rigidities using sixth degree simulations of the geomagnetic field // *J. Geophys. Res.* V.70. P. 4117–4130. doi: 10.1029/JZ070i017p04117. 1965.
- *Shea M.A., Smart D.F.* World grid of calculated cosmic ray vertical cutoff rigidities for 1980.0 // *Conf. Pap. Int. CosmicRayConf. XVIIIth*, 3, 415—418, 1983.
- *Shea M.A., Smart D.F.* Vertical cutoff rigidities for cosmic ray stations since 1955 // *Proc. 27th ICRC.* P. 4063 – 4066. 2001.
- *Shumilov, O.I.* Enhancement of stratospheric aerosol after solar proton event / O.I. Shumilov, E.A. Kasatkina, K. Henriksen, E. Vshenuk // *Ann. Geophys.* - 1996. - V. 4. - N 11. - P. 1119-1123.
- *Svensmark, H. and Friis-Christensen, E.* Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships / H. Svensmark, E. Friis-Christensen // *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.* - 1997. - V. 59. - P. 1225-1232.
- *Tsyganenko, N. A.* Determination of magnetospheric current system parameters and development of experimental geomagnetic models based on data from IMP and HEOS satellites // 1989, *Planet. Space Sci.*, 37, 5–20.
- *Usoskin I.G., Voiculescu M., Kovaltsov G.A., Mursula K.* Correlation between clouds at different altitudes and solar activity: Fact or Artifact? // *J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 68, 2006, 2164–2172.
- *Usoskin I. G. and Kovaltsov G. A.* Cosmic ray induced ionization in the atmosphere: Full modeling and practical applications // *J. Geophys. Res.*, vol. 111, D21206, doi:10.1029/2006JD007150, 2006.
- *Yu F.* Altitude variations of cosmic ray induced production of aerosols: implications for global cloudiness and climate // *J. Geophys. Res.*, vol. 107, No. A7, 1118, 10.1029/2001JA000248, 2002
- *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 4

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

The discussion of the hypothesis 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 is continued and the additional substantiations for this hypothesis support are considered. As a result of the solar activity fall the concentration of the charged particles in the Arctic upper troposphere and stratosphere increased. A rapid motion of the North magnetic pole from the Canadian shore to the North geographic pole during about 40 years led to following results. Our analysis showed that due to the peculiarities of the charged particles focusing by the terrestrial magnetic field caused by the North magnetic pole motion the upper tropospheric and stratospheric charged particles concentration increase took place generally in the narrow sickle-shaped zone, which grew wider as the magnetic pole moved, over the Arctic shores and Northern coastal territories of Russian Federation. The calculations by two models of the geomagnetic field (Ts89 and Shea) showed that this zone is situated over the region of the amplified ice cover melting. The model of Shea gives the better results in coincidence of this zone projection on the Arctic surface with the amplified ice melting. The charged particles originated from the cosmic rays cause the number of fine particles increase in the middle-level and high-level clouds. The increase of the fine particles fraction in the middle-level and high-level clouds alters their scattering indicatrix. Our analysis shows that fine

particle increase in clouds brings to the radiation transfer to the surface growth under the conditions of the lower clouds presence which are observed during the greater part of the year in the Arctic. Moreover, and that is more important may cause the heating and decay of the underlying cloudiness. The dissipation of lower clouds can bring to the increase of solar radiation income to the Arctic surface by one-two orders of magnitude. These events are caused by the meteorological conditions which promote the emergence of the middle-level and high-level clouds and which do not necessary correlate with the solar activity. However, the number of small clusters which developed from the charged particles produced by the cosmic rays is related directly with the solar energy flux which would reach the Arctic surface as a result of these processes. Thus, the solar activity and North magnetic pole motion affect the climatic change in the Arctic and perhaps on the global scale.

KEYWORDS: ARCTIC, CLIMATE, MAGNETIC POLE MOTION, GALACTIC COSMIC RADIATION, CHARGED PARTICLES, FINE AEROSOL FORMATION, RADIATION TRANSFER, LOWER CLOUDS DECAY