



ВОЗМОЖНАЯ СВЯЗЬ ДВИЖЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЮСА И ИЗМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ С КЛИМАТОМ АРКТИКИ. ЧАСТЬ 3

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

Завершение анализа возможного влияния движения магнитного полюса и изменения солнечной активности на климат Арктики. Перемещение магнитного полюса приводит согласно нашей гипотезе к перемещению некоторой эффективной зоны, внутри которой повышена вероятность образования аэрозолей и тонких облаков на основе ионных кластеров на высотах ~4-50 км. При этом указанная вероятность возрастает при уменьшении солнечной активности в результате усиления действия галактического космического излучения. В предыдущей части статьи оценивался сумеречный эффект увеличения потока излучения на поверхности при появлении аэрозолей и тонких облаков в рассматриваемой области Арктики в полосах поглощения в УФ и ближней ИК областях спектра. В данном разделе впервые показывается, что в видимой области спектра и вне сильных полос поглощения в УФ и ближней ИК областях спектра также существует аналогичный сумеречный эффект при появлении аэрозольных и тонких облачных слоев, но только в том случае, если эти слои образуются над облаками нижней тропосферы. Обсуждается возможный климатический эффект в Арктике при движении магнитного полюса и изменения солнечной активности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АРКТИКА, КЛИМАТ, АЭРОЗОЛЬНЫЕ И ОБЛАЧНЫЕ СЛОИ, ИНДИКАТРИСА РАССЕЯНИЯ, СУМЕРЕЧНЫЙ ЭФФЕКТ РАССЕЯНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей, второй части статьи, было показано, что при увеличении аэрозольной составляющей и тонких облаков на высотах ~4-50 км в определенной ранее зоне вокруг магнитного полюса может возрастать поток солнечного излучения на арктической поверхности в полосах поглощения в УФ и ближней ИК области спектра. Однако это не означает, что полный радиационный баланс при появлении этих рассеивающих слоев будет положительным и суммарный поток излучения во всем спектральном диапазоне увеличится на поверхности Арктики. Действительно, в видимом диапазоне спектра и вне сильных полос поглощения в УФ и ИК области спектра, появление рассеивающих слоев в рассматриваемой области приведет к уменьшению потока излучения, поступающего к поверхности. Учитывая широкий спектральный диапазон видимой области спектра и достаточно большие спектральные интервалы в ближней ИК области спектра с небольшим поглощением, суммарный баланс энергии поступающий к поверхности, вероятно будет отрицательным.

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: yury_belikov@mail.ru

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

Однако, указанный вывод справедлив при отсутствии облачности в нижней тропосфере. В присутствии этой облачности суммарный поток энергии поступающей к поверхности при появлении рассеивающих слоев в высотном диапазоне 4-50 км, как будет показано ниже, может увеличиться. Учитывая, что доля облачных дней от общего количества дней времени года составляет в среднем 70-80 % [Schweiger et al., 1999; Wang et al., 2003], рассматриваемый в данной части статьи механизм увеличения потока энергии на арктическую поверхность, может служить обоснованием выдвинутой нами гипотезы.

1 СУМЕРЕЧНЫЙ ЭФФЕКТ УВЕЛИЧЕНИЯ ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ К АРКТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ, СОЗДАВАЕМЫЙ АЭРОЗОЛЬНЫМИ СЛОЯМИ И ОБЛАКАМИ НА ВЫСОТАХ ~4-50 КМ ПРИ НАЛИЧИИ ОБЛАЧНОСТИ В НИЖНЕЙ ТРОПОСФЕРЕ

Сумеречный эффект увеличения потока излучения к арктической поверхности при появлении аэрозольных и облачных слоев существует не только внутри полос поглощения в УФ и ближней ИК областях спектра, но и вне полос поглощения, а также в видимой области спектра в присутствии облачности в нижней тропосфере. Сумеречный эффект зависит от целого ряда условий, при этом зенитный угол Солнца для выраженного проявления этого эффекта должен превышать ~60—70 градусов. При этом предполагается, что Солнце находится выше горизонта.

Принципиальная схема такого механизма увеличения солнечного потока на поверхности в условиях арктических сумерек демонстрируется на рис 1. Здесь показаны два рассеивающих слоя: один из которых внизу соответствует нижней тропосферной облачности, другой – вверху – аэрозольному или более оптически тонкому облачному слою в верхней тропосфере или стратосфере.

Предполагается, что оптическая толщина нижней тропосферной облачности достаточно велика, чтобы существенно ослабить прямой солнечный поток в условиях сумерек. Поэтому основную роль в переносе излучения в этом случае играет рассеянное излучение. Учитывая, что нижняя тропосферная облачность состоит из более крупных частиц, чем тонкая верхняя облачность, интенсивность рассеянного излучения отдельными частицами верхнего слоя в направлении надир может существенно превышать аналогичную интенсивность излучения частицами нижнего слоя в сумеречных условиях. При этом угол рассеяния излучения в надир совпадает с зенитным углом Солнца (рис. 1).

Это следует из того, что частицы нижней тропосферной облачности в большинстве случаев рассеивают по закону Ми [Mie, 1908], тогда как мелкие частицы — по закону Рэлея или близкому к нему закону. Поэтому отношение индикатрис рассеяния $P_1(\theta)/P_2(\theta)$, соответствующих первому и второму слою, может достигать нескольких порядков величины в широком спектральном диапазоне в сумерках, особенно при углах рассеяния θ , близких к 90 градусам, когда Солнце приближается к горизонту.

Поэтому, несмотря на общее увеличение оптической толщины атмосферы при появлении верхнего рассеивающего слоя над нижней облачностью, может произойти увеличение солнечного потока на арктической поверхности из-за указанного выше индикатрисного эффекта. Это подтверждают расчеты, проведенные на основе решения уравнения переноса излучения с учетом вклада многократного рассеяния солнечного света. Рассматриваемый эффект зависит от целого ряда условий, включая длину волны солнечного излучения, соотношение оптических толщин верхнего и нижнего рассеивающих слоев, зенитный угол Солнца и др.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ СУМЕРЕЧНОГО ЭФФЕКТА РАССЕЯНИЯ СОЛНЕЧНОГО СВЕТА ДВУХСЛОЙНОЙ АТМОСФЕРОЙ

2.1 Исходные данные для моделирования сумеречного эффекта в Арктике

На рисунке 2 показано высотное распределение коэффициента рассеяния двухслойной атмосферы, которое принималась для оценки сумеречного эффекта в Арктике. Нижний слой облачности состоит из крупных частиц микронного размера и распределен в пределах 0-10 км, в то время как верхний слой находится на высоте 10-11 км и состоит из мелких частиц, рассеивающих свет по закону Рэлея, что характерно для частиц, размер которых много меньше длины волны

падающего излучения. Оптическая толщина первого слоя 9.5, а второго 0.182. Такой характер распределения облачности наблюдался в части Арктики во время известного потепления 2007 года [Kay et al., 2008]. Данное моделирование поможет провести оценки и выявить возможность проявления сумеречного эффекта увеличения потока солнечного излучения к арктической поверхности в случае появления тонкого слоя мелких частиц над сплошной облачностью. Предварительный анализ, проведенный выше, обосновывает возможность такого эффекта.

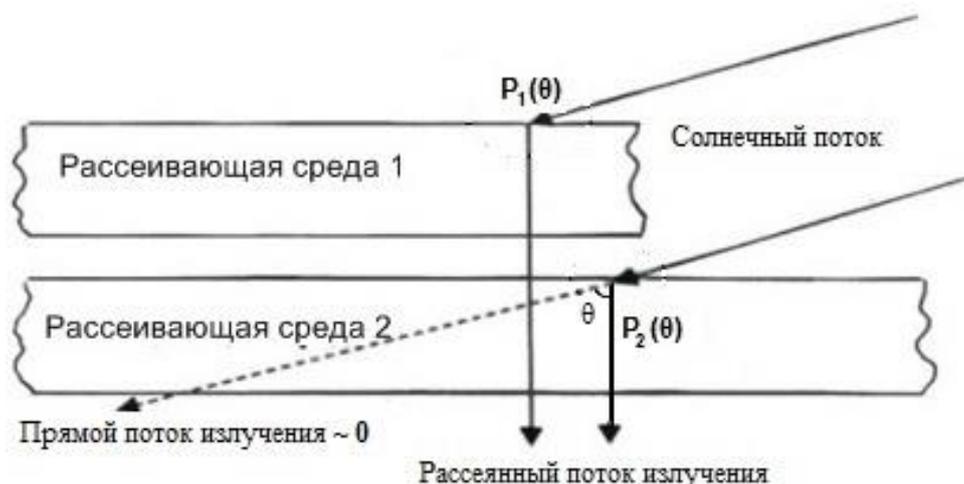


Рис. 1. Обобщение сумеречного эффекта на случай двух рассеивающих слоев с разными индикатрисами рассеяния $P_1(\theta)$ и $P_2(\theta)$, где θ - угол рассеяния. Несмотря на то, что оптическая толщина двухслойной атмосферы больше однослойной, поток излучения на поверхности может быть больше в случае двухслойной атмосферы из-за индикатрисного эффекта (см. текст).



Рис. 2. Исходные данные для моделирования сумеречного эффекта двухслойной рассеивающей атмосферы. Нижний рассеивающий слой имеет оптическую толщину $\tau=9.5$, индикатриса рассеяния представлена на рис. 3. Верхний слой имеет оптическую толщину $\tau=0.182$, индикатриса рассеяния рэлеевская.

Средний размер частиц нижней тропосферной облачности может составлять несколько микрон и более [Мак-Картни, 1979]. Для моделирования индикатрисы рассеяния мы рассчитали по теории Ми индикатрисы для частиц размеров 3-10 мкм и взяли некоторую осредненную индикатрису, показанную на рис. 3 зеленым цветом.



Рис. 3. Исходные данные для моделирования сумеречного эффекта двухслойной рассеивающей атмосферы. Показаны рассчитанные по теории Ми индикатрисы рассеяния частиц облаков различных размеров, а также модельная индикатриса, соответствующая нижнему слою облачности на рис.2.

2.2. Результаты расчетов сумеречного эффекта в Арктике

На рисунках 4 и 5 показаны результаты расчета, выполненные на основе модели, основанной на решении уравнения переноса излучения в сферической атмосфере [Беликов et al., 1993; Belikov, 1996; Belikov et al., 2000, Belikov and Gurvich, 1995; Petropavlovskikh et al., 1996; Postlyakov et al. 2001; Беликов и др., 2018a; Беликов и др., 2018b; Беликов и др., 2018c]. Исходные данные для расчетов - высотное распределение коэффициентов рассеяния и индикатрисы рассеяния указаны выше (рис. 2 и рис. 3).

На рисунке 4 вверху представлены результаты расчета потоков солнечного излучения внутри нижней облачности на высотах 0—10 км для двух случаев. В расчетах учитывался как прямой солнечный поток, так и поток рассеянного излучения в однократном приближении. В первом случае (синяя кривая) отсутствует верхний оптически тонкий слой на высоте 10—11 км (рис. 2). Во втором случае расчеты производились для двухслойной атмосферы в присутствии верхнего тонкого слоя.

Как видно из этого рисунка, поток излучения для однослойной атмосферы превышает поток двухслойной атмосферы только на верхнем крае нижнего слоя (~7—10 км). Тогда как в нижней части нижнего слоя (~0—7 км), а значит и на выходе из нижнего слоя у поверхности Земли поток излучения двухслойной атмосферы превышает поток излучения однослойной атмосферы.

Таким образом, подтверждается существование сумеречного эффекта для рассматриваемых условий. Однако эффект увеличения потока излучения при появлении оптически тонкого верхнего слоя моделировался только в приближении однократного приближения. Сохранится ли этот эффект при учете эффектов многократного рассеяния? С целью выяснения этого вопроса были проведены расчеты, учитывающие вклад многократного рассеяния.

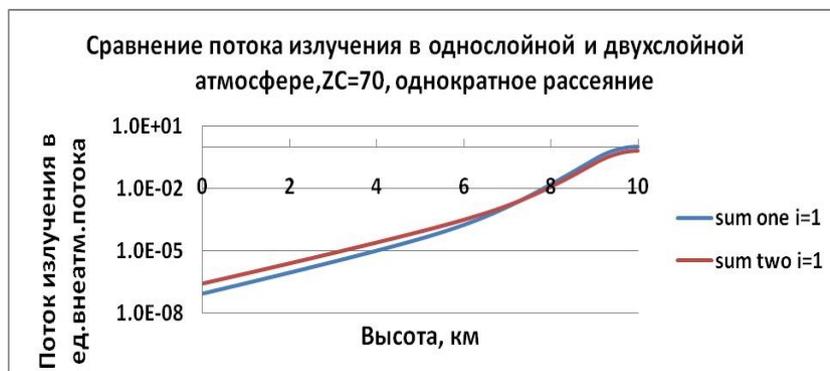


Рис. 4. Результаты расчета по модели переноса излучения в приближении однократного рассеяния. Демонстрируется увеличение потока излучения в нижней части атмосферы в двухслойной модели (красная линия) по сравнению с однослойной (синяя линия). Исходные данные представлены на рис. 2 и 3. Зенитный угол Солнца 70 градусов.

На рисунке 5 представлены результаты расчетов потоков излучения для рассматриваемых условий с учетом вклада многократного рассеяния. Решение уравнения переноса выполнялось методом последовательных порядков излучения [Беликов et al., 1993; Belikov et al., 2000; Беликов et al., 2018a; Беликов et al., 2018b; Беликов et al., 2018c], при этом для полной сходимости решения необходимо было учесть 240 итераций.

Как видно из рисунков 4 и 5, потоки излучения с учетом многократных эффектов в глубине нижнего облака и на выходе из него на несколько порядков величин превышают аналогичные расчетные потоки излучения в однократном приближении. В то же время, сумеречный эффект увеличения потока при появлении верхнего слоя сохраняется. При этом отношение потока двухслойной атмосферы к потоку в однослойной атмосфере на у земной поверхности несколько уменьшается при учете многократного излучения.

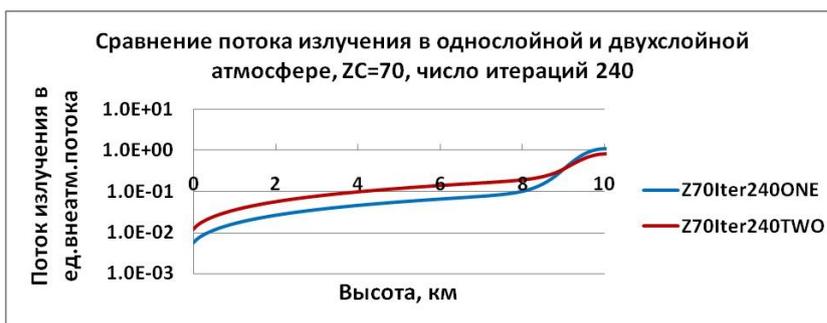


Рис. 5. Результат расчета потоков излучения по модели переноса излучения с учетом 240 рассеяний. Демонстрируется увеличение потока излучения в нижней части атмосферы в двухслойной модели (красная линия) в сравнении с однослойной (синяя линия). Исходные данные представлены на рис. 2 и 3. Зенитный угол Солнца 70 градусов.

Как видно из рисунка 6, где представлены указанные отношения потоков с учетом и без учета многократного вклада, отношения соответствующих потоков у земной поверхности в однократном приближении составляет примерно 3, в то время с учетом многократного вклада это отношение несколько уменьшается и составляет 2.2, причем последнее соотношение сохраняется практически неизменным и для других высот в диапазоне ~ 0-8 км. При этом, по сравнению с однократным приближением происходит сдвиг высоты, на которой пропадает сумеречный эффект усиления потока солнечного излучения (отношение меньше 1), к верхней границе нижнего слоя (рис. 6).

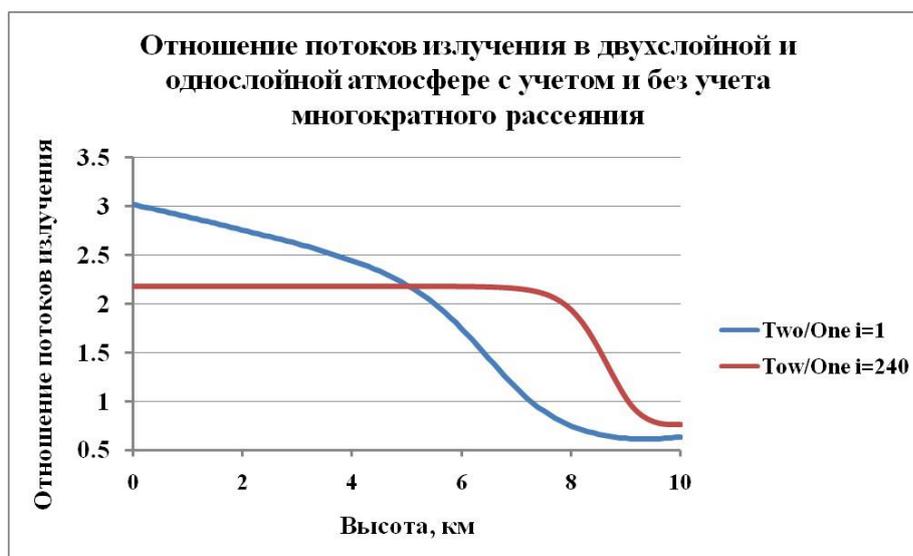


Рис. 6. Отношения потоков излучения в двухслойной атмосфере и однослойной атмосфере в приближении однократного рассеяния и с учетом многократно рассеянного излучения, полученные на основе результатов вычислений по модели переноса излучения (рис. 2-5).

Таким образом, показано, что появление аэрозоля и тонких облаков в условиях сумерек в Арктике в верхней тропосфере и стратосфере может увеличить поступление солнечного потока в нижнюю тропосферу и земную поверхность при наличии в нижней тропосфере облачности. Важным является то, что этот эффект может увеличить поступление солнечной энергии к арктической поверхности как в видимой области спектра, так и в УФ и ближней ИК области спектра вне сильных полос поглощения. При этом анализ показывает (здесь не приводится), что если нижний слой (рис.1) может не только рассеивать солнечный свет, но и частично поглощать его, то это усиливает рассматриваемый сумеречный эффект.

Необходимо отметить, что рассмотренный сумеречный эффект может проявляться только при наличии в нижней тропосфере облачности. В случае же отсутствия нижней облачности, появление аэрозольных и облачных слоев в верхней тропосфере и стратосфере будет сопровождаться ослаблением солнечного излучения, как в видимой области спектра, так и в УФ и ближней ИК области спектра вне сильных полос поглощения. Поэтому полный радиационный баланс и климатический эффект в Арктике зависит от целого ряда факторов таких как количество облачных дней в Арктике, распределение и оптические характеристики аэрозоля, а также облаков в верхней тропосфере и стратосфере, которые в свою очередь зависят от положения магнитного полюса и солнечной активности и др. Сделанные оценки сумеречного эффекта это только предварительные результаты, указывающие на возможное влияние рассматриваемых процессов на климат Арктики, требуется дальнейший анализ и тщательные расчеты радиационного баланса во всей области спектра от УФ до ближней ИК с учетом всех особенностей арктического региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает, что изменения ледового покрова и климата Арктики за последние десятилетия 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, к потеплению арктической зоны в целом, в то время как сдвиг магнитного полюса за это время привел к региональным отличиям в изменении климата в Арктике. Особенности изменения ледового покрытия – значительное уменьшение 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 энергии протонов $\sim 1-100$ МэВ. Размер этой области составляет $\sim 2500-3000$ км, и она движется вместе с магнитным полюсом от берегов Канады в сторону Российской зоны Арктики. Основным климатический эффект при этом могут создавать аэрозольные и облачные слои на высотах $\sim 4-50$ км, образованию которых способствуют заряженные частицы, создаваемые в полярной атмосфере галактическими космическими лучами. При этом основными рассеивающими 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.

Предварительный анализ показывает, что механизм ускоренного потепления Арктики и таяния ледового покрытия может быть связан с так называемым сумеречным эффектом рассеяния солнечного света на аэрозольных и облачных слоях на указанных высотах. Этот эффект в условиях длинных арктических сумерек и при наличии большей части времени облачности в нижней тропосфере по нашему мнению может обеспечить положительный баланс поступления солнечной энергии к арктической поверхности. Эти предварительные результаты требуют дальнейших тщательных расчетов климатического эффекта с учетом всех особенностей и условий, характерных для арктического региона.

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

ЛИТЕРАТУРА

- Беликов Ю.Е., Николайшвили Ш.С. и Перадзе Р.К. Модель рассеяния солнечного света на искусственном сферическом газодисперсном облаке в верхней атмосфере Земли // *Космические исследования*. – М.: Наука, 1993, т.31, вып.1, с.135-142.
- Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Николайшвили Ш.С. Математическая модель переноса излучения в сферической гетерофазной среде. Часть 1. Гелиогеофизические исследования выпуск 17, 77-86, 2018. <http://vestnik.geospace.ru/php/download.php?id=UPLFe3371719b186369bf3dcb9e8106823d.pdf>
- Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Николайшвили Ш.С. Математическая модель переноса излучения в сферической гетерофазной среде. Часть 2. Гелиогеофизические исследования выпуск 18, 18-31, 2018. <http://vestnik.geospace.ru/php/download.php?id=UPLF80dc9597df5aa58bb8ecbc02fb50f50e.pdf>
- Беликов Ю.Е., Дышлевский С.В., Николайшвили Ш.С. Математическая модель переноса излучения в сферической гетерофазной среде. Часть 3. Гелиогеофизические исследования выпуск 18, 32-39, 2018. <http://vestnik.geospace.ru/php/download.php?id=UPLFe11eaf48d83f189c910ebd5575972e52.pdf>
- Мак-Картни Э. Оптика атмосферы. – М.: Мир, 1979. – 421 с.
- Belikov Yu.E. Modelling of the twilight sky brightness using a numerical solution of the radiation transfer equation. // *J. of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1996, vol.58, No.16, pp.1843-1848.
- Belikov Yu.E., Romanovsky Yu.A., Nikolaishvili Sh.S., Peradze R. Numerical model of scattering radiation in the earth atmosphere for scientific investigations and applications // *Phys. Chem. Earth (B)*, 2000, No. 5-6, pp.427-430.
- Belikov Yu.E., Gurvich A.V. Influence of the multiple scattering radiation and aerosol component on the twilight atmosphere images from space // *SPIE Proceedings*, 1995, Vol. 2582, pp.144-153.
- Kay J. E., L'Ecuyer T., Gettelman A., Stephens G., and O'Dell C. The contribution of cloud and radiation anomalies to the 2007 Arctic sea ice extent minimum. *GRL*, Vol. 35, L08503, 2008
- Mie G. A contribution to the optics of turbid media, especially colloidal metallic suspensions // *Annal. Phys.*, 1908, vol. 25, N 4, p.377—445.
- Petropavlovskikh, I., DeLuise, J., Herman, B., Loughman, Bartia, P.K., Mateer, C.L., Lenoble, J., and Belikov, Yu.E. A comparison of radiance calculations by spherical atmosphere radiation transfer codes for modelling the Umkehr effect // *Proc. of the XVIII Quadrennial Ozone Symposium*, L'Aquila, Italy, p.163-166, 1996.
- Postlyakov O.V., Belikov Yu.E., Nikolaishvili Sh.S., Rozanov A. A. Comparison of radiation transfer algorithms for modelling of the zenith sky radiance observations used for determination of stratospheric trace gases and aerosol // *IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation*, W. L. Smith and Yu. M. Timofeyev (Eds.). A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia, 2001, pp.885-888.
- 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), p. 1845—1848.
- Wang X., Key R.J. Recent trends in arctic surface, cloud, and radiation properties from space // *Science*, 2003, 299 (5613), p. 1725—1728.

POSSIBLE RELATIONSHIPS OF MAGNETIC POLE MOTION AND SOLAR ACTIVITIES VARIATIONS WITH ARCTIC CLIMATE CHANGE. PART 3

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

The analysis of the possible effect of the magnetic pole motion and the solar activity changes on the Arctic climate is concluded. According to our hypothesis the magnetic pole motion gives rise to the displacement of a certain effective zone inside of which the higher probability of aerosols and thin clouds formation on the basis of ion clusters at the altitudes of ~4—50 km is anticipated. This probability rises when the galactic cosmic radiation increases under the conditions of the solar activity fall. In the previous article the twilight effect of the radiation flow increase at the Earth surface in a case of aerosol and thin clouds occurrence in the Arctic region in the absorption bands in UV and near IR spectral ranges was considered. In Part 3 it is shown for the first time that the same twilight effect exists also in the visible, in UV outside from the strong absorption bands, and in the near IR ranges in the case of aerosol and thin clouds layers but only under the conditions of the emerging of these layers over the troposphere lower clouds. A possible climatic effect in Arctic caused by the magnetic pole motion and solar activity changes is discussed.

KEYWORDS: ARCTIC, CLIMATE, AEROSOL AND CLOUD LAYERS, PHASE FUNCTION, TWILIGHT SCATTERING EFFECT