



УДК [524.1+551.510.41+551.521.31:551.583+551.524.7+551.576]

ВОЗМОЖНОЕ ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ОБРАЗОВАНИЕ И ВТОРИЧНЫЙ РОСТ ЛЕДЯНЫХ ЧАСТИЦ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ

Ю. Е. Беликов¹, С. В. Дышлевский¹, А. Ю. Репин¹¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, Москва, Россия

Выдвинута гипотеза, что космические лучи в верхней тропосфере и нижней стратосфере (ВТНС) способствуют вторичному образованию ледяных частиц при поступлении влаги в эту область. При этом ключевую роль играет конденсация на ионах паров жидкости, содержащих такие кислоты как азотная и серная. Образующиеся в результате такой конденсации капли могут не замерзнуть или замерзнуть только частично при низких температурах в ВТНС. Эти частицы могут прилипать к более крупным ледяным кристаллам, способствуя образованию окаймления, которое разрушается под действием ветра и столкновений кристаллов льда. Образованные таким образом мелкие частицы в результате небольшой скорости оседания по сравнению с крупными кристаллами образуют слои, существующие длительное время в ВТНС. Эти слои мелких частиц согласно нашему анализу играют значительную роль в климатических изменениях в Арктике.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, ВЕРХНЯЯ АТМОСФЕРА, ВТОРИЧНЫЙ РОСТ ЛЬДА, ДОЛГОЖИВУЩИЕ СЛОИ ЧАСТИЦ

DOI 10.5425/2304-7380_2022_33_32

<https://elibrary.ru/cdutvk>

1. ВВЕДЕНИЕ

Наш анализ показал, что космические лучи способствуют образованию мелкодисперсного аэрозоля. В то же время, механизм роста частиц не совсем ясен. Остается целый ряд вопросов. Например, могут ли космические лучи обеспечить в определенных условиях рост частиц до размеров крупных ледяных кристаллов (~300 мкм), которые наблюдаются в перистых облаках в верхней тропосфере, или этот рост ограничен размером частиц в несколько микрон, как это происходит при вспышках на Солнце [Mironova et al., 2012; Mironova and Pudovkin, 2005]? Учитывая, что именно мелкодисперсная часть образованных частиц, по нашему мнению, влияет на климатические изменения, происходящие в последние десятилетия, важным остается также вопрос об изменении концентрации мелкодисперсной фракции частиц в условиях возможного роста влажности и/или понижения температуры. Остаются также вопросы, связанные с механизмом образования жидких частиц, в состав которых входят молекулы кислот и которые могут не замерзнуть даже в условиях низких температур верхней тропосферы и стратосферы. Жидкие частицы, согласно нашей гипотезе, играют ключевую роль в образовании вторичных мелкодисперсных частиц через механизм прилипания к более крупным ледяным кристаллам и разрушения создаваемой таким образом окантовки. Эти вопросы будут рассмотрены ниже.

Электронная почта авторов для переписки:

Беликов Юрий Евгеньевич, e-mail: yury_belikov@mail.ru
Дышлевский Сергей Викторович, e-mail: sergiodd@mail.ru<https://elibrary.ru/cdutvk>Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические
исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

2. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДЯНЫХ ЧАСТИЦ В ОБЛАКАХ СРЕДНЕГО И ВЕРХНЕГО УРОВНЕЙ С УЧАСТИЕМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ, ОБРАЗОВАННЫХ КОСМИЧЕСКИМИ ЛУЧАМИ

2.1. Модель конденсации на ионе, образование мелких жидких частиц с добавками кислот

Экспериментально возможность конденсации паров жидкости была показана Вильсоном в его известных камерах [Wilson, 1912]. В то же время долгое время для теоретической оценки конденсации на ионе использовалась оценка на основе эффекта Кельвина, который заключается в уменьшении поверхностного натяжения капли при наличии на ней поверхностного заряда. Согласно уравнению Кельвина, степень насыщения паром жидкости S при температуре T , необходимая для конденсации на капле радиусом r определяется следующим образом [Райст, 1987]:

$$S = \frac{P}{P_{\infty}} = \frac{n}{n_{\infty}} = e^{\frac{2\gamma M}{\rho R T r}} \quad (1)$$

Здесь P и P_{∞} — давление пара над каплей и над плоской поверхностью, соответственно, n и n_{∞} соответствующие концентрации молекул паров жидкости, γ коэффициент поверхностного натяжения жидкости, M молекулярный вес жидкости, ρ плотность жидкости, R универсальная газовая постоянная и T окружающая температура в градусах Кельвина.

Расчеты показывают, что для образования капли согласно (1) необходимо преодолеть порог насыщения ~ 4 (рис. 1).

Однако, как было впервые показано в работе Лапшина с коллегами [Лапшин и др., 2002], в уравнении Кельвина не было учтено дипольное взаимодействие поляризованных молекул жидкости с ионом. В работе [Лапшин и др., 2002] были получены важные уточнения на основе анализа химического потенциала. Аналогичные оценки были сделаны в работе [Belikov and Nikolayshvili, 2016] на основе собственного подхода учета дипольного взаимодействия молекул с ионом. Остановимся более подробно на результатах, полученных в работе [Belikov and Nikolayshvili, 2016].

С учетом дипольного взаимодействия молекул паров жидкости с ионом, распределение молекул n в окружении иона определяется уравнением Больцмана:

$$\frac{n_{ion}}{n_{\infty}} = e^{-\frac{W}{kT}} \quad (2)$$

где W — энергия взаимодействия молекулы с ионом, она зависит от угла θ , под которым диполь ориентируется относительно вектора электрического поля и в среднем:

$$W = -\frac{|qp|\langle \cos \theta \rangle}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Здесь p дипольный момент молекулы, q заряд иона. Статистически среднее значение $\langle \cos \theta \rangle$ можно рассчитать с помощью функции Ланжевена:

$$\langle \cos \theta \rangle = L(x) = \text{cth } x - \frac{1}{x}$$

где

$$x = -\frac{W_0}{kT} = \frac{|qp|}{4\pi\epsilon_0 r^2 kT}$$

Это означает, что если построить воображаемую сферическую поверхность радиуса r вокруг иона, то степень насыщения S_{ion} , необходимая для конденсации пара на этой поверхности, будет определяться соотношением уравнений (1) и (2):

$$S_{ion} = e^{\frac{2\gamma M}{\rho R T r}} / \frac{|qp| \cos \theta}{e^{4\pi k T \epsilon_0 r^2}} \quad (3)$$

Это условие выполняется на сферической капле радиуса r , поверхность которой представляет собой границу раздела жидкость-газ. Важно, что на этой поверхности концентрация газа и степень насыщения необходимая для процесса конденсации определяется по формулам (2) и (3). Этот вывод следует из того, что поле дипольных молекул жидкости, расположенных симметрично относительно иона, практически равно нулю в газовой среде, в том числе на поверхности капли. Таким образом, поле иона не экранируется жидкой средой в газовой среде. Это верно по крайней мере для размера капли, при котором функция Ланжевена близка к 1 для всех молекул внутри капли. По нашим оценкам, $L(x) = 0,9$ для молекул на поверхности капли размером (радиусом) примерно 8 Å. Это значение может рассматриваться как условная граница, внутри которой молекулы жидкости обладают полной симметрией.

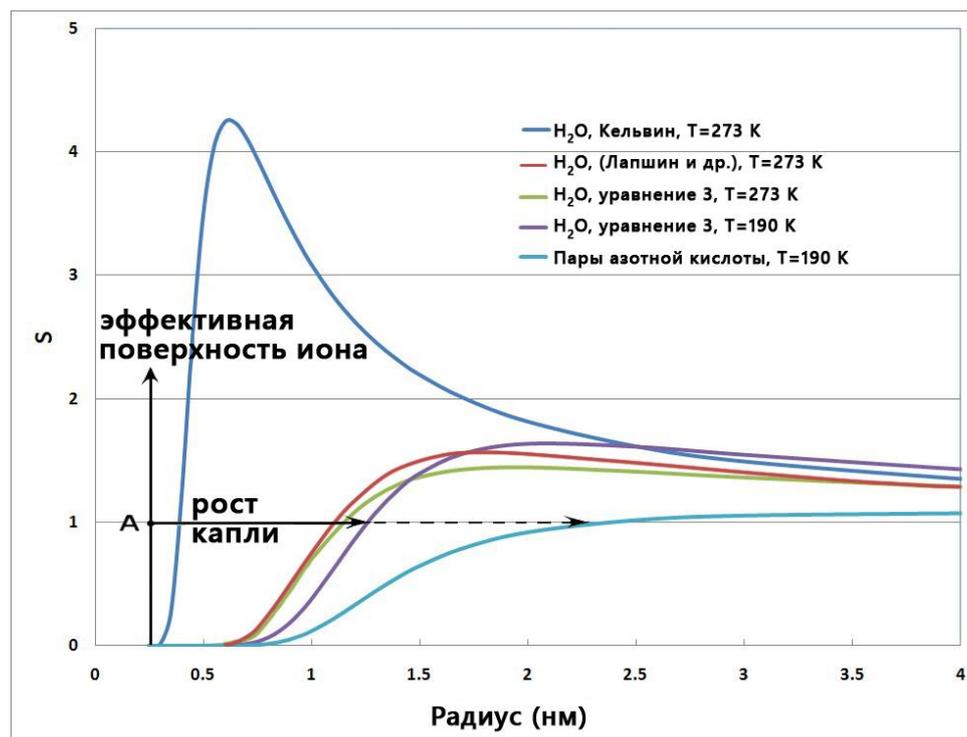


Рис. 1. Степень насыщения паров жидкости S , необходимая для конденсации на капле, в центре которой находится одновалентный ион [Belikov and Nikolayshvili, 2016]. Оценки степени насыщения парами воды сделаны на основе уравнения Кельвина для температуры 273 К (синяя кривая), а также согласно выводам работы Лапшина с коллегами [Лапшин и др., 2002] (красная кривая) и уравнению (3) для температуры 273 К и 190 К (зеленая и фиолетовые кривые, соответственно). Голубая кривая построена для паров азотной кислоты

На рисунке 1 приведены данные расчетов необходимого насыщения паров жидкостей для образования мелких капель для различных случаев конденсации на одновалентном ионе. Образование капель жидкости должно начинаться при превышении насыщения, равного единице. Как отмечалось выше, учет только эффекта Кельвина (влияние поверхностного натяжения капли) (1) приводит к тому, что фактически необходимо насыщение, превышающее 4 для начала образования капель. В то же время, если учитывать дипольное взаимодействие молекул паров жидкости с ионом, конденсация может идти при гораздо меньших степенях пересыщения. При этом эффект Кельвина практически нейтрализуется для молекул жидкостей, обладающих большим дипольным моментом.

Для сравнения на рисунке 1 показаны результаты расчетов, проведенных для молекул воды при разных температурах по уравнению (3), а также результаты, полученные по модели Лапшина с коллегами [Лапшин и др., 2002] и модели [Belikov and Nikolayshvili, 2016].

Как видно из рисунка 1, наиболее легко протекает конденсация молекул жидкости с высокими дипольными моментами. Результаты расчетов для азотной кислоты HNO_3 показывают, что

необходимое пересыщение при этом составляет несколько процентов. Отметим, что дипольный момент молекулы азотной кислоты (2,17 Д) превышает дипольный момент молекулы воды (1,85 Д).

Полученные результаты показывают, что в ВТНС, где под действием космических лучей образуется значительное число ионов, существуют условия для эффективного образования мелких капель, в составе которых присутствуют молекулы с высокими дипольными моментами. В основном это молекулы азотной и серной кислоты, присутствующие в верхней полярной атмосфере. Образование таких капель, незамерзающих или частично замерзающих при низких температурах, необходимо для механизма вторичного образования ледяных частиц в ВТНС. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

2.2. Теория вторичного образования льда и её возможное обобщение для верхней тропосферы и стратосферы

Проведенный анализ показывает, что космические лучи, являющиеся источником мелкодисперсного аэрозоля в верхней тропосфере и стратосфере, могут инициировать процесс вторичного образования мелкодисперсного аэрозоля во время образования ледяных облаков среднего и верхнего уровней на высотах, больших примерно ~2—4 км. Обычно образование этих облаков происходит во время событий, связанных с понижением температуры в рассматриваемых областях атмосферы, а также с поступлениями влаги вместе с восходящими потоками воздуха из нижней тропосферы.

Рассмотрим более подробно процесс вторичного образования льда в атмосфере Земли [Field et al., 2017]. Вторичный рост ледяных частиц, в том числе в результате образования окантовки ледяных кристаллов, исследовался и рассматривался в целом ряде работ [Harris-Hobbs and Cooper, 1987; Mossop, 1985; Griggs and Choulaton, 1986; Hallett and Mossop, 1974; Field et al., 2017]. При этом было показано, что создание окантовки, которое относится к так называемому вторичному росту кристаллов, может более чем на порядок величины превышать первичный рост.

Еще в работах Моссопа и других авторов [Hallett and Mossop, 1974; Mossop 1978; Griggs and Choulaton, 1986; Harris-Hobbs and Cooper, 1987] была выдвинута гипотеза о вторичном значительном росте кристаллизации при одновременном присутствии капель воды и кристаллов льда. Прилипание капель воды к ледяным частицам дает новые ветви роста ледяных кристаллов, при этом усложняется форма ледяных кристаллов. Оценки показывают, что мелкие капли лучше прилипают к ледяным кристаллам. Авторы упомянутых работ предположили, что значительное ускорение процесса кристаллизации достигается за счет разлома более крупных замерзающих капель воды. Замерзание таких капель идет снаружи внутрь и когда замерзание достигает ядра капли, она разламывается, а ее обломки прилипают к ледяным частицам и дают новое ускорение в кристаллизации. Согласно гипотезе, скорость вторичной кристаллизации $\sim N_L \cdot N_s^m$, где N_L — количество крупных капель воды с $r > 24$ мкм, а N_s — количество мелких с $r < 13$ мкм, m — константа, зависящая от температуры, скорости окаймления и др. Эта гипотеза, в общем, была подтверждена в ряде лабораторных работ и экспериментов [Field et al., 2017] и впоследствии получила название Hallett–Mossop процесс.

Изображения, полученные в областях облаков, где наблюдается процесс вторичной кристаллизации, показали, что наряду с ледяными кристаллами и агрегатами из ледяных частиц различной формы присутствуют крупные замороженные капли, а также мелкие капли воды и, возможно, обломки различного происхождения [Field et al., 2017]. Однако до сих пор нет детального объяснения этого явления вторичной кристаллизации [Field et al., 2017; Sullivan et al., 2018; Sotiropoulou et al., 2020].

Отметим, что большинство наблюдений вторичного роста ледяных частиц проводилось в нижней тропосфере, где за счет большой влажности частицы льда могут вырастать до больших размеров ~1 мм [Field et al., 2017]. При этом раскалывание крупных ледяных частиц и существование окантовки или процесса Hallett–Mossop ограничено диапазоном температур от -3° до -8°C [Field et al., 2017]. В верхней тропосфере и стратосфере Арктики, как отмечалось выше, температуры могут быть гораздо более низкими.

В настоящей работе выдвинута и обоснована гипотеза, что данная теория работает на больших высотах в верхней тропосфере и стратосфере и, соответственно, в условиях более низких температур. При этом крупные ледяные кристаллы образуются в основном за счет гомогенной нуклеации, основой которой служат мелкие капли воды [Sassen and Dood, 1988]. В то же время, согласно нашему анализу,

сделанному выше, источником мелких жидких частиц, в том числе переохлажденных капель, служат космические лучи, интенсивность и влияние которых особенно велики в высоких широтах Арктики.

Анализ ряда экспериментальных данных подтверждает возможность существования рассматриваемых процессов в верхней тропосфере и стратосфере [Field et al., 2017; Lawson R.P. et al., 2006].

На рисунке 2 показаны результаты комбинации самолетных и наземных лидарных измерений внутри перистого облака, выполненные в окрестности Боулдера (штат Колорадо, США) 17 октября 1983 года [Sassen et al., 1985]. На нижнем рисунке приведены величины деполаризационных отношений δ , полученные лидаром на участке ~ 10 км. На верхнем рисунке показаны концентрации кристаллов льда и капель воды вдоль трассы полета самолета, которая отмечена пунктиром на нижнем рисунке.

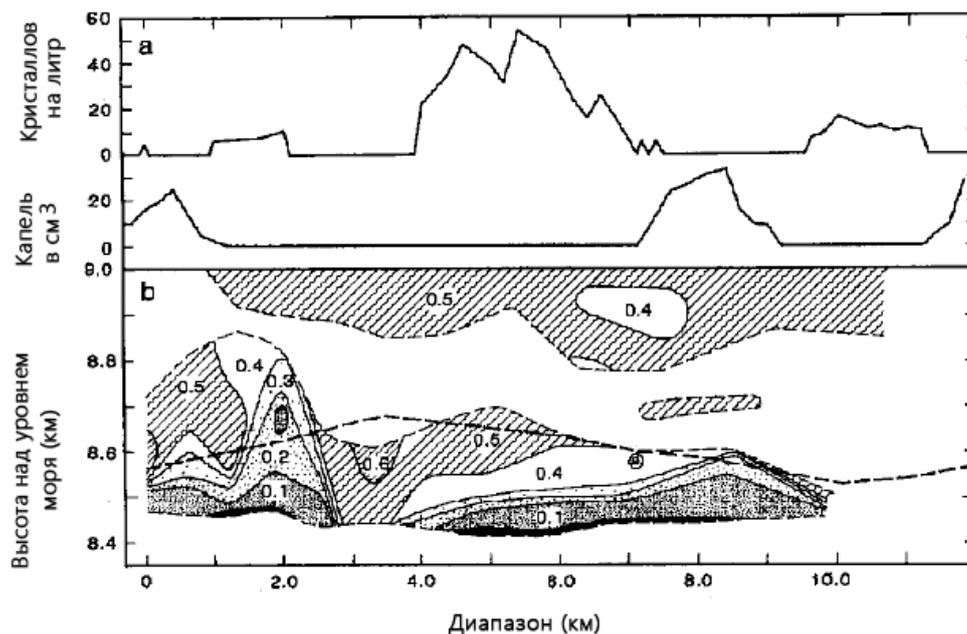


Рис. 2. Совместные самолетные и лидарные наземные измерения внутри перистого облака, выполненные в окрестности Боулдера (штат Колорадо) 17 октября 1983 года [Sassen et al., 1985]. На нижнем рисунке приведены деполаризационные отношения δ , полученные лидаром на участке ~ 10 км. На верхнем рисунке показаны концентрации кристаллов льда и капель воды вдоль трассы полета самолета, которая отмечена пунктиром на нижнем рисунке

Отметим, что деполаризационное отношение δ типичное для кристаллов льда составляет 0.5 ± 0.05 , в то время как для чистой воды это соотношение меньше 0.05. Очевидно, что при промежуточных значениях деполаризационного отношения должна наблюдаться смешанная фаза, состоящая из льда с содержанием воды. В смешанную фазу должны также входить небольшие капли, покрытые внешней оболочкой льда. Именно такие капли хорошо прилипают к крупным кристаллам льда и способствуют росту окаймления. В то же время, согласно нашей гипотезе, замерзание таких капель идет снаружи внутрь, что аналогично процессу вторичного образования льда в нижней тропосфере, и когда замерзание достигает ядра капли, она разламывается, а ее обломки прилипают к ледяным частицам и дают новое ускорение в кристаллизации.

Температура внутри перистого облака с толщиной около 2 км составляет от -50°C до -60°C , в то же время температура тех областей, где наблюдаются капли жидкости, по данным измерений лежит в интервале от -35°C до -36°C . Средний размер кристаллов льда по измерениям вдоль трассы самолета составляет ~ 50 мкм. В то же время средний диаметр капель воды составляет ~ 5 мкм, а их концентрация на участке полета самолета 15–18.5 км достигает величин от 100 до 130 капель в кубическом сантиметре.

Согласно нашей гипотезе, эти капли образуются в результате конденсации паров жидкости на заряженных частицах, образованных космическими лучами. В состав этих капель входят молекулы

кислот, таких как серная и азотная (рис. 1). Именно благодаря такому составу капли могут существовать при низких температурах, характерных для ВТНС.

Таким образом, экспериментальные наблюдения подтверждают, что в состав перистых облаков входят два вида частиц. Это крупные частицы ~ 50 мкм, являющихся, скорее всего, ледяными кристаллами (см. рис. 3), и более мелкие капли жидкости ~ 5 мкм, которые согласно теории вторичного образования льда легко прилипают к крупным ледяным кристаллам [Field et al., 2017] и могут разламываться на части при их росте и промерзании.

На рисунке 3 приведены изображения частиц неправильной формы и мелких частиц, зарегистрированных прибором 2D-S во время полета самолета в тонком перистом облаке при -50°C в ноябре 2004 года на высоте примерно 10 км над Скалистыми горами в Колорадо (США) [Lawson et al., 2006].

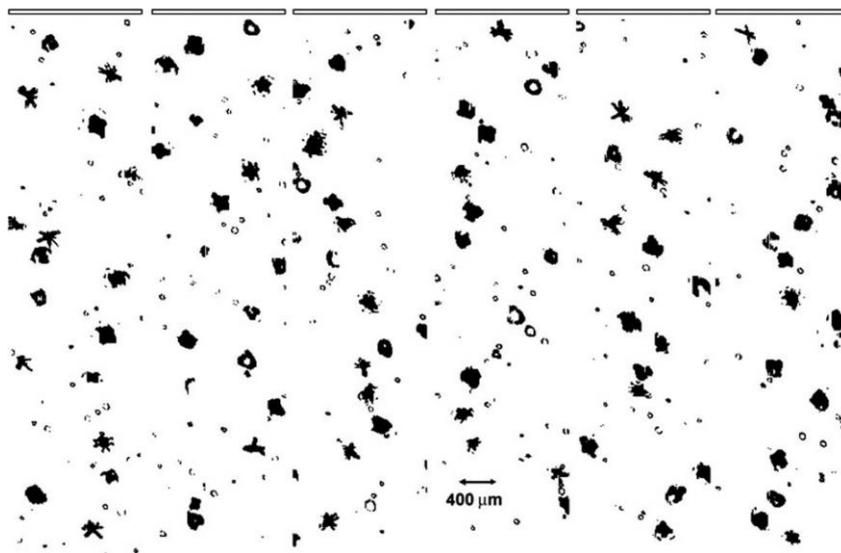


Рис. 3. Изображения частиц неправильной формы и мелких частиц, зарегистрированных прибором 2D-S во время полета самолета в тонком перистом облаке при -50°C в ноябре 2004 года на высоте примерно 10 км над Скалистыми горами в Колорадо (США) [Lawson et al., 2006]

Из этого рисунка, видно, что в составе перистого облака входят крупные частицы, по всей вероятности, это ледяные кристаллы, так как обладают неправильной формой и мелкие частицы. При этом можно различить отдельные мелкие частицы, а также мелкие частицы в составе окаймления крупных ледяных кристаллов.

При этом, как отмечалось во Введении, образование вторичного льда происходит вследствие намораживания мелких гидрометеоров (это могут быть капли воды или частично замороженные капли) на крупных кристаллах льда и разрушения создаваемого таким образом окаймления этих кристаллов из-за столкновений кристаллов и ветровой нагрузки. В то же время, как отмечалось выше, дополнительным источником мелких частиц также как и в нижней тропосфере может служить раскол на более мелкие частицы замерзающих капель при их промерзании от периферии к центру.

Отметим, что высокая концентрация мелких частиц в перистых облаках наблюдалась в целом ряде экспериментов [Gayet et al., 2002; Lawson et al., 2001; Lawson et al., 2006]. В то же время, авторы работы [Lawson et al., 2006] выдвинули предположение, что образование мелких частиц в перистых облаках может быть связано с разрушением ледяных кристаллов при их столкновении с объективом камеры. Однако следует заметить, что существование в перистых облаках двух классов частиц — мелких частиц, включая капли, а также крупных кристаллов не вызывает сомнения. Это подтверждается комбинированными лидарными и самолетными измерениями [Sassen et al., 1985] (см. рис. 2).

Таким образом, экспериментальные наблюдения подтверждают нашу гипотезу о возможности вторичного образования мелких ледяных частиц в верхней тропосфере и стратосфере.

2.3. Образование долгоживущих слоев мелкодисперсных частиц в верхней атмосфере как результат различной скорости оседания крупных и мелких гидрометеоров

В работе [Zawadzki et al., 2001] сообщается о целом ряде наблюдений за движением гидрометеоров в атмосфере после снежных бурь с помощью доплеровского радара, установленного недалеко от Монреаля. После указанных событий доплеровский лидар фиксирует две группы гидрометеоров, падающих с различными скоростями, при этом доплеровские спектры являются бимодальными. Согласно наблюдениям, выше высот, где наблюдается бимодальность (~3—5 км), отражательная способность снега сильно увеличивается. В то же время увеличивается скорость падения, которая ожидается при образовании снежных кристаллов. Авторы [Zawadzki et al., 2001] показывают, что бимодальность наблюдается после индикации процесса образования окаймления кристалла переохлажденными каплями и может быть связана с генерацией вторичного льда или переохлажденной мороси.

Анализ данных доплеровского радара, показывает, что скорость оседания мелких частиц (~2 м/сек), намного меньше скорости оседания крупных частиц (~4—7 м/сек). При этом мелкие частицы, по всей вероятности, образованы в результате процесса вторичного образования льда [Zawadzki et al., 2001].

Конечно, температуры в области высот наблюдения намного меньше, чем в перистых облаках, особенно на высотах, меньших 3 км, где температура обычно не опускается ниже -10°C . В то же время, уже на высотах, больших 5 км температура, согласно оценкам авторов, может опускаться до -20°C .

Надо отметить, что для наблюдения мелких частиц в перистых облаках разрешение радара недостаточно, необходимы лидарные наблюдения. Тем не менее, приведенные данные наглядно демонстрируют механизм высотного разделения гидрометеоров различного размера в результате процесса вторичного образования льда, который согласно нашей гипотезе возможен и на высотах верхней тропосферы и в стратосфере.

Согласно работе [Mishra et al., 2014], скорость оседания частицы диаметром ~5 мкм составляет ~0,2 см/сек. Легко получить оценку времени жизни этой частицы в ВТНС, она составляет примерно месяц при ее оседании с высоты 10 до 5 км. При этом время жизни ледяных кристаллов ~50 мкм составляет ~ 10 часов. Время жизни более крупных кристаллов, которые могут присутствовать в перистых облаках еще меньше. Так, время жизни кристаллов размером 300 мкм составляет всего 20 мин. Т.е. значительную часть времени после оседания крупных ледяных кристаллов, в ВТНС будут существовать слои мелких ледяных частиц и переохлажденных капель. Отметим, что согласно нашему анализу [Беликов и др., 2021; Беликов и др., 2020в] слои мелкодисперсных частиц в верхней тропосфере и стратосфере могут оказывать сильное влияние на таяния ледового покрытия Арктики и разрушение нижних слоев облачности.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ экспериментальных данных и теоретические оценки подтверждают, что космические лучи могут способствовать росту вторичного льда и как результат, образованию в верхней тропосфере и нижней стратосфере Земли долгоживущих слоев мелких ледяных частиц. Согласно работам [Беликов и др., 2021; Беликов и др., 2019а; Беликов и др., 2019б; Беликов и др., 2020а; Беликов и др., 2020б; Беликов и др., 2020в; Беликов и др., 2019в] такие слои мелких частиц играют ключевую роль в изменениях климата Арктики в последние десятилетия.

ЛИТЕРАТУРА

- 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*, № 4, с. 53-68, 2021. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-4-53-68
- 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/АОО20191007

- 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 26, 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 26, 50—58, 2020б.
- 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, 2020в. Часть 4. Гелиогеофизические исследования, выпуск 28, 40-54.
- Беликов Ю.Е., Буров В.А., Дышлевский С.В., Котонаева Н.Г., Лапшин В.Б., Репин А.Ю. Влияние движения магнитного полюса и изменения солнечной активности на прозрачность атмосферы и климат Арктики. Международный симпозиум “Атмосферная радиация и динамика” (МСАРД – 2019) 25-27 июня 2019 г. С. Петербург – Петродворец, тезисы доклада, с.186-187, 2019в, <http://www.irc.phys.spbu.ru/msard19/thesis.pdf>
- Лапшин В.Б., Яблоков М.Ю., Палей А.А. Давление пара над заряженной каплей // Журнал физ. химии, 2002. т.76, №10, с.1901-1903.
- Райст. Аэрозоли. – М., Мир, 1987, 278 с.
- Belikov Yu., Nikolayshvili S. 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.
- Field et. al.: Chapter 7: Secondary ice production – current state of the science and recommendations for the future, Meteor. Monogr., 58, 7.1–7.20, 2017.
- Gayet, J.-F., and Coauthors, 2002: Quantitative measurement of the microphysical and optical properties of cirrus clouds with four different in situ probes: Evidence of small ice crystals. Geophys. Res. Lett., 29, 2230–2233.
- Griggs, D. J., and T. W. Choulaton, 1986: The effect of rimer surface temperature on ice splinter production by the Hallett-Mossop process. Quart. J. Roy.Meteor. Soc.,112,1254–1256.
- Hallett, J., and S. C. Mossop, 1974: Production of secondary ice particles during the riming process.Nature,249, 26–28.
- Harris-Hobbs, R. L., and W. A. Cooper, 1987: Field evidence supporting quantitative predictions of secondary ice production rates. J. Atmos. Sci., 44, 1071–1082.
- Lawson R.P. et. al. The 2D-S (stereo) probe: design and preliminary tests of a new airborne, high-speed, high-resolution particle imaging probe, 2006. J. of Atmospheric and Oceanic Technology, v.23, pp.1462 -1477
- Lawson, R. P., B. A. Baker, C. G. Schmitt, and T. L. Jensen, 2001: An over-view of microphysical properties of Arctic clouds observed in May and July during FIRE.ACE.J. Geophys. Res.,106,14 989–15 014.
- Mironova I. A., Usoskin I. G., Kovaltsov G. A., and Petelina S. V. Possible effect of extreme solar energetic particle event of 20 January 2005 on polar stratospheric aerosols: direct observational evidence. Atmos. Chem. Phys., 12, 769–778, 2012, doi:10.5194/acp-12-769-2012
- Mironova I. A. and Pudovkin M. I. Increase in the Aerosol Content of the Lower Atmosphere after the Solar Proton Flares in January and August 2002 according to Data of Lidar Observations in Europe. Geomagnetism and Aeronomy, Vol. 45, No. 2, 2005, pp. 221–226. Translated from Geomagnetizm i Aeronomiya, Vol. 45, No. 2, 2005, pp. 234–240.
- Mishra, S., D. L. Mitchell, D. D. Turner, and R. P. Lawson (2014), Parameterization of ice fall speeds in midlatitude cirrus: Results from SPartICus, J. Geophys. Res. Atmos., 119, 3857–3876, doi:10.1002/2013JD020602.
- Mossop, S. C., 1985: Secondary ice particle production during rime growth: the effect of drop size distribution and rimer velocity.Quart.J. Roy. Meteor. Soc.,111,1113–1124
- Mossop, S.C. The influence of drop size distribution on the production of secondary ice particles during graupel growth ,1978, Quart. J. Roy. Meteor. Soc.,Volume104, Issue 440, pp. 323-330
- Sassen K., Dood G.C. Homogeneous nucleation rate for highly supercooled cloud droplets. J. of the atmospheric sciences, 1988, v. 45, No. 8, pp. 1357-1369.

- *Sassen K., Liou K.N., Kinne S. and Griffin M.* Highly supercooled cirrus cloud water: confirmation and climatic implications. *Science*, 1985, 227 (4685), 411-413.
- *Sullivan S.C., Hoose C., Kiselev A., Leisner T., and Nenes A.* Initiation of secondary ice production in clouds, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 1593–1610, 2018
- *Sotiropoulou G., Sullivan S., Savre J., Lloyd G., Lachlan-Cope T., Ekman A. M.L., and Athanasios Nenes A.* The impact of secondary ice production on Arctic stratocumulus. *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 1301–1316, 2020: <https://acp.copernicus.org/articles/20/1301/2020/>
- *Wilson, C.* 1912. “On an Expansion Apparatus for Making Visible the Tracks of Ionising Particles in Gases and Some Results Obtaining by Its Use.” *Proc. Roy. Soc. London A* 87: 277.
- *Zawadzki I. et al.* Observations of supercooled water and secondary ice generation by a vertically pointing X-band Doppler radar. *Atmospheric Research*, 59–60 (2001), 343– 359

POSSIBLE EFFECT OF THE COSMIC RAYS ON FORMATION AND SECONDARY GROWTH OF ICE PARTICLES IN THE UPPER ATMOSPHERE

Belikov Yu. E., Dyshlevsky S. V., Repin A. Yu.

A hypothesis is proposed that the cosmic rays in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS) promote the secondary formation of ice particles during upward inflow of humidity to those layers. The condensation on the ions of vapor which contains aqueous nitric and sulfuric acids is a key part in this process. The droplets which originate as a result of this reaction either do not freeze or freeze partially at low temperatures in UTLS. These droplets are able to accrete to the much larger ice crystals thus promoting the riming process with the formation of ice fringe which is destroyed by wind and ice crystals collision. The small particles which arise from this destruction have low sedimentation rate in comparison with the large crystals, and create layers which exist for a long time in UTLS. Our analysis shows that these layers of the small particles play a significant role in the climatic change in the Arctic.

KEYWORDS: COSMIC RAYS, UPPER ATMOSPHERE, SECONDARY ICE GROWTH, LONG-LIVED LAYERS