

УДК 551.578.4(537.523:551.559)(211)

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ЭМИССИИ БРОМ-СОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ, УЧАСТВУЮЩИХ В ЦИКЛЕ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ОЗОНА

Е.Ю. Ткаченко

*Институт геологических наук НАН Украины, ул. Гончара, 55-Б, г. Киев
e-mail: ktkachenko@igs-nas.org.ua*

Реферат. В статье собраны факты, касающиеся весенних циклов разрушения поверхностного озона в морской зоне полярных регионов и особой роли бром-содержащих веществ в этих процессах. Предложена точка зрения автора на механизмы эмиссии бром-содержащих соединений в условиях сильного ветра и при «хорошей погоде».

Електростатичний механізм емісії бромовмісних сполук, що беруть участь у циклі руйнування поверхневого озону. Ткаченко К.Ю.

Реферат. У статті зібрано факти щодо весняних циклів руйнування поверхневого озону в морській зоні полярних регіонів та особливої ролі бромовмісних сполук у цих процесах. Запропоновано точку зору автора відносно механізмів емісії бромовмісних сполук в умовах сильного вітру та при «гарній погоді».

Electrostatic mechanism of bromine release during ozone depletion events. Tkachenko K.Yu.

Abstract. In the investigation we discuss boundary layer ozone depletion events associated with spring and polar sea ice zone, special role of bromine in these processes and a viewpoint of author concerning mechanisms of bromine release in “fair weather” conditions and under high wind.

Key words: ozone, corona, frost flowers, wind, ozone depletion events

1. Вступление

Механизмы многих химических реакций, которые протекают на поверхности снежного покрова и морского льда полярных регионов и существенно влияют на состав атмосферы, до сих пор полностью не изучены и остаются предметом научной дискуссии. Ярким примером таких реакций являются резкие падения концентрации озона («ozone depletion events» – ODE) от уровня фона (30-35 ppt) до предела обнаружения (0,2 ppt), на которые исследователи впервые обратили внимание в 80-е годы (Oltmans, 1981; Bottenheim et al., 1986). Однако, судя по архивным данным, собранным в период первого Международного полярного года 1957-58 гг. (Roscoe et al., 2006), такие события возникали и ранее. Эти периоды характерны только для полярных регионов, причем наблюдаются они только в морской зоне, длятся от нескольких часов до нескольких дней, распространяясь на площади до нескольких миллионов квадратных километров и влияя на бюджет озона в глобальном масштабе.

Barrie et al. (1988, 89) и Bottenheim et al. (1990) показали наличие зависимости между падением концентрации озона и увеличением содержания в атмосфере соединений брома (“bromine explosions”). Согласно спутниковым данным (Global Ozone Monitoring Experiment (GOME)), наблюдаемые значения концентрации окиси брома вертикально неоднородны и в области морского льда имеют максимальные значения, превышая в местах возникновения ODE фоновые значения почти на порядок величины.

В этой статье мы попытались собрать сведения о роли бром-содержащих соединений в цикле разрушения поверхностного озона, а главное, высказать свои соображения по поводу неясного до сих пор механизма эмиссии брома из конденсированной фазы в газообразную.

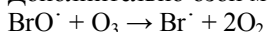
2. Почему столь существенна роль бром-содержащих соединений?

При высоких концентрациях BrO преобладают реакции

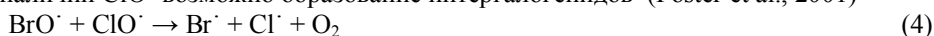


При уровне BrO[·] 10-30 ppt скорость разрушения озона составит 1-2 ppb/час, что при уровне концентрации озона 30-40 ppb приведет к его исчезновению за два дня.

Дополнительно озон может разрушаться по схеме



При наличии ClO[·] возможно образование интергалогенидов (Foster et al., 2001)



При малых концентрациях BrO[·] увеличивается вклад реакции с участием радикала HO₂[·]



Константа скорости реакции окисления галогенид иона по реакции



в случае участия атомов брома составляет $3 \cdot 10^2 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ (Finlayson-Pitts et al., 2002), что на 5 порядков выше, чем соответствующая величина для атомов хлора ($2 \cdot 10^{-3} \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$). Таким образом, окисление брома происходит значительно быстрее.

При компьютерной симуляции пространственного распределения различных ионов в растворах солей было показано, что атомы брома (так же, как и йода) располагаются ближе к поверхности, чем атомы хлора, и таким образом вероятность их участия в процессах, протекающих на поверхности, выше (Finlayson-Pitts et al., 2002).

Роль атомов йода в процессах разрушения озона считается малосущественной из-за низкого уровня концентрации этого иона.

3. Источники и условия эмиссии бром-содержащих соединений

Основные источники брома остаются до сих пор предметом дискуссии. Так, (Bartie et al., 1988; Struges et al., 1992) предположили связь между ODE и повышенным содержанием бромформа в периоды полярного весеннего цветения. Невысокое отношение смешения бромформ с атмосферой и низкое значение его фотодиссоциации ($J_{\text{CHBr}_3} \sim 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ Moortgat et al., 1993) говорят против этого предположения.

Grieß et al. (2004) на основании экспериментального материала и теоретических расчетов указали на связь между повышенными концентрациями окиси брома и наличием контакта воздушных масс с поверхностями, содержащими морскую соль. Согласно модельным построениями Jones et al. (2009), максимальный контакт газовой фазы с поверхностями, содержащими морскую соль, достигается

- а) при сильном ветре,
- б) в условиях «хорошей погоды» *.

3.1. Роль сильного ветра в падении концентрации озона

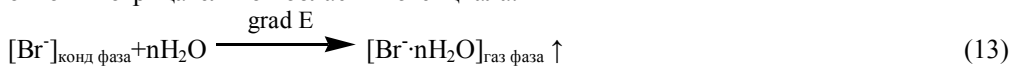
Значительное понижение концентрации озона может возникнуть, если сильный ветер (ок. 15-20 м/с) сформировался и прошел значительное расстояние над поверхностью морского льда, истирая соленый снег. Такое увеличение концентрации BrO и падение концентрации озона над морем Уэдделла 9 октября 2007 Jones et al. (2009) наблюдали в условиях сильного ветра и метели. Явление наблюдалось несколько дней и покрыло большую площадь моря Уэдделла (28 000 км²). Содержание BrO в вертикальном столбе атмосферы выросло в несколько раз и составило 1·10¹⁴ молекул см⁻².

Автор рискнул сделать предположение, что эмиссия брома из соли, присутствующей в снегу, происходит в результате сильного повышения градиента электрического поля (Tkachenko and Kozachkov, 2011). Действительно, в условиях выюги происходит значительная трибоэлектризация снега, что приводит к возникновению значительных потенциалов на поверхности. В литературе есть данные, что значения напряженности поля над поверхностью достигают 30 кВ/м (Schmidt et al., 1999), 26.2 кВ/м (Gordon et al., 2010). При таких потенциалах на остриях ледяных кристаллов (10-100 мкм) могут достигаться значения потенциала, достаточные для зажигания короны (порядка 10⁶ В/м (Френкель, 2007)). Многие полевые исследователи сообщают, что в облаках снежной пыли наблюдаются синие и фиолетовые вспышки, возникают радиопомехи.

При этом могут происходить как процессы окисления с образованием летучих соединений брома в положительной области потенциала,



так и непосредственная эмиссия бромид ионов, скорее всего окруженных гидратной оболочкой в отрицательной области потенциала.



В подтверждение изложенным выше соображениям следует отметить, что увеличение токов коронирования (point discharge current) при увеличении скорости ветра не раз исследовалось при изучении процессов, происходящих в глобальной электрической цепи (Large and Pierce, 1957, Kirkman and Chalmers, 1957). Есть также данные о «химических результатах» влияния увеличения тока коронирования. Так, Duetsch et al. (1980) показано, что резкие флуктуации концентрации озона в точке наблюдения на высоте 120 м являлись результатом усиления токов коронирования. Коронный разряд приводит к образованию озона из молекулярного кислорода и является стандартным способом получения озона в промышленных условиях, и, как правило, увеличение токов коронирования приводит к увеличению концентрации озона (как в Duetsch et al., 1980). Если же токи коронирования возникают во время метели в морской зоне, присутствие морских солей в снегу, согласно нашему предположению, приводит к эмиссии бром-содержащих веществ в атмосферу и инициирует разрушение присутствующего в этой области озона, запуская, таким образом, механизм возникновения ODE.

* Условия «хорошей погоды» соответствуют скорости ветра не более 6 м/с при отсутствии всякого рода осадков, инея, тумана, нижней облачности.

3.2. Падение концентрации поверхностного озона в условиях «хорошей погоды»

ODE в условиях «хорошей погоды», как правило, связано с присутствием молодого льда, возрастом до 1 года (Simpson et al., 2006). Действительно, в процессе роста льда морская соль выталкивается на поверхность растущего кристалла, поэтому молодой лед покрыт слоем рассола, который при старении льда постепенно вымывается. Кроме того, источником морской соли являются также растущие на молодом льду при определенном температурном режиме ледяные цветы (рис. 1).

На этих удивительных ледяных структурах, покрытых слоем рассола, который поднимается по капиллярным эффектам по «стеблю» цветка (рис. 2), следует остановиться чуть подробнее.



Рис. 1. Фотография ледяных цветов.

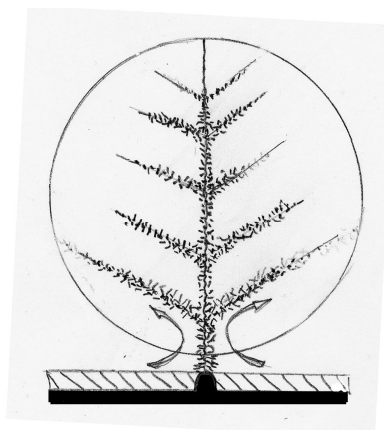


Рис. 2. Схематический рисунок ледяного цветка.

Style and Worster (2009) было показано и подтверждено в лаборатории, что формирование ледяного цветка может происходить в достаточно сухом воздухе при наличии большого градиента температур. Тонкий молодой лед, на котором растут ледяные цветы, близок по температуре к морской воде, которая находится под ним. Резкое падение температуры окружающего воздуха на 15-20°C приводит к охлаждению воздуха над поверхностью льда, который, охлаждаясь, проходит через точку росы, что ведет к росту дендритного кристалла. Образуется скелет ледяного цветка.

Формирование цветка происходит на неровностях, наростах и других дефектах, которые играют роль зародыша для роста кристалла. По скелету цветка поднимается рассол, присутствующий на поверхности молодого льда. Состав рассола определяется локальными условиями, в том числе и температурными. Постепенно весь ледяной цветок покрывается «шубой» рассола, соленость которого в среднем в три раза превышает соленость морской воды. В рассоле при охлаждении выпадают кристаллы Na_2SO_4 -мирабилита, температура замерзания которого -8°C. Морфология цветка и присутствие в его структуре четырех описанных выше фаз было изучено Alvarez-Aviles et al. (2008). Пониженное содержание сульфата отличает зимне-весенние аэрозоли, возникшие с участием ледяных цветов (Beaudon and Moore, 2009), от аэрозолей морского происхождения.

Kaleschke et al. (2004) показана связь между повышением концентрации окиси брома и зонами, где потенциально возможен рост ледяных цветов. Что является причиной эмиссии бром-содержащих соединений из конденсированной фазы в газообразную и запускает механизм с образованием летучих соединений брома, разрушающих поверхностный озон в морской зоне полярных регионов, остается неясным. Мы попытались приблизительно

подсчитать, могут ли быть в условиях «хорошей погоды» в полярных условиях на конце иглы ледяного цветка достигнуты условия возникновения тихого/коронного разряда.

Силовые линии электрического поля концентрируются у острия, и напряженность поля E возрастает. У самого острия ее подсчитывают по формуле:

$$E = U/r, \quad (I)$$

где U – потенциал, r – радиус кривизны острия.

Согласно Френкелю (2007), ионизация начинается при значениях $E \cdot 3 \cdot 10^6$ В/м, хотя в литературе встречаются и более низкие значения. Согласно Griffiths (1975), пороговое значение электрического поля, при котором начинается иницирование коронного разряда на ледяных частицах в облаках, составляет 350-400 кВ/м. А согласно Stromberg (1970), возникновение тока коронирования на иглах ели наблюдается уже при 6000 В/м. Потенциал на конце иглы ледяного цветка можно оценить по формуле

$$U = h \cdot E_0, \quad (II)$$

где h – высота цветка, E_0 – напряженность электрического поля в данной области пространства. Таким образом,

$$E = h \cdot E_0/r. \quad (III)$$

Напомним, что стебель ледяного цветка покрыт проводящим рассолом, поэтому можно условно рассматривать ледяной цветок как заземленный проводник – аналог метелочной антенны (Поляков В.Т., 2008).

Диаметр иглообразного окончания ледяного дендритного кристалла, растущего в условиях перенасыщения воздуха влагой, такого, как ледяной цветок, можно оценить по данным (Gonda, 1994), согласно которым этот параметр зависит от скорости роста кристалла и колеблется в интервале 15-30 мкм ($(1.5-3) \cdot 10^{-5}$ м). Т.е. средний радиус ледяной иглы в этих условиях $(0,7-1,5) \cdot 10^{-5}$ м или $\sim 10^{-5}$ м. Согласно Alvarez-Aviles et al. (2008), высота ледяного цветка составляет от 1 до 4 см, или $(1-4) \cdot 10^{-2}$ м.

Напомним, что вертикальная компонента электрического поля E_z увеличивается сверху вниз, достигая у поверхности Земли максимальных значений. Для средних широт характерной величиной является напряженность поля 100-130 В/м. В области полярных шапок значения напряженности выше в среднем на 25% соответствующих значений для средних широт (Tinsley et al., 2007) в результате влияния процессов взаимодействия солнечного ветра с магнетосферой Земли и более интенсивного воздействия потока космических частиц, флуктуирующего в этих областях с большей интенсивностью. Так, если средний потенциал ионосферы 200-300кВ (Tinsley et al., 2007), то в результате взаимодействия плазмы солнечного ветра со стационарным магнитным полем Земли генерируется электрическое поле, которое, как дополнительный потенциал, накладывается на глобальный ионосферный потенциал, увеличивая его значение на 30-150 кВ (Tinsley et al., 2007), что непосредственно сказывается на значении электрического поля у поверхности Земли (Burns et al., 2010, Лукьянова и соавт., 2011). Например, согласно данным (Belova et al., 2001), флуктуации E_z во время магнетосферных суббурь на станции Esrange (северная Швеция) составляли до 50% суточной вариации этого параметра. Однако во время корональных выбросов солнечной массы возможны очень резкие возрастания электрического поля, особенно в области авроральных овалов. Так, Kumar et al., 2008 на антарктической станции Матри (67,14 ю.ш., 57,44 в.д., Индия) фиксировали возрастание вертикальной составляющей электрического поля у поверхности Земли E_z до 800-1200 В/м. В работе (Kasatkina et al., 2009) проводится сравнение флуктуаций параметра E_z 15.04.2001 во время корональных выбросов солнечной массы в четырех точках наблюдения: авроральной станции Апатиты (геомагнитная широта 63.8°), полярной станции Восток (геомагн. ш. 89.3°) и среднеширотных обсерваторий им. А.И. Воейкова (геомагн. ш. 56.1°) и Nagycenk (геомагн. ш. 47.2°, Венгрия). Наибольшие флуктуации фиксировались на станции Апатиты, где параметр достигал значений 1000 В/м; значительное возрастание (до 800 В/м)

наблюдалось на станции Восток, незначительное на обсерватории им. А.И. Воейкова (200-250 В/м), и практически не фиксировалось изменения поля на среднеширотной станции Naguseenk. Эти данные еще раз подтверждают факт, что в области полярных регионов, а особенно авроральных овалов, параметр E_z в среднем выше и подвержен резким флуктуациям, особенно весной и осенью (Sivak, 2002).

Напомним также, что одно из основных условий возникновения ODE, а также условие роста ледяного цветка – это наличие градиента температур над поверхностью тонкого льда, возникающего в результате резкого падения температуры окружающего воздуха. В этой области температурного градиента над поверхностью тонкого льда возникают области локального перенасыщения воздуха влагой и условия для возникновения поверхностного тумана. Результатом возникновения тумана являются понижение проводимости воздуха, т.е. увеличение поля. Понижение проводимости происходит за счет улавливания частицами влаги в тумане (облаке) ионов проводимости (Bering et al., 1998). Согласно (Bering et al., 1998), значение электрического поля вне облака составляет около 5% значения, измеряемого внутри облака. Измерения влияния поверхностного тумана на уменьшение проводимости осуществлялись (Deshpande et al., 2004) над поверхностью океана в полярных условиях. Под влиянием тумана наблюдалось изменение проводимости в 3-5 раз. Соответственно во столько же раз увеличивались измеренные значения электрического поля. Таким образом, резкое увеличение электрического поля в периоды магнитосферных бурь и суббурь приводит к значительно большему его увеличению в области градиента температур и локального перенасыщения влагой.

Если во время магнитосферных бурь и суббурь параметр E_z возрастает до 250 В/м, в приповерхностном слое в условиях градиента температур его значение возрастает еще больше – минимум в 3 раза, достигая 750 В/м. Согласно (Libbrecht and Tanusheva, 1998), воздействие электрического поля на растущий ледяной кристалл увеличивает скорость роста и способствует формированию иглообразной морфологии кристалла.

В соответствии с формулой III можно оценить величину поля на конце иглы ледяного цветка при быстром росте дендритного кристалла, когда радиус иглы соответствует 10 мкм (10^{-5} м) (Gonda, 1994) и высота цветка достигает 4 см ($4 \cdot 10^{-2}$ м):

$$E = (250 \cdot 3 \cdot 0,04) / 10^{-5} \approx 3 \cdot 10^6.$$

Таким образом, в этих условиях, согласно нашим оценочным данным, значения поля достаточны для возникновения коронирования. Хотя, как уже упоминалось, корона является стандартным способом образования озона, однако в полярной морской зоне корона может служить также пусковым механизмом эмиссии брома с последующим его участием в процессах разложения озона.

4. Выводы

В работе рассмотрены возможности возникновения коронного разряда как механизма эмиссии брома из конденсированной среды в газообразную: 1) в результате трибоэлектризации соленого снега морской зоны во время сильного ветра; 2) на концах игл ледяных дендритных кристаллов (ледяных цветов) при совпадении ряда условий.

Литература

Alvarez-Aviles L., Simpson W.R., Douglas T.A., Sturm M., Perovich D., Domine F. Frost flower chemical composition during growth and its implications for aerosol production and bromine activation // J. Geophys. Res. – 2008. – 113. – D21304, doi:10.1029/2008JD010277.

Barrie L.A., Bottenheim J.W., Schnell R.C., Crutzen P.J., Rasmussen R.A. Ozone destruction and photochemical reactions at polar sunrise in the lower Arctic atmosphere// Nature. – 1988. – Vol. 334. – P. 138–141.

Barrie, L.A., Bottenheim, J.W., Schnell, R.C., Crutzen, P.J., and Rasmussen, R.A.: Ozone destruction and photochemical reactions at polar sunrise in the lower Arctic atmosphere // *Nature*. – 1988. – Vol. 334. – P. 138–141, doi:10.1038/334138a0.

Beaudon E., Moore J. Frost flowers chemical signature in winter snow on Vestfonna ice cap (Nordaustlandet, Svalbard) // *Cryosphere Discuss.* – 2009. – Vol. 3. – P. 159–180.

Belova E., Kirkwood S., Tammet H. The effect of magnetic substorms on near-ground atmospheric current // *Ann. Geophysicae* – 2001. – Vol. 18. – P. 1623–1629.

Bering III E.A., Few A.A., Benbrook J.R. The global electric circuit // *Physics today*. – 1998. – Vol. 51. – P. 24–30.

Bottenheim, J.W., Gallant, A.J., and Brice, K.A.: Measurements of NO_y species and O₃ at 82°N latitude // *Geophys. Res. Lett.* – 1986. – Vol. 13(2). – P. 113–116.

Bottenheim J.W., Barrie L.A., Atlas E., Heidt L.E., Niki H., Rasmussen R.A., Shepson P.B. Depletion of lower tropospheric ozone during Arctic spring: The polar sunrise experiment 1988 // *J. Geophys. Res.* – 1990. – Vol. 95. – P. 18 555–18 568.

Burns G.B., Tinsley Br.A., French W.J.R., Frank-Kamenetsky A.V., Troshichev O.A., Bering E.A. Measuring the atmospheric circuit from the antarctic plateau 38th COSPAR Scientific Assembly. 2010, Bremen, Germany, p.7

Deshpande C.G., Kamra A.K. The atmospheric electric conductivity and aerosol measurements during fog over the Indian Ocean // *Atm. Res.* – 2004. – Vol. 70. – P. 77–87.

Duetsch H.U.; Graber W.; Wyss A. High ozone values near ground caused by silent discharge // *Proceedings of Quadrennial International Ozone Symposium, Boulder, Co, 1980, Vol. 1. (A82-36401 17-46) Boulder, CO, International Association of Meteorology and Atmospheric Physics, 1981, p. 626–631.*

Finlayson-Pitts B., Wingen L. and Wang W. Multiplying Factors for Bromine Destruction of (Tropospheric) // *Proceedings of Ozone DOE Atmospheric Sciences Program (ASP) Meeting, March 20, 2002, Albuquerque, NM.*

Foster K.L., Plastringe R.A., Bottenheim J.W., Shepson P.B., Finlayson-Pitts B.J., Spicer C.W. The Role of Br₂ and BrCl in Surface Ozone Destruction at Polar Sunrise // *Science*. – 2001. – Vol. 291. – P. 471–474, doi:10.1126/science.291.5503.471.

Frieß et al., Hollwedel, J., König-Langlo, G., Wagner, T., and Platt, U.: Dynamics and chemistry of tropospheric bromine explosion events in the Antarctic coastal region // *J. Geophys. Res.* – 2004. – Vol. 109. – D06305, doi:10.1029/2003JD004 133.

Gonda T. Experimental studies of dendritic ice crystals growing from the vapor phase in: *Research of pattern formation*, ed. by R. Takaki, KTK Scientific Publishers, Tokyo, 1994, P.171–130.

Gordon M., Biswas S., Taylor P. A., Hanesiak J., Albarran-Melzer M., Fargey S. Measurements of drifting and blowing snow at Iqaluit, Nunavut, Canada during the STAR project. // *Atmos.-ocean*. – 2010. – V.48. – P. 81. doi: 10.3137/AO1105.2010

Griffiths R.F. The initiation of corona discharges from charged ice particles in a strong electric field // *J. Electrostatics*. – 1975. – Vol. 1. – Issu.1. – P. 3–13.

Jones A.E., Anderson P.S., Begoin M., Brough N., Hutterli M.A., Marshall G.J., Richter A., Roscoe H.K. BrO, blizzards, and drivers of polar tropospheric ozone depletion events // *Atmos. chem. Phys.* – 2009. – Vol. 9. – P. 4639–4652.

Kaleschke L., Richter A., Burrows J.P., Afe O., Heygster G., Notholt., Rankin A.M., Roscoe H.K., Hollweddel J., Wagner T., Jacobi H.-W. Frost flowers on sea ice as a source of sea salt and their influence on tropospheric halogen chemistry // *Geophys. Res. Lett.* – 2004. – 31. – L16114, doi: 10.1029/2004GL020655

Kasatkina E.A., Shumilov O.I., Rycroft M.J., Marcz F., and Frank-Kamenetsky A.V. Atmospheric electric field anomalies associated with solar flare/coronal mass ejection events and solar energetic charged particle “Ground Level Events” // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* – 2009. – Vol. 9. – P. 21941–21958.

Kirkman J.R. and Chalmers J.A. Point discharge from an isolated point // *J. Atm. Terr. Phys.* – 1957. – Vol. 10, Iss. 5-6. – P. 258–265.

Kumar C.P.A., Paneerselvam C., Nair K.U., Jeeva K., Selvaraj C., Gurubaran S., Rajaram R. Influence of coronal mass ejections on global electric circuit, *Indian J. Radio&Space Physics*. – 2008. – Vol. 37. – P. 39–45.

Large M.I., Pierce E.T. The dependence of point-discharge currents on wind as examined by a new experimental approach // *J. Atm. Terr. Phys.* – 1957. – Vol. 10. – Iss. 5-6. – P. 251–257.

Libbrecht K.G. and Tanusheva V.M. Electrically Induced Morphological Instabilities in Free Dendrite Growth // *Phys. Rev. Lett.* – 1998. – Vol. 81 (1). – P. 176–179.

Moortgat, G.K., Meller, R., and Schneider, W.: Temperature dependence (256–296K) of the absorption cross sections of bromoform in the wavelength range 285–360 nm, in: *Tropospheric Chemistry of Ozone in Polar Regions, NATO ASI Ser, Subser 1: Global Environmental Change*, ed. by Niki, H. and Becker, K.H. – 1993. – Vol. 370, Springer Verlag, New York. – P. 359.

Oltmans, S.J.: Surface ozone measurements in clean air// *J. Geophys. Res.* - 1981. – Vol.86. - P.1174–1180.

Roscoe H.K., Roscoe, J. Polar tropospheric ozone depletion events observed in the International Geophysical Year of 1958// *Atmos. Chem. Phys.* - 2006. - 6. – P. 3303–3314.

Schmidt D.S., Schmidt R.A., Dent J.D. Electrostatic force in blowing snow// *Boundary-Layer Meteor.* - 1999. – V.93. – P.29–45.

Simpson W.R., Carlson D., Hoeningner G., Douglas T.A., Sturm M., Perovich D., Platt U. First-year sea-ice contact predicts bromine monoxide (BrO) levels better than potential frost flower contact// *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* – 2006. – 6. – P. 11051–11066.

Sivak S. Statistical analysis of solar geomagnetic storm occurrences// Massachusetts Institute of Technology Haystack Observatory: <http://www.haystack.mit.edu/edu/pcr/Atmospheric/ssivak/results1>

Stromberg I.M. Point discharge current measurements in a plantation of spruce trees using a new pulse technique// *J. Atm. Terr. Phys.* – 1971. – Vol. 33. – Iss. 3. – P. 485-495.

Sturges, W.T., Cota, G.F., and Buckley, P.T.: Bromoform emission from Arctic ice algae// *Nature.* –1992. – Vol.358. – P. 660–662, doi:10.1038/358660a0.

Style R.W., Worster M.G. Frost flower formation on sea ice and lake ice// *Geophys. Res. Lett.* – 2009. – 36. - L11501, doi:10.1029/2009GL037304.

Tkachenko E.Y., Kozachkov S.G. Possible contribution of triboelectricity to snow–air interactions// *Env. Chemistry* –2011.- doi: 10.1071/EN10074

Tinsley B.A., Burns G.B., Zhou L. The role of the global electric circuit in solar and internal forcing of clouds and climate // *Adv. Space Research.* – 2007. – Vol.40. – P. 1126-1139.

Лукьянова Р.Ю., А.В. Круглов, А.В. Франк-Каменецкий, Котиков А.В., Бернс Г.Б., Френч В.Д. Соотношение между потенциалом ионосферы и приземным электрическим полем в южной полярной шапке// *Геомагнетизм и аэрономия*- 2011. - Т.51. - №3. - с.387-396.

Поляков В. Тайна метелочной антенны// *Клуб радиолюбителей работающих малой мощностью* – 2008. - <http://www.qrp.ru/modules/myarticles/article.php?storyid=1>

Френкель Я.И. Теория явлений атмосферного электричества, 2007, КомКнига, Москва, 160 с.