

---

---

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

---

---

**ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ АНОМАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ  
ИЗЛУЧЕНИЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ, ВЫЗВАННЫЕ  
КОСМИЧЕСКИМИ ЛУЧАМИ**

© 2020 г. Г. С. Бордонский\*

*Институт природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук,  
Чита, Россия*

\*E-mail: lgc255@mail.ru

Поступила в редакцию 09.04.2020 г.

В работе анализируются ранее выполненные измерения резкого возрастания интенсивности излучения атмосферы на длинах волн 8.5 мм, 3.3 мм и 8–12 мкм во время магнитной бури 14 декабря 2006 г. Измерения были выполнены в г. Чита, когда событие совпало с приходом атмосферного фронта, вызвавшего похолодание воздуха. Рассматриваются причины явления, одна из которых связывается с генерацией электронов космическими лучами и их последующим ускорением в электрических полях атмосферы. Изучение явления представляет интерес как для физики атмосферы, так и для дистанционного зондирования. Нетепловые электромагнитные излучения в микроволновом, инфракрасном и видимом диапазонах можно использовать для обнаружения и исследования атмосферных процессов: лавин убегающих электронов, фотоядерных реакций, электризации, грозových явлений, магнитных бурь, предвестников природных катастрофических и аномальных явлений.

*Ключевые слова:* убегающие электроны, фотоядерные реакции, физика атмосферы, дистанционное зондирование

**DOI:** 10.31857/S020596142004003X

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для дистанционных исследований природной среды широко используют методы регистрации собственного теплового электромагнитного излучения в широком диапазоне частот (Sharkov, 2003, Шарков и др., 2018). Тепловое излучение природного образования определяется распределением термодинамической температуры ( $T_0$ ) в нем, структурой слоев и их электрофизических характеристик. Обычно мощность теплового излучения в узком спектральном интервале характеризуют яркостной температурой ( $T_q$ ). В практике дистанционного зондирования, как правило, рассматривается тепловое излучение, для которого справедливы законы равновесной термодинамики. Вместе с тем, в природной среде могут происходить неравновесные электрофизические явления, которые порождают электромагнитные излучения с яркостной температурой превышающей  $T_0$  и со спектрами, отличающимися от спектра излучения черного тела (Филоненко, 2001; Федоров и др., 2001). К таким явлениям в земных условиях относятся молниевые разряды, реакция атмосферы на потоки космических частиц, взрывы болидов и ряд других.

Об одном из проявлений аномальных случаев нетеплового излучения сообщалось в работе (Бордонский, Гурулев, 2009), в которой наблюдали интенсивное электромагнитное излучение атмосферы Земли на длинах волн 8.5 мм, 3.3 мм и 8–12 мкм. По оценкам плотность потока излучения в полосе частот  $\sim 1$  ГГц составляла  $\sim 10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup>. Хотя такой поток невелик, тем не менее, он значительно превышает потоки равновесного микроволнового теплового излучения, характерного для земных условий. Наблюдаемое явление совпало по времени с магнитной бурей и приходом фронта холодных масс воздуха. Необычность наблюдения была связана с его длительностью (около часа) и географической широтой события (г. Чита 52° с.ш.), на которой редко наблюдаются авральные явления. Поскольку убедительных предположений о причинах наблюдаемого явления не было высказано, сообщение (Бордонский, Гурулев, 2009), как и статьи (Бордонский, 1990, 2010), не вызвали откликов у специалистов в области дистанционного зондирования.

В настоящей работе рассматриваются новые механизмы микроволнового и инфракрасного излучения атмосферы, вызванного появлением убегающих электронов и фотоядерными реакци-

ями в атмосфере Земли, о которых было сообщено в обзорах (Гуревич, Зыбин, 2001; Бабич, 2019).

### МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ В АТМОСФЕРЕ

Известно, что в наэлектризованных облаках возникают свободные электроны, порождаемые высокоэнергичными космическими частицами, поступающими в атмосферу Земли. Эти электроны могут быть ускорены в электрических полях вследствие особого механизма ускорения, если имеют начальную энергию выше пороговой (150 эВ). Такие электроны названы “убегающими” (Gurevich et al., 1992, Гуревич, Зыбин, 2001). Если первичные электроны обладают высокой энергией (~1 МэВ), то происходит их торможение с формированием лавины релятивистских убегающих электронов. Эти лавины создают импульсы гамма-излучения.

Исследованиями последних десятилетий было показано, что грозы могут порождать потоки нейтронов (Стародубцев и др., 2012; Бабич, 2019). Точный механизм этого явления не прояснен, однако общепризнано, что в некоторых областях грозовой атмосферы происходят реакции ядерных превращений. Было высказано предположение, что эти реакции являются фотоядерными, так как инициируются фотонами гамма-излучения с энергиями, превышающими 10 МэВ (Бабич, 2006). Их фотоядерное происхождение было подтверждено в ряде работ, в том числе по усилению потока фотонов с энергией 0.511 МэВ, соответствующей сигналу аннигиляции позитрон-электрон (Enoto, 2017).

Кроме того, наряду с короткими вспышками гамма-излучения, в исследованиях 2000–2010 гг. обнаружено гамма-свечение, которое может длиться от долей секунды до нескольких десятков минут (Dwyer et al., 2012). В частности, в работе (Tsuchiya et al., 2012) при наблюдениях в высокогорной обсерватории в Тибете на высоте 4300 м над уровнем моря 22.07.2010 г. зарегистрировали излучение с энергией фотонов выше 40 МэВ в течение 40 мин.

Поскольку лавина убегающих электронов действует короткое время, то это не может объяснить длительное свечение. Поэтому механизм образования убегающих электронов был доработан включением релятивистской обратной связи, которая самоподдерживает лавины электронов (Dwyer, 2003, Babich et al., 2005). При коэффициенте обратной связи порядка единицы возникает длительное гамма-свечение (Dwyer et al., 2012). При этом в атмосфере происходят превращения изотопов N, C, O с образованием различных элементарных частиц (нейтроны, нейтрино, позитроны и другие), в том числе возникают электро-

ны различных энергий. В последующей работе (Tsuchiya et al., 2013) наблюдали гамма-излучение с энергией фотонов больше 10 МэВ в течение 36 с. В недавно опубликованном каталоге событий за 2017 год в грозовой атмосфере, с участием частиц высоких энергий, вблизи высокогорной станции “Арагац” в Армении представлено около 100 результатов наблюдений с длительностью потоков частиц от микросекунд до часов (Chilingarian et al., 2019). Подчеркнуто, что наиболее важным результатом является наблюдение длительно существующих гамма-излучений. Высокоэнергетическая часть излучения может длиться несколько минут и обычно резко падает при близких молниевых разрядах.

Таким образом, важным аспектом новых представлений является существование при некоторых условиях самоподдерживающихся лавин релятивистских убегающих электронов. Однако оценки, выполненные в некоторых работах, дают время существования таких лавин порядка миллисекунды (Liu et al., 2013). С другой стороны, длительные высокоэнергетические события (в десятки минут) указывают на то, что лавины релятивистских убегающих электронов с энергиями выше 40 МэВ способны развиваться в полях грозовых облаков. Следовательно, при этих процессах возможны мощные электромагнитные излучения в микроволновом и ИК-диапазонах при разнообразных механизмах ускорения движения заряженных частиц. Их можно ожидать вблизи атмосферных фронтов и границ облачности, так как для их распространения требуется невысокое погонное затухания по трассе распространения. В случае пучков интенсивных излучений возможно, однако, просветление среды.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МИКРОВОЛНОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Новые представления об источнике микроволновых и ИК излучений в атмосфере позволяют с этих позиций проанализировать результаты ранее выполненных измерений потоков электромагнитных излучений и сделать некоторые предположения о характеристиках процессов, их вызвавших.

В 2006 г. в Институте природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН (г. Чита) в зимнее время выполнялись измерения теплового излучения малооблачной атмосферы в микроволновом и тепловом ИК-диапазонах. При этих измерениях использованы два супергетеродинных радиометра миллиметрового диапазона модуляционного типа со смесителем на входе. Средние частоты радиометров 35 и 92 ГГц, полосы частот усилителей промежуточной частоты 1–1.5 ГГц. ИК-радиометр детекторный с пироэлектрическим модулем. Флуктуационный порог чувствительности приборов не

хуже 0.1 К при постоянной времени 1 с. Рупорные антенны микроволновых радиометров и объектива ИК-радиометра имели ширины диаграмм направленности около 6 градусов. При исследованиях радиометры были установлены на крыше здания Института. Приборы ориентировались под углом 30° от зенита в южном направлении для регистрации нисходящего излучения. Одновременно выполнялись измерения температуры приземного воздуха.

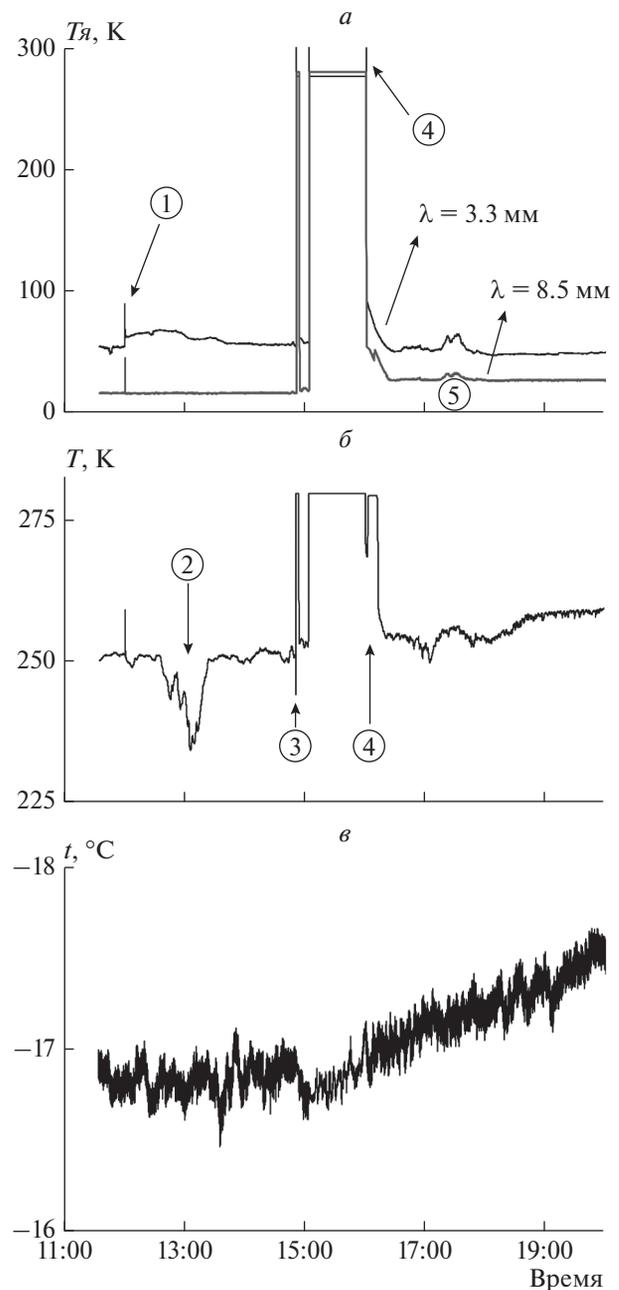
Результаты измерений радиояркостной и радиационной температур, выполненных в работе (Бордонский, Гурулев, 2009), представлены на рис. 1.

Как следует из рис. 1, по всем трем каналам наблюдали одновременное резкое увеличение входного сигнала (около 21 ч по местному времени). Такое состояние приборов могло иметь место, если бы в атмосфере внезапно образовались водные облака с большим водозапасом при быстром фазовом переходе перенасыщенного пара. Первоначально рассматривалась эта версия. Более тщательный анализ показал, что радиометры находились в перегруженном состоянии, то есть далеко за пределами нормальной работы.

#### ГИПОТЕЗА О МЕХАНИЗМЕ ЯВЛЕНИЯ

В свете новых данных представляется правдоподобной гипотеза о происхождении наблюдаемого явления вследствие тормозного излучения заряженных частиц лавин релятивистских убегающих электронов, вызванных внешним воздействием. Станцией ФИАН в Москве была 14 декабря зарегистрирована магнитная буря с индексом 8 баллов ([https://tesis.lebedev.ru/magnetic\\_storms.html?m=12&d=15&y=2006](https://tesis.lebedev.ru/magnetic_storms.html?m=12&d=15&y=2006)) – рис. 2. Потoki плазмы были выброшены накануне при вспышке на Солнце, которая была зарегистрирована 13 декабря 2006 г. Якутским нейтронным монитором (<http://ysn.ru/ipm/ykt/>) – рис. 3.

Кроме космических событий в Забайкалье наблюдали приход холодных масс воздуха из Средней Азии. При возникновении аномалий сигналов в месте расположения приборов обнаружилось начало понижения температуры воздуха (рис. 1, в) и в последующее ночное время выпали незначительные осадки в виде снега. Некоторые результаты радиозондовых метеорологических измерений местной метеостанцией представлены на рис. 4 (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Метеостанция расположена в нескольких километрах от здания ИПРЭК СО РАН. Таким образом, кроме магнитной бури в районе наблюдения происходили метеорологические явления, при которых имела место конденсация паров воды. Образование капель и кристаллов при перемешивании в конвективных потоках



**Рис. 1.** Изменение радиояркостной температуры атмосферы в г. Чита 14 декабря 2006 г. *a* – на длинах волн 3.3 мм и 8.5 мм, *б* – то же для радиационной температуры в ИК-диапазоне в интервале 8–12 мкм, *в* – изменение температуры воздуха вблизи приборов (время МСК).

воздуха обычно приводит к их электризации, то есть возникновению электрических полей в атмосфере. Хотя явно выраженных грозовых явлений не наблюдали, выполнены оба условия появления лавин убегающих электронов. Длительность их существования, если это явление имело место при наших наблюдениях, составляла время

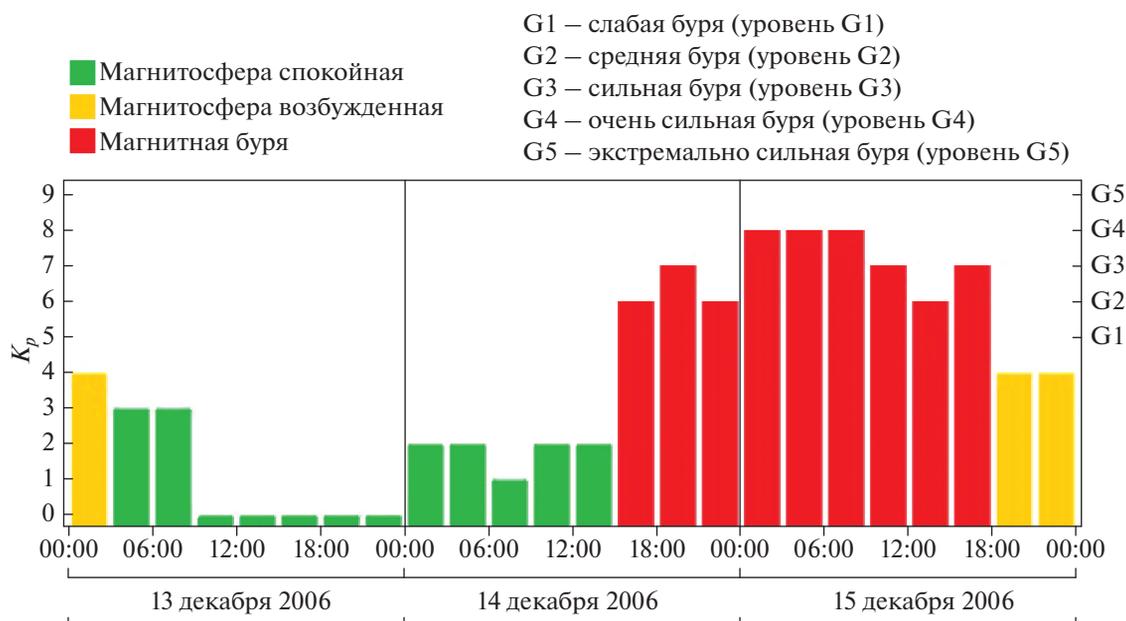


Рис. 2. Изменение  $K_p$ -индекса в г. Москва на станции ФИАН 13–15 декабря 2006 г. (время МСК).

около одного часа. Известный рекорд длительности гамма-свечения 40 мин (Tsuchiya et al., 2012).

При рассмотрении рис. 1 можно отметить следующее. Приблизительно за три часа до основного события наблюдали небольшой импульс излучения (точка “1” на графиках рис. 1, а, б). После этого радиояркость температура на волне 3.3 мм несколько возросла, а в ИК-диапазоне не изменилась. Это говорит о некоторой конденсации пара в средней или верхних слоях тропосферы, так как сигнал в ИК-диапазоне не изменился (он, по-ви-

димому, в значительной мере формировался в нижней тропосфере, что следует из распределений влажности и температуры по высоте – рис. 4).

В точке “2” наблюдали кратковременное понижение радиационной температуры в ИК-диапазоне, что возможно связано с понижением термодинамической температуры нижних слоев тропосферы. Однако это относится к тонкому слою, т.к. эффект не наблюдали на волне 3.3 мм. В точке “3” наблюдали резкое возрастание интенсивности излучения в виде импульса, длительностью около 4 мин. В точке “4” аномальное микроволновое излучение исчезло. ИК-излучение на некоторое время ослабевало, но затем продолжалось еще чуть более 10 мин.

Начиная с точки “5”, после завершения события, прибор на волну 8.5 мм показывал более высокое значение  $T_y$  по сравнению с начальным уровнем. Напротив, радиометр на волну 3.3 мм регистрировал некоторое понижение  $T_y$ . Такая особенность при измерениях радиотеплового излучения облачной атмосферы невозможна, так как погонное излучение в водном аэрозоле на более коротких волнах выше.

В ИК-диапазоне после 17 ч МСК обнаруживалось медленное возрастание радиационной температуры, что можно связать с появлением в атмосфере некоторого количества конденсированной влаги.

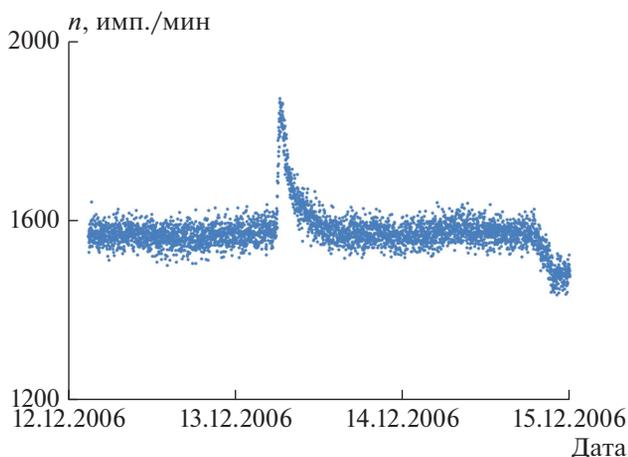


Рис. 3. Вариации потока космических лучей по данным нейтронного монитора с Якутской станции (<http://ysn.ru/ipm/ykt/>) (время МСК).

## ОБСУЖДЕНИЕ

*Функционирование аппаратуры и наводки*

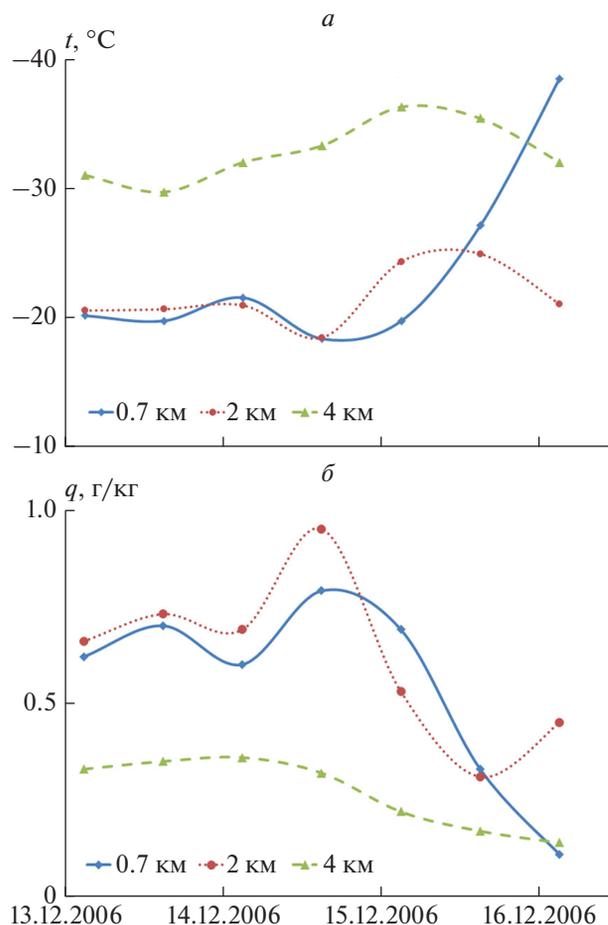
Важный аспект дешифровки резких изменений сигналов связан с правильностью функционирования приборов и определением возможных источников наводок.

Прежде всего, надо уточнить работоспособность приборов и выяснить, действительно ли они находились в состоянии, перегруженном внешним сигналом. Это было определено из записей аномальных сигналов, на которых исчезли собственные шумы приемников. Кроме того, в течение часа напряжение на выходах не изменялось в пределах ошибок работы АЦП системы сбора информации (использовали систему фирмы Agilent). Установили, что запирающие усилители произошло в высокочастотных каскадах приборов до детекторов, подключенных к выходам усилителей промежуточной частоты. В ИК-радиометре перегрузка возникла в самом пироэлектрическом детекторе. Сразу после события обнаружилось изменение чувствительности в канале 8.5 мм, что следовало из сравнения уровней сигналов с каналом 3.3 мм. Спустя несколько дней функционирования у радиометра на волну 8.5 мм вышел из строя блок усилителя промежуточной частоты. Такое состояние приборов возможно из-за выгорания элементов усилительного тракта при мощностях сигнала значительно превышающих  $10^{-7}$ – $10^{-6}$  Вт.

Учитывая размеры входных апертур и коэффициент передачи в высокочастотном тракте до детектора, выполненная оценка плотности потока энергии в СВЧ-диапазоне в полосе  $\sim 1$  ГГц составила в точке приема не менее  $10^{-5}$ – $10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup>. Оценить мощность источника излучения сложно, так как не было известно его положение в пространстве и протяженность, а также распределение мощности в спектре.

При экспериментах радиометры и регистрирующие приборы питались от общей сети переменного тока. Каждый прибор имел собственный источник питания. Во время записи аномалий регистрирующий компьютер и система сбора информации продолжали нормально функционировать, что было видно из продолжающихся записей температуры воздуха без каких-либо скачков сигнала (рис. 1, в). Как следует из рис. 1, событие длилось около одного часа от 15 до 16 ч московского времени. При этом приборы в разное время вышли из состояния насыщения.

За два месяца наблюдений короткие выбросы сигналов отбраковывались. Считалось, что они имели искусственное происхождение и были связаны с обычными электрическими процессами в атмосфере (разряды), создающие как слабое электромагнитное излучение, так и наводки на провода питающей сети. Эти сигналы имели ма-



**Рис. 4.** Зависимости *a* – температуры воздуха (*t*) и *b* – удельной влажности воздуха (*q*) от времени на различных высотах по данным измерений метеостанции в г. Чита (время МСК).

лую длительность и обычно ослаблялись в низкочастотных цепях радиометров при их интегрировании за время 0.1–1 с. Сильные импульсные наводки, как следует из опыта работы на станции наблюдений в загородных условиях, обычно приводили к сбою функционирования компьютерных программ. Представляется, что описываемое событие не связано с неправильным функционированием аппаратуры, а было инициировано природным микроволновым и ИК-излучениями. Как отмечалось в работе (Dreyer et al., 2012), насыщение детекторов гамма-вспышками наблюдали на космических аппаратах за сотни километров от источников.

*Механизм радиоизлучений при лавинах убегающих электронов*

Электромагнитные нестационарные излучения в атмосфере могут иметь как искусственное, так и естественное происхождение. В данном случае

можно предположить, что событие носит естественное происхождение. Оно основано на установленном в настоящее время представлении о возникновении в атмосфере высокоэнергетических событиях, инициированных ускорением убегающих электронов.

В представленном в работе (Бордонский, Гурулев, 2009) случае явление наблюдали в течение времени около часа. Резкие фронты излучения характерны для систем с положительной обратной связью, например, триггеров, что указывает на возможное наличие обратной связи в излучающем объекте. Начальный импульс, запустивший лавины, был задан затравочными космическими частицами, о чем можно судить по сильной магнитной буре во время наблюдений 14 декабря 2006 г. Необходимая электризация атмосферы возникла из-за прихода атмосферного фронта, усиления циркуляции воздушных масс и конденсации водяного пара. Следует отметить, что по измерениям трех радиометров атмосфера не содержала значительного количества капельной влаги вблизи пункта наблюдения. Тем не менее, в представленном случае имеются необходимые условия возникновения лавин релятивистских убегающих электронов. Можно предположить, что отсутствие плотной облачности создало условия для распространения микроволнового и ИК-излучений на большое расстояние, либо источник находился недалеко от радиометров.

#### *Оценка вероятности событий и их локализации*

Разовые наблюдения не позволяют определить вероятность повторения события. Однако, если принять гипотезу об определяющем влиянии электризации атмосферы, можно оценить вероятность такого события из-за связи с грозовыми явлениями. Эта связь позволяет также оценить географическую локализацию эффекта.

Известно, что грозовые явления редки в верхних широтах, их вероятность возрастает при движении от полюсов к экватору. Известны районы с практически непрерывной грозовой активностью. Это район возле озера Маракайбо в Венесуэле, где грозы наблюдаются около 300 сут в году (Albrecht et al., 2016). Вместе с тем, достаточная высокая электризация возможна и при отсутствии выраженной грозовой активности или вдали от грозовых облаков.

Были выполнены сравнения результатов наблюдений вспышек с географическим положением и метеоусловиями (Dwyer et al., 2012). Обнаружен дефицит гамма-вспышек на высоких широтах и их преобладание на низких широтах. Картина распределения событий по земному шару представлена в работе (Splitt et al., 2010). Сравнение показало также наибольшую корреляцию вспышек с жидкокапельными облаками на высотах

10–14 км и плохую корреляцию с кристаллическими облаками. Сопоставление гамма-излучений с молниевыми разрядами дают значения совпадений 0.1–1% по данным (Smith et al., 2011). Так как эффект связан не только с молниями, вероятность импульсов гамма-излучения в грозовых облаках должна превышать 1%, от значения числа молниевых разрядов. По наблюдениям на станции “Арагац” в течение 2017 года на участке с радиусом 10 км зарегистрировано более 100 событий (Chilingarian et al., 2019).

Представление об обязательности электризации атмосферы, данные метеонаблюдений и недавно открытие новой сегнетоэлектрической кристаллической модификации льда — лед 0 (Бордонский и др., 2020), позволяют сделать оценки локализации излучающего объема атмосферы по высоте. Особенность свойств льда 0 заключается в том, что он образуется при температурах ниже  $-23^{\circ}\text{C}$ . Обладая сегнетоэлектрическими свойствами, этот лед может оказывать существенное влияние на процесс электризации облаков. Его появление позволяет понять ранее выполненные эксперименты по изучению электризации атмосферных образований. В работах (Гальперин и др., 1990) из самолетных экспериментов следовало, что электризация облаков отсутствовала, если их температура была ниже  $-22^{\circ}\text{C}$ . В статье (Бордонский и др., 2020) эти эксперименты были интерпретированы, как появление в облаках кристаллов льда 0, которые образуются из переохлажденной воды при температурах ниже  $-23^{\circ}\text{C}$ . Сегнетоэлектрические кристаллы подавляют электризацию вследствие прилипания к их поверхности заряженных ионов гидроксила (Waitukaitis et al., 2014). Как видно из рис. 4 на высотах более 1–2 км над уровнем моря температура воздуха была ниже  $-22...-23^{\circ}\text{C}$ . Из этих данных следует, что излучающий объем вероятнее всего находился в области атмосферы на высотах от земной поверхности 0...2 км. В работе (Dwyer et al., 2012) отмечается, что большинство вспышек должно происходить на высотах грозовых облаков или ниже их, что определяется значениями напряженности электрических полей.

#### *Другие возможные механизмы низкочастотных электромагнитных излучений*

Они связываются с широкими атмосферными ливнями с образованием лавин убегающих электронов. Их особенности таковы, что эти процессы длятся короткое время (порядка микросекунд). Другой вероятный источник радиоволн связан с торможением заряженных частиц при их выпадении из радиационных поясов при возникновении вариаций магнитного поля (Авакян, Воро-

нин, 2007). Время вариаций этих потоков составляет значения порядка секунд.

Интересно отметить, что перед нашими наблюдениями после вспышки на Солнце 5 декабря 2006 г. (самой мощной за предшествующие 30 лет) первоначально был зарегистрирован поток нейтральных атомов водорода, который длился 90 мин. Спустя 30 мин был зарегистрирован поток протонов (Mewaldt, 2009). Данное необычное наблюдение указывает на возможность появления потоков частиц высоких энергий в атмосфере на любых широтах.

Взрывы болидов и крупномасштабные воздействия на атмосферу могут приводить к длительным свечениям в радиодиапазоне. Однако эти события регистрируются сетью геофизических станций и легко могут быть идентифицированы как источники аномальных излучений. Менее интенсивные излучения могут инициироваться радиоактивными элементами с малым периодом полураспада, попадающими в нижние слои тропосферы и создающими затравочные электроны, например, радон и его продуктами распада (Reuveni et al., 2017).

#### *Гипотеза о возникновении монохроматических излучений*

Образование газовых сред с возбужденными атомами и молекулами приводит к гипотезе о возможности возникновения нетепловых монохроматических излучений. Представляются два случая: 1 – усиление внешних излучений на определенных частотах и 2 – генерация монохроматических излучений. На ряд возможностей указывалось в работах (Гордиец, Панченко, 1986, Бордонский, 1990, 2010).

В качестве примера усиления внешнего излучения в микроволновом диапазоне можно привести обнаружение мазерного усиления на линии молекулы водяного пара на частоте 22 ГГц в системе четырех спутников Сатурна, при выбросах воды с поверхности из-за разрыва ледяного покрова (Pogrebenko et al., 2009).

Генерация монохроматического излучения при отсутствии резонатора может возникнуть при высокой активности среды из-за рассеяния излучения и возвращения энергии в усиливающую область, что приводит к появлению обратной связи (Летохов, 1972). Другой механизм генерации связан с эффектом сверхизлучения Дикке. Для этого механизма, в случае геометрии активной среды в виде вытянутой фигуры и излучении в направлении наибольшей вытянутости, основное условие сверхизлучения имеет вид:  $n\delta L \gg 1$ , где  $\delta \sim 1/k^2$ ,  $k$  – волновое число,  $n$  – концентрация возбужденных молекул в единице объема,  $L$  – размер области (Меньшиков, 1999). Для  $L = 100$  м и

длины волны 1 мм это условие выполняется, если  $n > 10^8$  м<sup>-3</sup>. Возможен не только импульсный, но и осцилляторный режим сверхизлучения, в том числе и в плотной среде.

Для интенсивных пучков в атмосфере из-за нелинейности среды может возникать самофокусировка с распространением электромагнитного излучения на значительные расстояния. Ее различные варианты представлены в работах (Аскарьян, 1972, Райзер, 1980, Меньшиков, 1999). Регистрация узких мощных пучков излучения возможна по его рассеянию на атмосферных неоднородностях.

## ВЫВОДЫ

Обнаружение в атмосфере высокоэнергетических процессов различной длительности по их гамма-свечению и электромагнитным излучениям относительно низких частот открывает новые направления изучения ее физики и химии. При этом наряду с ядерно-физическими и химическими методами исследования техника дистанционного зондирования с использованием электромагнитных волн может стать весьма эффективным инструментом изучения этих уникальных объектов. Можно отметить следующие особенности экспериментальной ситуации, являющиеся благоприятными для применения методов дистанционного зондирования.

1. Существование окон прозрачности атмосферы в микроволновом, ИК и видимом диапазонах шкалы электромагнитных волн. Как следствие, возникающее при фотоядерных реакциях и последующих превращениях электромагнитное излучение, может распространяться на значительные расстояния, в отличие от потоков нейтральных и заряженных частиц высоких энергий. Регистрация этих излучений может осуществляться как наземными, так и спутниковыми системами пассивного дистанционного зондирования при соответствующей их модификации под данную задачу. Другая особенность – большая длительность существования излучающих образований, достигающая в ряде случаев десятков минут.

При возникновении фотоядерных реакции ожидаются короткие мощные вспышки, которые имеют достаточную длительность для их регистрации.

2. В определенном смысле можно говорить о существовании природных фотоядерных реакторов в атмосфере, так как в некоторой ее области при соответствующих условиях возникает самоподдерживающаяся реакция. Эти реакторы спорадически возникают из-за особого механизма ускорения электронов в электрических полях, инициируемых внешними излучениями. Такой

реактор не является источником энергии, он существует короткое время и использует релятивистские электроны для ядерных реакций. Тем не менее, он нарабатывает ядра элементов с другими порядковыми номерами по сравнению с элементами, входящими в состав атмосферных газов.

С общезначимой точки зрения интересно отметить существование природного ядерного реактора, обнаруженного в месторождении урановых руд Окло в Габоне (Западная Африка). Он известен с 1975 г. В этом реакторе в слое толщиной порядка 10 м и шириной 600–900 м уже в течение около 0.6 млрд лет протекает цепная реакция деления ядер урана со средней мощностью 25 кВт (Петров, 1977).

3. Принципиально возможны и другие механизмы относительно низкочастотных нетепловых излучений атмосферы (при ускорении убегающих электронов, высыпаниях заряженных частиц из магнитосферы, взрывах болидов, сейсмической активности).

4. Широкий спектральный интервал, перекрывающий весь диапазон частот, используемых в дистанционном зондировании, позволяет предложить различные варианты поисков электромагнитных нетепловых излучений. В спектре сигналов можно ожидать не только широкополосное тормозное излучение, но также узкие линии атмосферных газов с самофокусировкой лучей. Монохроматическое излучение может возникать вдоль протяженных треков пучков убегающих электронов вследствие сверхизлучения. В микроволновом диапазоне излучение возможно на сильных линиях, например, на линии водяного пара на частоте 183.3 ГГц в атмосферных фронтах, где происходят фазовые переходы и возрастает напряженность электрического поля. В общем случае ожидается большой набор частот и способов генерации излучений, так как возбуждающие среды частицы имеют широкий диапазон энергий.

В связи с установлением нового механизма возникновения нетепловых электромагнитных излучений атмосферы, связанного с появлением лавин убегающих электронов, требуется проанализировать случаи ранее зарегистрированных методами дистанционного зондирования аномалий природных излучений. Длительное время такие явления игнорировались исследователями, что было связано с отсутствием достаточно убедительной гипотезы, объясняющей широкий круг аномальных атмосферных явлений. В настоящее время очевидной является необходимость проведения соответствующих экспериментальных и теоретических исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авакян С.В., Воронин Н.А.* О возможном физическом механизме воздействия солнечной и геомагнитной активности на явления в нижней атмосфере // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 2. С. 28–33.
- Аскарьян Г.А.* Эффект самофокусировки // Успехи физических наук. 1973. Т. 111. Вып. 2. С. 249–260.
- Бабич Л.П.* Генерация нейтронов в гигантских восходящих атмосферных разрядах // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 84. Вып. 6. С. 345–348.  
<https://doi.org/10.1134/S0021364006180020>
- Бабич Л.П.* Грозовые нейтроны // Успехи физических наук. 2019. Т. 189. № 10. С. 1044–1069.  
<https://doi.org/10.3367/UFN.2018.12.038501>
- Бордонский Г.С.* Возможные следы лазерного излучения атмосферы Земли // Оптика атмосферы и океана. 1990. Т. 3. № 4. С. 390–393.
- Бордонский Г.С.* Поиски активных природных сред (комментарии к статье В.А. Татарченко “О природе некоторых источников инфракрасного излучения атмосферы”) // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 2. С. 91–93.
- Бордонский Г.С., Гурулев А.А.* Регистрация микроволнового и инфракрасного излучения атмосферы в г. Чите во время магнитной бури 14 декабря 2006 г // Ученые записки Забайкальского государственного гуманитарно-педагогического университета им. Н.Г. Чернышевского. 2009. № 2(25). С. 40–43.
- Бордонский Г.С., Крылов С.Д., Гурулев А.А.* Лед 0 в природной среде (экспериментальные данные и предполагаемые области его существования) // Лед и снег. 2020. № 2. С. 263–273.
- Гальперин С.М., Кашлева Л.В., Михайловский Ю.П., Степаненко В.Д.* Электризация конвективных облаков в естественном цикле развития и при воздействиях (самолетные исследования) // Вопросы атмосферного электричества. Л.: Гидрометеиздат. 1990. 280 с.
- Гордиец Б.Ф., Панченко В.Я.* Газовые лазеры с солнечным возбуждением // Успехи физических наук. 1986. Т. 149. № 7. С. 551–576.  
<https://doi.org/10.3367/UFN.0149.198607f.0551>
- Гуревич А.В., Зыбин К.П.* Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы // Успехи физических наук. 2001. Т. 171. № 11. С. 1177–1199.  
<https://doi.org/10.3367/UFN.0171.200111b.1177>
- Летохов В.С.* Лазерное действие в атмосферах звезд. Препринт Института спектроскопии АН СССР. М. 1972. Пр. № 9. 24 с.
- Магнитные бури 15 декабря 2006 года. 2020. Режим доступа: [https://thesis.lebedev.ru/magnetic\\_storms.html?m=12&d=15&y=2006](https://thesis.lebedev.ru/magnetic_storms.html?m=12&d=15&y=2006)
- Меньшиков Л.И.* Сверхизлучение и некоторые родственные явления // Успехи физических наук. 1999. Т. 169. № 2. С. 113–154.  
<https://doi.org/10.3367/UFN.0169.199902a.0113>
- Петров Ю.В.* Естественный ядерный реактор Окло // Успехи физических наук. 1977. Т. 123. Вып. 3. С. 473–486.  
<https://doi.org/10.3367/UFN.0123.197711c.0473>

- Райзер Ю.П.* Оптические разряды // Успехи физических наук. 1980. Т. 132. Вып. 3. С. 549–581.  
<https://doi.org/10.3367/UFNг.0132.198011e.0549>
- Стародубцев С.А., Козлов В.И., Торопов А.А., Муллаяров В.А., Григорьев В.Г., Мусеев А.В.* Первые экспериментальные наблюдения всплесков нейтронов под грозовыми облаками вблизи уровня моря // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2012. Т. 96. № 3–4. С. 201–204.
- Федоров В.Ф., Фролов Ю.А., Шишков П.О.* Миллиметровое электромагнитное излучение возвратного удара молнии // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42. № 3(247). С. 9–14.
- Филоненко А.Д.* О природе аномального электромагнитного радиоимпульса, вызванного широким атмосферным ливнем // Письма в Журнал технической физики. 2001. Т. 27. № 10. С. 9–15.
- Шарков Е.А., Кузьмин А.В., Веденькин Н.Н., Jeong S., Ермаков Д.М., Квитка В.Е., Козлова Т.О., Комарова Н.Ю., Минаев П.Ю., Park I.H., Пашинов Е.В., Позаненко А.С., Прасолов В.О., Садовский И.Н., Сазонов Д.С., Стерлякин В.В., Хапин Ю.Б., Hong G., Черненко А.М.* Космический эксперимент “конвергенция”: научные задачи, бортовая аппаратура, методики решения обратных задач // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 4. С. 71–96.  
<https://doi.org/10.31857/S020596140002356-2>
- Albrecht R.I., Goodman S.J., Buechler D.E., Blakeslee R.J., Christian H.J.* Where are the lightning hotspots on Earth? // Bulletin of the American Meteorological Society. 2016. V. 97. № 11. P. 2051–2068.  
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00193.1>
- Babich L.P., Donskoy E.N., Kutsyk I.M., Roussel-Dupre R.A.* The feedback mechanism of runway air breakdown // Geophysical Research Letters. 2005. V. 32. Iss. 9. P. L09809 (1–5).  
<https://doi.org/10.1029/2004gl021744>
- Chilingarian A., Mkrtchan H., Karapetyan G., Sargsyan B., Arestakesyan A.* Catalog of 2017 thunderstorm ground enhancement (TGE) events observed on Agarats // Scientific Reports. 2019. V. 9 № 1. P. 6253–1/12.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-42786-7>
- Department of Atmospheric Science. 2020. Режим доступа: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- Dwyer J.R.* A fundamental limit on electron fields in air // Geophysical Research Letters. 2003. V. 30. № 20. P. 2055.  
<https://doi.org/10.1029/2003GL017781>
- Dwyer J.R., Smith D.M., Cummer S.A.* High-energy atmospheric physics: Terrestrial Gamma-Ray flashes and related phenomena // Space Science Review. 2012. V. 173. Iss. 1–4. P. 133–196.  
<https://doi.org/10.1007/s11214-012-9894-0>
- Enoto T., Wada Y., Furuta Y., Nakazawa K., Yuasa T., Okuda K., Makishima K., Sato M., Sato K., Nakano T., Umemoto D., Tsuchiya H.* Photonuclear reactions triggered by lightning discharge // Nature. 2017. V. 551. Iss. 7681. P. 481–484.  
<https://doi.org/10.1038/nature24630>
- Gurevich A.V., Milikh G.M., Roussel-Dupre R.A.* Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during thunderstorm // Physica Letters A. 1992. V. 165. № 5–6. P. 463–468.  
[https://doi.org/10.1016/0375-9601\(92\)90348-P](https://doi.org/10.1016/0375-9601(92)90348-P)
- Liu N., Dwyer J.R.* Modeling terrestrial gamma ray flashes produced by relativistic feedback discharges // J. of Geophysical Research: Space Physics. 2013. V. 118. № 5. P. 2359–2376.
- Mewald R.A., Leske R.A., Stone E.C., Barghouty A.S.F., Labrador A.W., Cohen C.M.S., Cummings A.C., Davis A.J., von Rosenvinge T.T., Wiedenbeck M.E.* STEREO observation of energetic neutral hydrogen atoms during the 2006 December 5 Solar flare // The Astrophysical Journal Letters. 2009. V. 693. № 1. P. 693: L11–L15.  
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/693/1/L11>
- Neutron monitor primary data from Yakutsk station. 2020. Режим доступа: <http://ysn.ru/ipm/ykt/>
- Pogrebenko S.V., Gurvits L.I., Elitzur M., Cosmovici C.B., Avruch I.M., Montebugnoli S., Salerno E., Pluchino S., Maccafari G., Mujunen A., Ritakari J., Wagner J., Molera G., Uunila M.* Water masers in the Saturnian system // Astronomy and Astrophysics. 2009. V. 494. № 2. P. L1–L4.  
<https://doi.org/10.1051/0004-6361:200811186>
- Reuveni Y., Yair Y., Price C., Steinitz G.* Ground level gamma-ray and electric field enhancements during disturbed weather: Combined signatures from convective clouds, lightning and rain // Atmospheric Research. 2017. V. 196. № 4. P. 142–150.
- Smith D.M., Dwyer J.R., Hazelton B.J., Grefenstette B.W., Martinez-McKinney G.F.M., Zhang Z.Y., Lowell A.W., Kelley N.A., Splitt M.E., Lazarus S.M., Ulrich W., Schaal M., Saleh Z.H., Cramer E., Rassoul H.K., Cummer S.A., Lu G., Blakeslee R.G.* The rarity of terrestrial gamma-ray flashes // Geophysics Research Letters. 2011. V. 38. № 8. P. L08807: 1–5.  
<https://doi.org/10.1029/2011gl046875>
- Splitt M.E., Lazarus S.M., Barnes D., Dwyer J.R., Rassoul H.K., Smith D.M., Hazelton B., Grefenstette B.* Thunderstorm characteristics associated with RHESSI identified terrestrial gamma ray flashes // J. Geophysical Research. 2010. V. 115. P. A00E38.  
<https://doi.org/10.1029/2009JA014622>
- Sharkov E.A.* Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Berlin, N.Y., London, Paris, Tokyo. Springer/PRAXIS. 2003. 613 p. ISBN 3-540-43946-3.
- Tsuchiya H., Hibino K., Kawata K., Hotta N., Tateyama N., Ohnishi M., Takita M., Chen D., Huang J., Miyasaka M., Kondo I., Takahashi S., Shimoda Y., Lu H., Zhang L.L., Yu H.H., Nie S.V., Munakata K., Enoto T., Makishima K.* Observation of thundercloud-related gamma rays and neutrons in Tibet // Physical Review D. 2012. V. 85. № 9. P. 092006.  
<https://doi.org/10.1103/physrevd.85.092006>
- Tsuchiya H., Enoto T., Iwata K., Yamada S., Yuasa T., Kitaguchi T., Kawaharada M., Nakazawa K., Kokubun M., Kato H., Tamagawa T., Makishima K.* Hardening and termination of long-duration  $\gamma$  rays detected prior to lightning // Physical Review Letters. 2013. V. PRL111. P. 0150001-1/5.
- Waitukaitis S.R., Lee V., Pierson J.M., Forman S.L., Jaeger H.M.* Size-dependent same-material tribocharging in insulating grains // Physical Review Letters. 2014. V. 112. Iss. 21. P. 218001.  
<https://doi.org/10.1103/physrevlett.112.218001>

## Possible Mechanisms of Anomalous Electromagnetic Radiation of the Earth's Atmosphere

G. S. Bordonskiy

*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia*

The paper analyzes previously performed measurements of a sharp increase in the intensity of atmospheric radiation at wavelengths of 8.5 mm, 3.3 mm and 8–12  $\mu\text{m}$  during a magnetic storm on December 14, 2006. The measurements were performed in Chita, when the event coincided with the arrival of an atmospheric front, which caused air cooling. The causes of the phenomenon that are associated with the acceleration of electrons in the electric fields of the atmosphere are considered. The study of the phenomenon is of interest, both for atmospheric physics and for remote sensing. Nonthermal electromagnetic radiation in the microwave, infrared and visible ranges can be used to detect and study atmospheric processes: avalanches of runaway electrons, photonuclear reactions, electrization, thunderstorms, magnetic storms, precursors of natural catastrophic and anomalous phenomena.

*Keywords:* runaway electrons, photonuclear reactions, atmospheric physics, remote sensing

### REFERENCE

*Avakjan S.V., Voronin N.A.* O vozmozhnom fizicheskom mehanizme vozdeystviya solnechnoj i geomagnitnoj aktivnosti na javleniya v nizhnej atmosfere [On possible physical impact of solar and geomagnetic activity to phenomena in low atmosphere] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2007. № 2. P. 28–33. (In Russian).

*Askar'yan G.A.* (1974). The self-focusing effect // *Soviet Physics Uspekhi*. 1974. V. 16. № 5. P. 680–686. doi: 10.1070/pu1974v016n05abeh004130.

*Babich L.P.* Generation of neutrons in giant upward atmospheric discharges // *J. Experimental and Theoretical Physics Letters (JETP Letters)*. 2006. V. 84. № 6. P. 285–288. doi: 10.1134/S0021364006180020.

*Babich L.P.* Thunderstorm neutrons // *Physics-Uspekhi*. 2019. V. 62. № 10 P. 976–999. doi: 10.3367/ufne.2018.12.038501.

*Bordonskiy G.S.* Vozmozhnye sledy lazernogo izlucheniya atmosfery Zemli [Possible traces of laser radiation from the Earth's atmosphere] // *Optika atmosfery i okeana*. 1990. V. 3. № 4. P. 390–393. (In Russian).

*Bordonskiy G.S.* Poiski aktivnykh prirodnykh sred (kommentarii k stat'e V.A. Tatarchenko "O prirode nekotorykh istochnikov infrakrasnogo izlucheniya atmosfery") [Searches for active natural environments (comments on the article by V.A. Tatarchenko "On the nature of some sources of infrared radiation of the atmosphere")] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2010. № 2. P. 91–93. (In Russian).

*Bordonskiy G.S., Gurulev A.A.* Registratsiya mikrovolnovogo i infrakrasnogo izlucheniya atmosfery v g. Chite vo vremya magnitnoi buri 14 dekabrya 2006 g [Measurement of microwave and infra-red emission of chita atmosphere at the magnetic storm in December 14, 2006] // *Uchenye zapiski Zabaikal'skogo gosudarstvennogo gumanitarno-pedagogicheskogo universiteta im. N.G. Chernyshevskogo*. 2009. № 2(25). P. 40–43. (In Russian).

*Bordonskiy G.S., Krylov S.D., Gurulev A.A.* Led 0 v prirodnoi srede (eksperimental'nye dannye i predpolagaemye oblasti ego sushchestvovaniya) [Ice 0 in the natural environment (experimental data and suggested areas of its existence)] // *Led i sneg*. 2020. № 2. (In Russian).

*Gal'perin S.M., Kashleva L.V., Mikhailovskii Yu.P., Stepanenko V.D.* Elektrizatsiya konvektivnykh oblakov v estestvennom tsikle razvitiya i pri vozdeistviyakh (samoletnye issledovaniya) [Electrification of convective clouds in the natural cycle of development and during impacts (aircraft research)] // *Voprosy atmosfernogo elektrichestva*. L.: Gidrometeoizdat. 1990. 280 p. (In Russian).

*Gordiets B.F., Panchenko V.Ya.* Gas lasers with solar excitation // *Sov. Phys. Usp.* 1986. V. 29. № 7. P. 703–719. doi: 10.1070/PU1986v029n07ABEH003466.

*Gurevich A.V., Zybin K.P.* Runaway breakdown and electric discharges in thunderstorms // *Physics-Uspekhi*. 2001. V. 44. № 11. P. 1119–1140. doi: 10.1070/pu2001v044n11abeh000939.

*Letohov V.S.* Lazernoe dejstvie v atmosferah zvezd [Laser action in the atmospheres of stars]. Preprint Instituta spektroskopii AN SSSR. M. 1972. Pr. № 9. 24 p. (In Russian). *Magnetic Storms December 15, 2006*. 2020. URL: [https://tesis.lebedev.ru/magnetic\\_storms.html?m=12&d=15&y=2006](https://tesis.lebedev.ru/magnetic_storms.html?m=12&d=15&y=2006)

*Men'shikov L.I.* (1999). Superradiance and related phenomena // *Physics-Uspekhi*. 1999. V. 42. № 2. P. 107–147. doi:10.1070/pu1999v042n02abeh000521.

*Petrov Yu.V.* The Oklo natural nuclear reactor // *Sov. Phys. Usp.* 1977. V. 20. P. 937–944. doi: 10.1070/PU1977v020n11ABEH005473.

*Raizer Y.P.* Optical discharges // *Soviet Physics Uspekhi*. 1980. V. 23. № 11. P. 789–806. doi: 10.1070/pu1980v023n11abeh005064

*Starodubtsev S.A., Kozlov V.I., Toropov A.A., Mullayarov V.A., Grigor'ev V.G., Moiseev A.V.* First experimental observations of neutron bursts under thunderstorm clouds near sea level // *J. Experimental and Theoretical Physics Letters*. 2012. V. 96. № 3. P. 188–191.

*Fedorov V.F., Frolov Yu.A., Shishkov P.O.* Millimetric electromagnetic radiation of a lightning return stroke // *J. Applied Mechanics and Technical Physics*. 2001. V. 42. № 3. P. 392–396.

*Filonenko A.D.* On the nature of an anomalous RF electromagnetic pulse caused by an extensive air shower // *Technical Physics Letters*. 2001. V. 27. P. 398–400.

- Sharkov E.A., Kuzmin A.V., Vedenkin N.N., Jeong S., Erma-  
kov D.M., Kvitka V.E., Kozlova T.O., Komarova N.Yu., Mi-  
naev P.Yu., Park H.H., Pashinov E.V., Pozanenko A.S., Pra-  
solov V.O., Sadovskii I.N., Sazonov D.S., Sierlyadkin V.V.,  
Khapin Yu.B., Hong G., Chernenko A.M.* Kosmicheskij jek-  
speriment "konvergencija": nauchnye zadachi, bortovaja  
apparatura, metodiki reshenija obratnyh zadach [Space Ex-  
periment "Convergence": Scientific Objectives, On-Board  
Equipment, Methods of Reverse Problems] // *Issledovanie  
Zemli iz kosmosa*. 2018. V.4. P. 71–96. (In Russian).
- Albrecht R.I., Goodman S.J., Buechler D.E., Blakeslee R.J.,  
Christian H.J.* Where are the lightning hotspots on Earth? // *Bul-  
letin of the American Meteorological Society*. 2016. V. 97.  
№ 11. P. 2051–2068. doi: 10.1175/BAMS-D-14-00193.1.
- Babich L.P., Donskoy E.N., Kutsyk I.M., Roussel-Dupre R.A.*  
The feedback mechanism of runway air breakdown // *Geo-  
physical Resarch Letters*. 2005. V. 32. № 9. P. L09809 (1–5).  
doi: 10.1029/2004gl021744.
- Chilingarian A., Mkrtchan H., Karapetyan G., Sargsyan B.,  
Arestakesyan A.* Catalog of 2017 thunderstorm ground en-  
hancement (TGE) events observed on Agarats // *Scientific  
Reports*. 2019. V. 9 № 1. P. 6253-1/12. doi.org/  
10/1038/s41598-019-42786-7
- Department of Atmospheric Science. 2020. [http://weather.  
uwo.edu/upperair/sounding.html](http://weather.uwo.edu/upperair/sounding.html)
- Dwyer J.R.* A fundamental limit on electron fields in air // *Geophysical Research Letters*. 2003. V. 30. № 20. P. 2055.  
doi: 10.1029/2003GL017781.
- Dwyer J.R., Smith D.M., Cummer S.A.* High-energy atmo-  
spheric physics: Terrestrial Gamma-Ray flashes and related  
phenomena // *Space Science Review*. 2012. V. 173. № 1–4.  
P. 133–196. doi: 10.1007/s11214-012-9894-0.
- Enoto T., Wada Y., Furuta Y., Nakazawa K., Yuasa T., Okuda K.,  
Makishima K., Sato M., Sato K., Nakano T., Umemoto D.,  
Tsuchiya H.* Photonuclear reactions triggered by lightning  
discharge // *Nature*. 2017. V. 551. № 7681. P. 481–484. doi:  
10.1038/nature24630.
- Gurevich A.V., Milikh G.M., Roussel-Dupre R.A.* Runaway  
electron mechanism of air breakdown and preconditioning  
during thunderstorm // *Physica Letters A*. 1992. V. 165.  
№ 5–6. P. 463–468. doi: 10.1016/0375-9601(92)90348-P.
- Liu N., Dwyer J.R.* Modeling terrestrial gamma ray flashes  
produced by relativistic feedback discharges // *J. Geophys-  
ical Research: Space Physics*. 2013. V. 118. № 5. P. 2359–  
2376.
- Mewald R.A., Leske R.A., Stone E.C., Barghouty A.S.F., Lab-  
rador A.W., Cohen C.M.S., Cummings A.C., Davis A.J., von  
Rosenvinge T.T., Wiedenbeck M.E.* STEREO observation of  
energetic neutral hydrogen atoms during the 2006 Decem-  
ber 5 Solar flare // *The Astrophysical Journal Letters*. 2009.  
V. 693. № 1. P. 693: L11–L15. doi: 10.1088/0004-  
637X/693/1/L11.
- Neutron monitor primary data from Yakutsk station. 2020.  
<http://ysn.ru/ipm/ykt/>
- Pogrebenko S.V., Gurvits L.I., Elitzur M., Cosmovici C.B.,  
Avruch I.M., Montebugnoli S., Salerno E., Pluchino S., Mac-  
cafen G., Mujunen A., Ritakari J., Wagner J., Molera G.,  
Uunila M.* Water masers in the Saturnian system // *Astron-  
omy and Astrophysics*. 2009. V. 494. № 2. P. L1–L4. doi:  
10.1051/0004-6361:200811186.
- Reuveni Y., Yair Y., Price C., Steinitz G.* Ground level gam-  
ma-ray and electric field enhancements during disturbed  
weather: Combined signatures from convective clouds,  
lightning and rain // *Atmospheric Research*. 2017. V. 196.  
№ 4. P. 142–150.
- Smith D.M., Dwyer J.R., Hazelton B.J., Grefenstette B.W.,  
Martinez-McKinney G.F.M., Zhang Z.Y., Lowell A.W., Kelley N.A.,  
Splitt M.E., Lazarus S.M., Ulrich W., Schaal M., Saleh Z.H.,  
Cramer E., Rassoul H.K., Cummer S.A., Lu G., Blakeslee R.G.*  
The rarity of terrestrial gamma-ray flashes // *Geophysics  
Research Letters*. 2011. V. 38. № 8. P. L08807: 1–5. doi:  
10.1029/2011gl046875.
- Splitt M.E., Lazarus S.M., Barnes D., Dwyer J.R., Rassoul H.K.,  
Smith D.M., Hazelton B., Grefenstette B.* Thunderstorm char-  
acteristics associated with RHESSI identified terrestrial  
gamma ray flashes // *J. Geophysical Research*. 2910. V. 115.  
P. A00E38. doi: 10.1029/2009JA014622.
- Sharkov E.A.* Passive Microwave Remote Sensing of the  
Earth: Physical Foundations. Berlin, N.Y., London, Paris,  
Tokyo. Springer/PRAXIS. 2003. 613 p. ISBN 3-540-  
43946-3.
- Tsuchiya H., Hibino K., Kawata K., Hotta N., Tateyama N.,  
Ohnishi M., Takita M., Chen D., Huang J., Miyasaka M.,  
Kondo I., Takahashi S., Shimoda Y., Lu H., Zhang L.L., Yu H.H.,  
Nie S.V., Munakata K., Enoto T., Makishima K.* Observation  
of thundercloud-related gamma rays and neutrons in Tibet // *Physical Review D*. 2012. V. 85. Iss. 9. P. 092006. doi:  
10.1103/physrevd.85.092006.
- Tsuchiya H., Enoto T., Iwata K., Yamada S., Yuasa T.,  
Kitaguchi T., Kawaharada M., Nakazawa K., Kokubun M.,  
Kato H., Tamagawa T., Makashima K.* Hardening and ter-  
mination of long-duration  $\gamma$  rays detected prior to lightning // *Physical Review Letters*. 2013. V. PRL111. P. 0150001-1/5.
- Waitukaitis S.R., Lee V., Pierson J.M., Forman S.L., Jaeger H.M.*  
Size-dependent same-material tribocharging in insulating  
grains // *Physical Review Letters*. 2014. V. 112. Iss. 21.  
P. 218001. doi: 10.1103/physrevlett.112.218001.