

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКОВ ДЛИТЕЛЬНОГО МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГРОЗОВОЙ АТМОСФЕРЫ НА ВОЛНЕ 1.35 СМ

© 2024 г. Г. С. Бордонский¹*, А. А. Гурулев¹, А. О. Орлов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия

*E-mail: lgc255@mail.ru

Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

Измерение нетепловых излучений в настоящее время является одним из направлений дистанционного зондирования Земли. Здесь недавно были открыты мощные электромагнитные излучения атмосферы, инициируемые космическими лучами, в интервале от низких частот до гамма-диапазона. Представляет особый интерес исследование таких излучений в микроволновом диапазоне, где хорошо развита техника аэрокосмических исследований. В настоящей работе приведены результаты совместных измерений микроволнового и гамма-излучения атмосферы во время гроз летом 2022 года в Забайкалье. Цель исследования заключалась в поиске относительно длительных (до нескольких минут) электромагнитных излучений вблизи частоты 22.2 ГГц на линии вращательного спектра молекул водяного пара. Предполагалось, что такая особенность может возникать из-за появления лавин убегающих электронов, порожденных космическими лучами. В этом процессе, кроме тормозного гамма-излучения возникает возбуждение газовой среды, что может вызывать ее свечение в микроволновом диапазоне. В случае сильной электризации в полях с напряженностью выше 0.284 МВ/м возможно возникновение уникального явления — самоподдерживающейся фотоядерной реакции в нижней атмосфере в грозных облаках. При этом процессе электромагнитное свечение может длиться от единиц до десятков минут. В выполненном исследовании обнаружено несколько эпизодов возрастания интенсивности излучения в микроволновом диапазоне, сопровождающихся импульсами гамма-излучения в грозной атмосфере. Обнаруженное в эксперименте свечение может быть объяснено локальными электрическими разрядами при возрастании электризации облаков. Другое объяснение — возникновение самоподдерживающейся фотоядерной реакции, создающей большой объем возбужденного газа. Обсуждены пути совершенствования методики микроволновых измерений для регистрации высокоэнергетических явлений в нижней атмосфере на большом удалении от измерительной аппаратуры, где гамма-лучи не регистрируются, с использованием ИСЗ.

Ключевые слова: электризация атмосферы, микроволновое излучение, водяной пар, фотоядерные реакции, дистанционное зондирование

DOI: 10.31857/S0205961424010079, **EDN:** GMLJYT

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в атмосфере Земли было обнаружено импульсное электромагнитное излучение с частотным спектром от нулевых до частот гамма-диапазона. Это открытие связано с исследованиями из космоса и подтверждено наземными наблюдениями. Одним из первых систематических измерений являются работы на Тянь-Шаньской высокогорной станции космических лучей (Антонова и др., 2007), где проводились измерения потоков частиц и электромагнитных излучений в широком диапазоне частот, в том числе мегагерцовом (0.1–30 МГц) и на частоте УКВ диапазона (250 МГц). Обнаруженные импульсные из-

лучения были объяснены возникновением лавин “убегающих” электронов (Гуревич, Зыбин, 2001), которые первоначально порождаются космическими частицами, а затем ускоряются в электрических полях атмосферы, не испытывая торможения, до энергий порядка МэВ. При последующем торможении образовавшихся лавин электронов, возникают интенсивные потоки гамма-излучения. На первом этапе исследований полагали, что области генерации излучений расположены на высотах мезосферы и стратосферы, однако в последующих работах было установлено их расположение в тропосфере в грозных облаках. Были также обнаружены сверхмощные вспышки, на 12 порядков превышающие мощность излучения, чем это представлялось ранее.

Для объяснения возникновения столь мощных излучений в атмосфере был предложен механизм умножения электронов, названный “релятивистской моделью обратной связи” (Dwyer et al., 2012). При напряженности электрического поля выше порогового (0.284 МВ/м) при давлении 0.1 МПа число вторичных электронов экспоненциально возрастает и затравочные электроны ускоряются до энергии в десятки МэВ. При взаимодействии таких электронов с ядрами возникают фотоны гамма-излучения, которые приводят к фотоядерным реакциям. Подтверждение возникновения фотоядерных реакций было получено из спектральных измерений гамма-излучения, в частности, для наблюдавшихся фотонов с энергией 0.511 МэВ, соответствующей электрон-позитронной аннигиляции (Enoto, 2017).

Кроме кратковременных гамма-всплесков, были также обнаружены длительные свечения, названные TGE (Thunderstorm Ground Enhancements), продолжающиеся от нескольких секунд до десятков минут (Dwyer et al., 2012). Причем гамма-свечение может предшествовать молнии или прекращаться после молниевых разряда, которое обычно совпадает с прохождением грозовых туч. Такая самоподдерживающаяся фотоядерная реакция является своеобразным ядерным “реактором” в атмосфере.

Для изучения высокоэнергетических атмосферных событий в 2018 году была начата Миссия монитора взаимодействия атмосферы и космоса (ASIM), осуществляемая Европейским космическим агентством (Neubert et al., 2019). Приборы миссии были установлены на Международную космическую станцию для измерений рентгеновского и гамма-излучений с энергией до 20 МэВ, трех фотометров и двух камер в диапазонах 180–250 нм, 337 нм и 777.4 нм.

В работе (Бабич, 2019) представлен обзор высокоэнергетических событий в земной атмосфере, вызванных космическими лучами. Механизмы TGE остаются еще плохо изученными. Это связано со значительным затуханием гамма-излучения в грозовой атмосфере, что затрудняет регистрацию свечения на расстояниях, превышающих 1 км. Поэтому в работах (Wada et al., 2019; Wada et al., 2021) для регистрации свечения использовали зимние грозы в Японии, для которых типичная высота электризации облаков (~1 км) значительно ниже обычной, что позволяло наблюдать гамма-свечение на уровне моря. Таким образом, имеется порог по интенсивности излучения, ниже которого невозможно регистрировать процесс возникновения области с фотоядерной реакцией на значительном удалении от него (за пределами нескольких километров). Поэтому представляет интерес разработка методик регистрации событий на удалении от их возникновения на десятки-сотни километров и более. Следу-

ет отметить отсутствие исследований импульсных излучений и свечений грозовой атмосферы в микроволновом диапазоне. Ранее считалось, что при пробое на убегающих электронах кратковременные всплески низкочастотных электромагнитных излучений наиболее выражены только на частотах 3–10 МГц (Антонова и др., 2007). Кроме того, важным является подтверждение представления о существовании длительных фотоядерных превращений, при которых в некоторых областях атмосферы могут возникать широкополосные источники излучения большой мощности.

Цель исследования. Идея методики регистрации самоподдерживающейся фотоядерной реакции по длительному электромагнитному излучению предложена в (Бордонский, 2020). Она заключается в измерениях возрастания интенсивности микроволнового излучения вблизи линий вращательного спектра молекул атмосферных газов. При выполнении определенных требований (достаточной заселенности верхних уровней энергии молекул, геометрии возбужденной области) в среде может возникнуть интенсивное излучение по механизму сверхизлучения (Меньшиков, 1999). В случае самофокусировки и просветления среды излучение может распространяться на значительные расстояния. В настоящей работе представлена реализация возможного варианта такой методики и осуществлен поиск микроволнового свечения грозовой атмосферы на линии вращательного спектра водяного пара.

МЕТОДИКА

Еще в 1981 г. П.Л. Капица высказал гипотезу о существовании мощного микроволнового излучения дециметрового диапазона в грозовой атмосфере (Капица, 1981). Такое излучение могло бы порождать светящиеся объекты – шаровые молнии. Однако проведенные исследования не выявили существования достаточно мощных излучений в этом диапазоне длин волн. Тем не менее мощные излучения не искали на значительно более коротких длинах волн в узких спектральных интервалах. Такие длины волн могут соответствовать линиям вращательного спектра атмосферных газов, в среде которых, например, происходят фотоядерные реакции с выделением энергии. Наиболее длинноволновые линии распространенных молекул газовых сред соответствуют гидроксиду 18 см (частота ~1.65 ГГц), водяному пару 1.35 см (частота 22.2 ГГц) и кислороду ~5 мм (полоса в области 60 ГГц). Если мощное излучение генерируется активными областями атмосферы, насыщенной водой, то линия водяного пара в тропосфере может наблюдаться на больших расстояниях от источника. Это связано не только с меньшим значением погонного затухания

на большей длине волны, но и с различием концентрации двух веществ по трассе распространения сигнала. Особенность заключается в том, что вне грозовой облачности концентрация водяного пара в единице объема существенно ниже. Погонное затухание на частоте 22.2 ГГц в стандартной атмосфере при влажности 7.5 г/м^3 относительно невелико и составляет значение $\sim 0.1 \text{ дБ/км}$ (www.itu.int, 2019). В случае линии кислорода на частоте 60 ГГц затухание составляет $\sim 10 \text{ дБ/км}$.

В эксперименте для регистрации интенсивности излучения при грозе использованы радиометры на частоты 22.2 и 13 ГГц в полосе частот 0.6 и 0.8 ГГц соответственно. Измерение на 13 ГГц использовано для оценки состояния облачности. Чувствительность радиометров при постоянной времени 0.1 с – 0.1 К (для 22.2 ГГц) и 0.3 К (для 13 ГГц). Ширина диаграмм направленности антенн $\sim 20^\circ$. В качестве приемника гамма-излучения использовали дозиметр ДРГЗ-02, регистрирующий рентгеновские и гамма-фотоны с энергией до 3 МэВ, имеющий постоянную времени отклика $\sim 1 \text{ с}$. Основа дозиметра сцинтилляционный счетчик с фотоэлектронным умножителем и изотропной пространственной характеристикой детектора излучения. Кроме того, для регистрации молниевых разрядов использовали низкочастотный приемник электромагнитного излучения (на частоты 300–400 кГц) с амплитудным детектором и постоянной времени 0.5 с. Запись сигналов производили при помощи системы сбора информации с интервалом времени 0.17 с. Схема измерительной установки по предлагаемой методике представлена на рис. 1.

Установка для исследования размещалась в здании ИПРЭК СО РАН в г. Чита, на высоте 650 м над

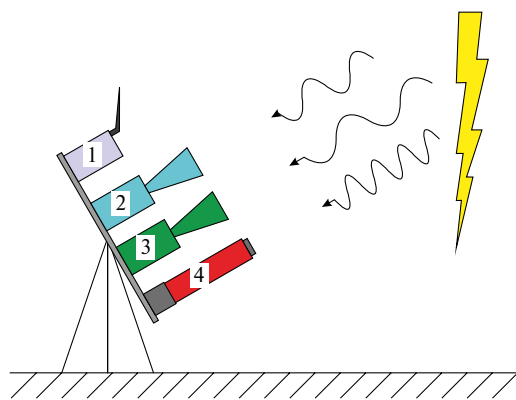


Рис. 1. Схема установки для регистрации предполагаемого электромагнитного излучения, при фотоядерных реакциях. 1 – низкочастотный регистратор молниевых разрядов; 2, 3 – микроволновые радиометры; 4 – гамма-дозиметр.

уровнем моря. Оси антенн радиометров ориентировали в юго-восточном направлении под углом 30° к горизонту. Измерения были выполнены в летнее время с июня по сентябрь 2022 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

За четыре с лишним месяца наблюдений зарегистрировано большое число гамма-вспышек с интенсивностью превышающей 10σ (σ – стандартное отклонение интенсивности фонового излучения). Из них – два эпизода длительного, порядка нескольких минут, возрастания микроволнового излучения на длине волны 1.35 см, сопровождающиеся мощной гамма-вспышкой. Гамма-свечения в эксперименте не наблюдали.

4 августа около 0h30m по местному времени возникла вспышка гамма-излучения, превышающая фоновое излучение, как минимум в 150 раз, что вызвало перегрузку и записывание электронного тракта дозиметра и системы регистрации сигналов на время 2 с. При этом наблюдали особенность – возрастание микроволнового излучения на длине волны 1.35 см с максимумом в момент вспышки гамма-излучения с последующим его уменьшением – рис. 2а, б. Выделение возрастания микроволнового излучения на 1.35 см на фоне изменения собственного радиотеплового излучения облаков (рис. 2б) выполнено из сравнения с изменением излучения на волне 2.3 см.

Как следует из полученных данных, экстремум микроволнового излучения совпал с импульсом гамма-излучения в пределах ошибки измерений 0.2 с – рис. 2б. Время свечения в микроволновом диапазоне приблизительно 40 с. Кроме того, после первого эпизода свечения наблюдали второе возрастание микроволнового излучения на время $\sim 3 \text{ мин}$. При втором возрастании микроволнового излучения повышение гамма-излучения не было зарегистрировано.

На рис. 3а, б, в приведены результаты измерений ночью 3 августа 2022 г. Для более четкого выделения изменений на графиках для микроволновых данных выполнено усреднение по 10 точкам. В этом эпизоде перегрузки гамма дозиметра не наблюдали и зарегистрированная интенсивность гамма-вспышки превышала фоновое значение в 4 раза (рис. 3а). Учитывая, что ожидаемая длительность вспышки порядка 0.1 мс, а время отклика дозиметра $\sim 1 \text{ с}$, истинное значение интенсивности гамма-излучения может быть на три-четыре порядка выше.

На рис. 3б приведены результаты измерений на длине волны 2.3 см, показывающие изменение собственного радиотеплового излучения облака.

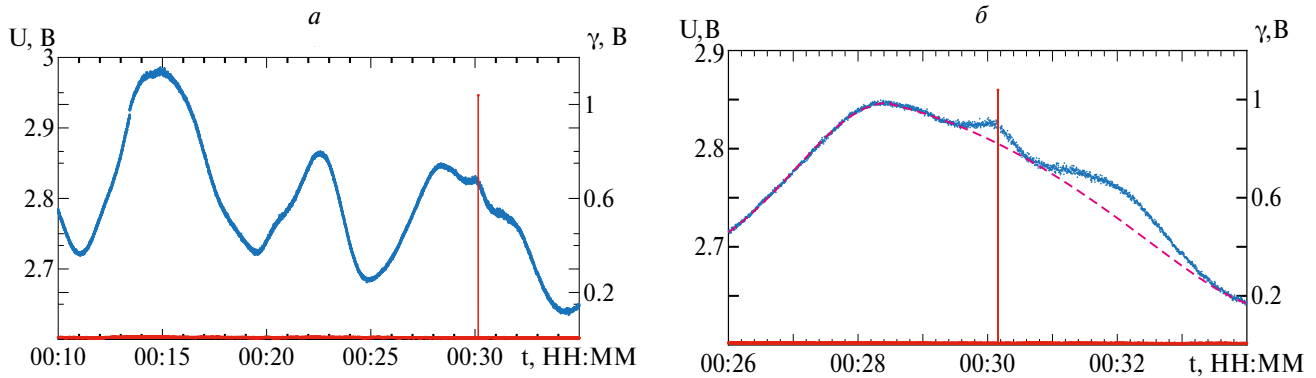


Рис. 2. *а* — запись интенсивности микроволнового излучения и импульса гамма-излучения (в единицах напряжения на выходе приборов) в ночь с 3 на 4 августа 2022 в г. Чита, *б* — график для выделенного участка с мощным гамма-излучением (γ).

На основании этих данных на рис. 3*а* проведена штриховая линия тренда, определяемая только радиотепловым излучением в случае, если отсутствует возбуждение газа на спектральной линии при неравновесном процессе.

Для определения особенностей излучения в грозовом облаке на рис. 3*б* представлена разность значений интенсивности излучения на 1.35 см и на линии тренда (по результатам, представленным на рис. 3*а*). По полученным данным длительность первой фазы микроволнового свечения на волне 1.35 см составляла 4 минуты (рис. 3*а*). Максимум первой фазы повышения микроволнового излучения совпал с гамма-вспышкой. Так же, как и для свечения, представленного на рис. 2, обнаружено второе возрастание микроволнового излучения с длительностью ~ 3 минут без повышения интенсивности гамма-излучения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выполненные исследования по поиску длительных микроволновых свечений на линии вращательного спектра водяного пара 1.35 см подтвердили его существование на время порядка минуты в грозовой атмосфере. При этом свечение достигало максимума с возникновением гамма-вспышки, после которой наблюдали падение интенсивности микроволнового излучения с последующим его возрастанием, но без гамма-излучения, превышающего фоновое. Повторное возрастание активности среды в виде микроволнового свечения можно объяснить восстановлением электризации активной области с меньшим значением напряженности электрического поля в ней. Одно из предположений о характере обнаруженного эффекта можно связать с восстановлением значительной электризации, которая

создает активную среду для микроволнового излучения и возникновения механизма сверхизлучения (Меньшиков, 1999). Такое излучение может распространяться широкими пучками в направлении большей протяженности области возбужденной газовой среды и, при высокой интенсивности, самофокусироваться. В случае, если электрическое поле превышает пороговое значение ~ 0.3 МВ/м, может возникать лавина убегающих электронов с релятивистской обратной связью и появляться область с самоподдерживающейся фотоядерной реакцией. Такая ситуация будет проявляться относительно длительным гамма-свечением. В этом случае можно ожидать появление мощных пучков микроволнового излучения.

В наших измерениях гамма-свечение не было обнаружено. Возможно, это связано с влиянием затухания при уменьшении мощности гамма-излучения из-за смещения активной области облака при ветре и вариациям направленности излучения (в отличие от микроволнового излучения). Кроме того, в выполненном эксперименте было зарегистрировано малое число наблюдений аномалий в районе проведения эксперимента на одном пункте, что не позволило накопить статистику событий. К примеру, в статье (Wada, 2021) сообщалось, что за 4 года наблюдений в Японии на 10 наземных мониторах в области с активной зимней грозовой деятельностью и низкой облачностью было зарегистрировано 70 длительных свечений в гамма-диапазоне. Использовали чувствительные детекторы с размерами кристаллов $30 \times 5 \times 5$ см и при анализе отбирали данные с уровнем сигналов выше 5σ . При этом соответствующая вероятность регистрации гамма-свечения составляла приблизительно два события, длительностью порядка одной минуты, на детектор за сезон измерений.

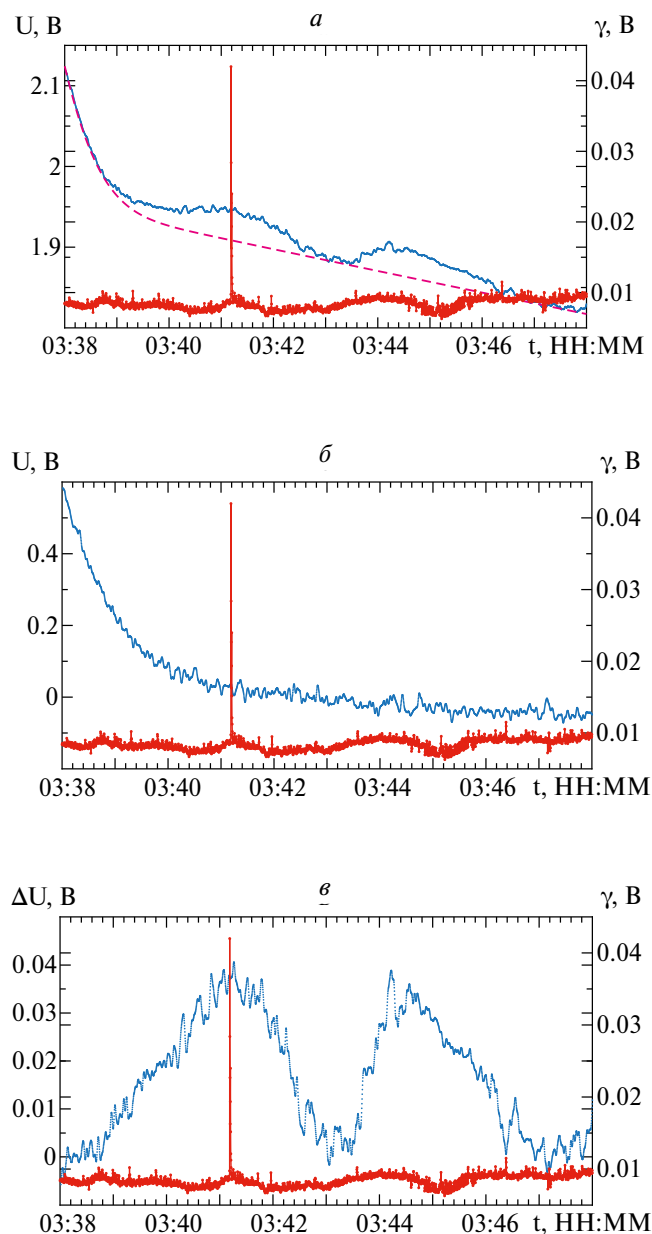


Рис. 3. Запись интенсивности микроволнового излучения и импульса гамма-излучения в ночь со 2 на 3 августа 2022 в г. Чита: *a* — для длины волны 1.35 см; *б* — для длины волны 2.3 см; *в* — приращение сигнала на 1.35 см, вызванное высокоэнергетическими событиями в атмосфере (в единицах напряжения на выходе радиометра).

В наших измерениях было зарегистрировано 2 проявления длительных микроволновых свечений около нескольких минут при уровнях их регистрации $>30\sigma$, сопровождавшихся интенсивными гамма-вспышками. Интересно отметить, что, согласно обзору в (Wada, 2021), гамма-свечение сопровождается сильные электрические поля внутри грозных об-

лаков и не связано непосредственно с молниевыми разрядами. Они также часто гасятся близлежащими разрядами, так как токи молнии могут уменьшить электрические поля. Эти выводы согласуются с нашими результатами.

Также ранее было показано, что низкоэнергетическая часть TGE обусловлена эманацией радона (Rn^{222}) из горных пород, которая в конечном итоге создает гамма-свечение грозных облаков (Bogomolov et al., 2019). В любом случае, предварительные данные дают основание считать, что предлагаемая методика может существенно расширить круг регистрируемых явлений, если понизить порог уверенной регистрации для нетеплового микроволнового излучения, например, до значения 5σ . Для этого следует улучшить выделение сигнала на линии 22.2 ГГц на фоне вариаций радиотеплового излучения атмосферы при изменении характеристик аэрозоля облака. Это можно сделать, например, путем измерений в центре линии и на максимально близком отдалении от него, где сверхизлучение не возникает, с последующим вычислением разности двух сигналов.

Для получения более полной информации можно дополнительно проводить измерения на сильной линии водяного пара на частоте 183.3 ГГц, а также линии гидроксидов и других возможных линиях вращательного спектра, появляющихся при ионизации газов и возникновении ионных комплексов (озона и других).

В плане развития методик измерений представляет значительный интерес установка аппаратуры высоко в горах или на ИСЗ, что существенно расширит горизонт обзора как нижней тропосферы, так и более высоких областей атмосферы. В случае установки аппаратуры на ИСЗ при углах наблюдения около 45 градусов для излучения на частотах вблизи 22 ГГц ожидаемые дополнительные потери по трассе распространения сигнала могут иметь значение не более 10 децибел. В случае положения излучателя в верхней тропосфере регистрация источника более благоприятна. Микроволновые измерения можно использовать и для дистанционных исследований электрической активности грозных планетных атмосфер в случае возникновения в них лавин убегающих электронов.

Исследование кратковременных и продолжительных от секунд до десятков минут излучений высокой мощности представляет как научный интерес, так и практическое значение при разработке более эффективных мероприятий по грозозащите промышленных объектов и разнообразных технических систем (связи, навигации, передачи энергии, транспорта). Их регистрация из космоса позволит более оперативно решать вопросы безо-

пасности природных и технических объектов и эксплуатации инженерных сооружений.

ВЫВОДЫ

1. Измерения микроволнового излучения грозовой атмосферы на длине волны 1.35 см за летний период в г. Чита выявили несколько эпизодов повышения радиояркости на время порядка нескольких минут, которые можно связать с возникновением повышенной электризации облаков. Повышенная электризация проявилась в виде всплеск гамма-излучения (и молниевых разрядов), которые обычно связывают с появлением ускоренных лавин убегающих электронов.

2. Эпизоды наблюдения длительного микроволнового свечения и их совпадения с интенсивными гамма-всплесками указывают на возможную связь наблюдавшегося эффекта с возникновением самоподдерживающихся фотоядерных реакций.

3. Предварительное исследование показало перспективность выполнения измерений длительного микроволнового свечения по предлагаемой методике, например, при наблюдениях на нескольких линиях вращательного спектра молекул (H_2O , O_2 , OH). Установка аппаратуры на ИСЗ для регистрации оптических, рентгеновских и гамма-излучений, включающей микроволновые радиометры, позволит эффективно исследовать высокоэнергетические события также и в нижней тропосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонова В. П., Вильданова Л. И., Гуревич А. В., Зыбин К. П., Караитин А. Н., Крюков С. В., Рябов В. А., и др. Изучение взаимосвязи процессов в грозовой атмосфере с высокоэнергичными космическими лучами на Тянь-Шанском экспериментальном комплексе “Гроза” // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. Вып. 11. С. 109–114.
- Бабиц Л. П. Грозовые нейтроны // УФН. 2019. Т. 189. № 10. С. 1044–1069. DOI: 10.3367/UFNr.2018.12.038501.
- Бордонский Г. С. Возможные механизмы аномальных электромагнитных излучений атмосферы Земли, вызванные космическими лучами // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 4. С. 63–73. DOI: 10.31857/S020596142004003X.
- Гуревич А. В., Зыбин К. П. Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы // УФН. 2001. Т. 171. № 11. С. 1177–1199. DOI: 10.3367/UFNr.0171.200111b.1177.
- Затухание в атмосферных газах и связанное с ним воздействие. Рекомендации МСЭ-R. 08–2019. Р. 676–12. // www.itu.int. 23.02.2022. 30 p. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-12-201908-S!!PDF-R.pdf.
- Каница П. Л. О природе шаровой молнии // Эксперимент. Теория. Практика. М.: Наука, 1981. С. 64–71.
- Меньшиков Л. И. Сверхизлучение и некоторые родственные явления // УФН. 1999. Т. 169. № 2. С. 113–154. DOI: 10.3367/UFNr.0169.199902a.0113.
- Bogomolov V. V., Iyudin A. F., Maximov I. A., Panasyuk M. I., Svertilov S. I. Comment on “Long lasting low energy thunderstorm ground enhancements and possible Rn-222 daughter isotopes contamination” // Phys. Rev. D. 2019. V. 99. № 10. P. 108101. DOI: 10.1103/PhysRevD.99.108101.
- Dwyer J. R., Smith D. M., Cummer S. A. High-Energy Atmospheric Physics: Terrestrial Gamma-Ray Flashes and Related Phenomena // Space Sci. Rev. 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., et al. Photonuclear reactions triggered by lightning discharge // Nature. 2017. V. 551. № 7681. P. 481–484. DOI: 10.1038/nature24630.
- Neubert T., Ostgaard N., Reglero V., Blanc E., Chanrion O., Oxborrow C. A., Orr A., et al. The ASIM Mission on the International space station // Space Sci. Rev. 2019. P. 215–226. DOI: 10.1007/s11214-019-0592-z.
- Wada Y., Matsumoto T., Enoto T., Nakazawa K., Yuasa T., Furuta Y., Yonetoku D., et al. Catalog of gamma-ray glows during four winter seasons in Japan // Phys. Rev. Research. 2021. V. 3. № 4. P. 043117. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.3.043117.
- Wada Y., Enoto T., Nakamura Y., Furuta Y., Yuasa T., Nakazawa K., Morimoto T., et al. Gamma-ray glow preceding downward terrestrial gamma-ray flash // Commun. Phys. 2019. V. 2. P. 67. DOI: 10.1038/s42005-019-0168-y.

Preliminary Results of Searches for Long-Term Microwave Radiation of a Thunderstorm Atmosphere at a Wavelength of 1.35 cm

G. S. Bordonskiy¹, A. A. Gurulev¹, A. O. Orlov¹

¹*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russia*

Measurement of non-thermal radiation is currently one of the directions of remote sensing of the Earth. Powerful electromagnetic radiation of the atmosphere, initiated by cosmic rays, in the range from low frequencies to the gamma range, has recently been discovered here. Of particular interest is the study of such radiation in the microwave range, where the technique of aerospace research is well developed. This paper presents the results of joint measurements of microwave and gamma radiation of the atmosphere during thunderstorms in the summer of 2022 in Transbaikalia. The aim of the study was to search for relatively long (up to several minutes) electromagnetic radiation near the frequency of 22.2 GHz on the line of the rotational spectrum of water vapor molecules. It was assumed that such a feature could arise due to the appearance of avalanches of escaping

electrons generated by cosmic rays. In this process, in addition to the braking gamma radiation, the gas medium is excited, which can cause its superradiance in the microwave range. In the case of strong electrification in fields with a voltage above 0.284 MV/m, a unique phenomenon may occur - a self-sustaining photonuclear reaction in the lower atmosphere in thunderclouds. In this process, the electromagnetic glow can last from units to tens of minutes. In the performed study, several episodes of increasing radiation intensity in the microwave range were detected, accompanied by gamma-ray pulses in a thunderstorm atmosphere. The glow detected in the experiment can be explained by local electrical discharges with increasing electrification of clouds. Another explanation is the occurrence of a self-sustaining photonuclear reaction that creates a large volume of excited gas. The ways of improving the microwave measurement technique for recording high-energy phenomena in the lower atmosphere at a great distance from the measuring equipment, where gamma rays are not recorded, using the satellite are discussed.

Keywords: atmospheric electrification, microwave radiation, water vapor, photonuclear reactions, remote sensing

REFERENCES

- Antonova V. P., Vildanova L. I., Gurevich A. V., Zybin K. P., Karash-tin A. N., Kryukov S. V., Ryabov V. A., et al.* Izucheniye vzaimosvyazi processov v grozovoy atmosfere s vysokoenergichnymi kosmicheskimi luchami na Tyan'-Shan'skom eksperimental'nom komplekse "Groza" [Studying the relationship of processes in a thunderstorm atmosphere with high-energy cosmic rays at the Tien Shan Experimental Complex "Groza"] // *Journal of Technical Physics*. 2007. Vol. 77. Issue 11. P. 109–114. (In Russian).
- Attenuation by atmospheric gases and related effects. Recommendation ITU-R P. 676–12 (08/2019) // www.itu.int. 23.02.2022. 31 p. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-12-201908-S!!PDF-E.pdf.
- Babich L. P.* Grozovye neitrony [Thunderstorm neutrons] // *UFN*. 2019. V. 189. № 10. P. 1044–1069. (In Russian). DOI: 10.3367/UFNr.2018.12.038501.
- Bogomolov V. V., Iyudin A. F., Maximov I. A., Panasyuk M. I., Svertilov S. I.* Comment on "Long lasting low energy thunderstorm ground enhancements and possible Rn-222 daughter isotopes contamination" // *Phys. Rev. D*. 2019. V. 99. № 10. P. 108101. DOI: 10.1103/PhysRevD.99.108101.
- Bordonskiy G. S.* Vozmozhnye mekhanizmy anomal'nykh elektromagnitnykh izlucheniye atmosfery Zemli, vyzvannye kosmicheskimi luchami [Possible Mechanisms of Anomalous Electromagnetic Radiation in the Earth's Atmosphere] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2020. № 4. P. 63–73. (In Russian). DOI: 10.31857/S020596142004003X.
- Dwyer J. R., Smith D. M., Cummer S. A.* High-Energy Atmospheric Physics: Terrestrial Gamma-Ray Flashes and Related Phenomena // *Space Sci. Rev.* 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., et al.* Photonuclear reactions triggered by lightning discharge // *Nature*. 2017. V. 551. № 7681. P. 481–484. DOI: 10.1038/nature24630.
- Neubert T., Ostgaard N., Reglero V., Blanc E., Chanrion O., Oxborrow C. A., Orr A., et al.* The ASIM Mission on the International space station // *Space Sci. Rev.* 2019. P. 215–226. DOI: 10.1007/s11214-019-0592-z.
- Gurevich A. V., Zybin K. P.* Proboi na ubegayushchikh elektronakh i elektricheskie razryady vo vremya grozy [Runaway breakdown and electric discharges in thunderstorms] // *UFN*. 2001. V. 171. № 11. P. 1177–1199. (In Russian). DOI: 10.3367/UFNr.0171.200111b.1177.
- Kapitsa P. L.* O prirode sharovoi molnii [On the nature of ball lightning] // *Eksperiment. Teoriya. Praktika*. Moscow: Nauka, 1981. P. 64–71. (In Russian).
- Men'shikov L. I.* Sverkhizlucheniye i nekotorye rodstvennyye yavleniya [Superradiance and related phenomena] // *UFN*. 1999. V. 169. № 2. P. 113–154. (In Russian). DOI: 10.3367/UFNr.0169.199902a.0113.
- Wada Y., Enoto T., Nakamura Y., Furuta Y., Yuasa T., Nakazawa K., Morimoto T., et al.* Gamma-ray glow preceding downward terrestrial gamma-ray flash // *Commun. Phys.* 2019. V. 2. P. 67. DOI: 10.1038/s42005-019-0168-y.
- Wada Y., Matsumoto T., Enoto T., Nakazawa K., Yuasa T., Furuta Y., Yonetoku D., et al.* Catalog of gamma-ray glows during four winter seasons in Japan // *Phys. Rev. Research*. 2021. V. 3. № 4. P. 043117. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.3.043117.