

ОБНАРУЖЕНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ЯВЛЕНИЙ ТЕХНОГЕННОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО И ИНФРАКРАСНОГО СВЕЧЕНИЙ НОЧНОЙ АТМОСФЕРЫ НА СПУТНИКЕ «ВЕРНОВ»

Г. К. Гарипов ^{a*}, М. И. Панасюк ^{a,b}, С. И. Свертилов ^{a,b},

В. В. Богомолов ^{a,b}, В. О. Барина ^a, К. Ю. Салеев ^{a,b}

^a Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова
119234, Москва, Россия

^b Физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова
119234, Москва, Россия

Поступила в редакцию 19 января 2016 г.

На малом космическом аппарате «Вернов» (солнечно-синхронная орбита, наклонение 98°, высота 640–830 км) проводились исследования процессов генерации транзиентных явлений в верхней атмосфере Земли под воздействием потоков электронов и электромагнитных волн высокой и низкой частоты. Исследования проводились с помощью детекторов ультрафиолетового (УФ, 240–380 нм), инфракрасного и красного (ИК, 610–800 нм) оптических излучений, детекторов гамма-квантов (0.01–3 МэВ) и электронов (0.2–15 МэВ), радиоприемников высокой (0.05–15 МГц) и низкой (0.1 Гц–40 кГц) частоты. При наблюдениях в надири в ночное время были зарегистрированы оптические сигналы искусственного происхождения, распределенные вдоль меридиана в протяженной области широт в северном и южном полушариях Земли, модулированные низкой частотой. В работе приводятся примеры осциллограмм таких сигналов в УФ- и ИК-диапазонах спектра и их глобальное распределение. Обсуждается высота генерации излучения и компоненты атмосферы, которые могут быть источниками этого излучения. Особое внимание уделяется техногенным причинам возникновения этого свечения в ионосфере под воздействием на ионосферу радиостанций большой мощности как низкой, так и высокой частоты.

DOI: 10.7868/S0044451016090054

1. ВВЕДЕНИЕ

Ночное излучение Земли содержит информацию о явлениях, происходящих как в атмосфере, так и в околоземном космическом пространстве, которые могут быть вызваны как естественными процессами, так и техногенными эффектами. В этой работе в качестве одного из возможных источников обнаруженного свечения рассматриваются электромагнитные поля современных мощных радиостанций, воздействующие на ионосферу и ускоряющие электроны до энергий, достаточных для возбуждения оптического излучения молекул ионосферы. Особый интерес представляют воздействия на ионосферу низкочастотных радиостанций в килогерцевом диапа-

зоне длин волн. Сигналы от подобных радиостанций, распространяющиеся на большие расстояния с малым затуханием, могут проникать в ионосферу по направлению магнитных силовых линий и вызывать ее нагрев, более эффективный, чем излучение радиостанций, работающих на высоких частотах [1, 2]. Важной особенностью воздействия радиоизлучения на ионосферу в этом диапазоне длин волн является то, что в этой же области частот находится спектральный максимум радиоизлучения природного происхождения — молний в приземной атмосфере. По современным представлениям радиоизлучение молний может быть ответственно за генерацию электрического поля, обуславливающего транзиентные оптические события [2], наблюдающиеся между облаками и ионосферой.

Спектры основного излучения молний и низкочастотных (НЧ) радиостанций лежат в одном диапазоне длин волн, и можно ожидать, что механизмы

* E-mail: ggkmsu@yandex.ru

возбуждения свечения совпадают. Таким образом, свечение, вызванное НЧ-радиоизлучением от станций с известными параметрами, позволяет получать информацию о процессах в ионосфере, вызванных грозowymi разрядами. Эта информация может быть полезной при разработке моделей глобальной электрической цепи, связывающей воедино процессы генерации электромагнитных полей в нижней атмосфере и их взаимодействия с заряженными частицами, находящимися в верхней атмосфере и магнитосфере.

Действительно, НЧ-излучение радиостанций, а также молний распространяется практически без потерь на расстояния, соизмеримые с размерами Земли. В направлении магнитного поля излучение проникает в ионосферу и выходит в околоземное космическое пространство. Взаимодействие излучения с ионосферой вызывает ее нагрев и увеличение числа ионов и электронов, а взаимодействие с заряженными частицами вызывает их рассеяние и выпадение в атмосферу из радиационных поясов. Вследствие этих явлений во время воздействия радиоволн может возникать оптическое свечение и изменяться проводимость верхней атмосферы в масштабах глобальной электрической цепи, проходящей в плоскости геомагнитного меридиана, совпадающего с географическими координатами радиостанций или молний.

Исследования техногенного свечения представляют интерес и для целей изучения условий улучшения радиосвязи, поскольку оптический сигнал, который возникает под воздействием мощного радиоизлучения [3], содержит информацию о нелинейных процессах в ионосфере, которые вызывают перекрестные помехи и искажения при передаче информации в радиочастотном диапазоне. Вследствие нелинейных свойств ионосферы возможно и детектирование сигнала радиоизлучения, что в оптическом диапазоне позволяет наблюдать огибающую несущей частоты передающих радиостанций, либо транзитных световых событий, временная структура которых соответствует временному профилю разряда молнии.

2. ДЕТЕКТОР УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО И ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В данной работе рассматриваются экспериментальные данные прибора ДУФ (детектор УФ-излучения), установленного на спутнике «Вернов», запущенном 8 июля 2014 г. на солнечно-синхронную по-

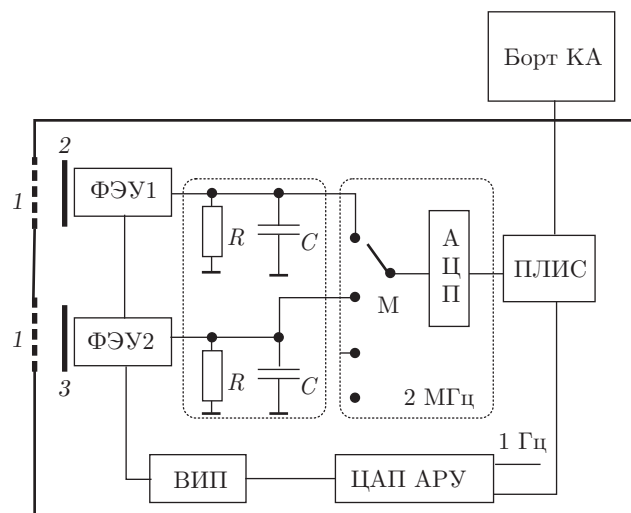


Рис. 1. Структура детектора ДУФ: 1 — многоканальный коллиматор; 2 — УФ-светофильтр УФС-2; 3 — ИК-светофильтр КС-11; R, C — цепочка интегрирования предварительного усилителя; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ПЛИС — микросхема программируемой логики; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь АРУ; ФЭУ — фотоэлектронный умножитель типа R1463 фирмы Hamamatsu; ВИП — источник питания ФЭУ; М — аналоговый мультиплексор; КА — космический аппарат

лярную орбиту с наклоном 98° , высота орбиты в апогее 830 км, в перигее 640 км.

Структурная схема детектора, предназначенного для оптических исследований, показана на рис. 1. Детектор содержит два фотоэлектронных умножителя (ФЭУ) с мультищелочными фотокатодами и эффективной площадью 0.5 см^2 у каждого. Один из них закрыт ультрафиолетовым фильтром УФС-2 и регистрирует сигналы в области длин волн 240–380 нм, а другой — красным фильтром КС-11 и регистрирует сигналы в области длин волн 610–800 нм. Поля зрения обоих ФЭУ ограничены коллиматорами с углом обзора 20° и ориентированы в наadir. Сигналы с анода ФЭУ с помощью аналогового мультиплексора подаются на вход 12-битового АЦП и преобразуются в цифровой код с частотой преобразования 2 МГц, который работает непрерывно с момента подачи питания.

Логика управления и запись одного события осуществляются в ПЛИС. В каждом временном интервале длительностью 4.5 с, начиная с импульсов, вызванных флуктуациями свечения атмосферы, отбирается наиболее яркая вспышка. Профиль вспышки записывается в виде осциллограммы, содержащей 256 точек с шагом 0.5 мс. Время интегрирования сигнала в каждой точке равно шагу на осцил-

лограмме. При измерениях сигналы регистрировались во всем диапазоне освещенностей атмосферы благодаря применению автоматической регулировки усиления (АРУ), которая фиксирует сигнал ФЭУ в заданном канале АЦП. Постоянная времени АРУ превышает длительность вспышки, поэтому сигнал не искажается во время записи осциллограммы [4]. Оперативная калибровка детектора выполнялась в ходе полета по фону свечения ночного неба в областях с минимальным свечением ночной атмосферы в безлунную ночь, интенсивность свечения которой была измерена в ходе предыдущих наблюдений на спутнике МГУ «Университетский-Татьяна» [5].

Важным преимуществом прибора является широкий диапазон чувствительности, который начинается с одного фотоэлектрона, а также широкий угол обзора, охватывающий площади в сотни тысяч квадратных километров в проекции на Землю. Это преимущество объясняется тем, что сигналы, имеющие значительные пространственные размеры, оптимально наблюдать с помощью детекторов с широким полем зрения, охватывающим всю область свечения, что обеспечивает наилучшее соотношение сигнала к шуму принимаемого сигнала и повышает вероятность обнаружения излучения, сравнимого с уровнем фона.

Измерения в УФ- и ИК-областях спектра в этом эксперименте позволяют различить по спектру излучение молекул азота и кислорода, являющихся основными компонентами атмосферы, поскольку в спектре кислорода, в отличие от спектра молекул азота, практически отсутствует ультрафиолетовое излучение. Высокое (миллисекундное) временное разрешение прибора позволяет различать их и по длительности высвечивания при импульсном свечении, поскольку время высвечивания красной линии кислорода составляет 130 нс, а молекулы азота — 8 нс [3].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Осциллограммы сигналов техногенного и естественного излучения

С помощью детектора ДУФ в эксперименте наблюдались вспышки молний, транзиентные световые события (ТСС) и модуляция фона атмосферы.

Первые результаты наблюдения вспышек оптического излучения были представлены на международных конференциях EGU2015 [6] и TERA2015 [7].

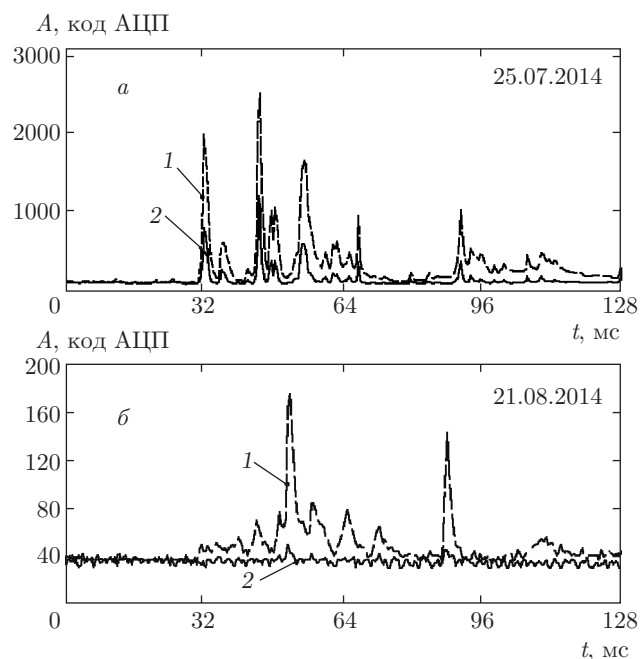


Рис. 2. Пример регистрации осциллограмм вспышек: *a* — УФ- и ИК-сигналы от молнии; амплитуда УФ-сигнала (1) превышает амплитуду ИК-сигнала (2); *б* — сигнал ТСС; регистрируется только УФ-излучение (1); ИК-сигнал (2) на уровне шума

Пример регистрации осциллограммы вспышки молнии и ТСС (transient luminous events, TLE) приведен на рис. 2.

На рис. 2*a* показан пример осциллограммы регистрации вспышки молнии, которая имеет случайную структуру, состоящую из нескольких пиков различной длительности УФ- и ИК-излучений (в большинстве случаев с преобладанием УФ-сигнала), между которыми отсутствует временная задержка. Пример ТСС показан на рис. 2*б*. Здесь также имеется сложная амплитудно-временная структура излучения с такими же параметрами, но наблюдается только УФ-излучение.

На рис. 3*a* приведен пример осциллограммы техногенного сигнала, которая, как видно, имеет колебательную структуру с переменной частотой. Между сигналами УФ- и ИК-излучений имеется временной сдвиг. Амплитуда сигнала в УФ-диапазоне значительно меньше, чем в красном и ИК-диапазонах, соответственно относительные флуктуации значительно больше в сигнале УФ-излучения. В сигнале видна только частота модуляции и отсутствует несущая частота передатчика, что, возможно, является следствием детектирующих свойств ионосферы при большой мощности передатчика [3]. На рис. 3*б* по-

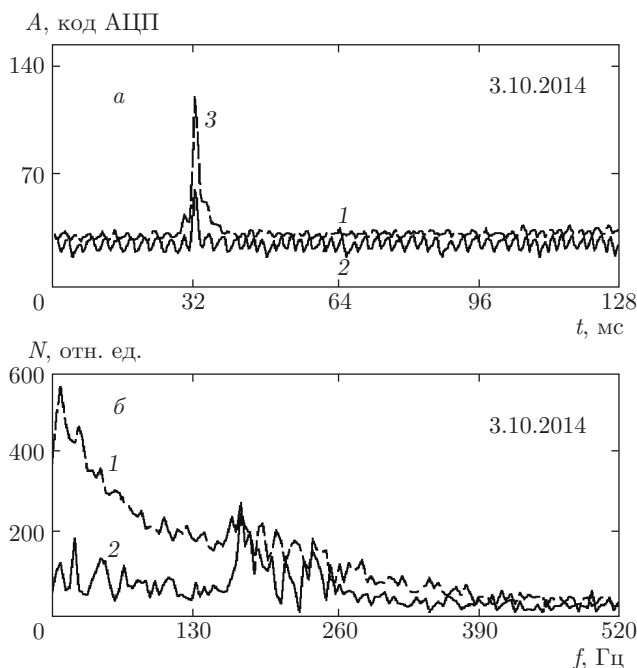


Рис. 3. а) Пример осциллограммы техногенного свечения, зарегистрированной в момент разряда молнии. б) Распределение частот в сигнале из анализа Фурье. 1 — УФ-сигнал, 2 — ИК-сигнал, 3 — импульс от разряда молнии

казаны результаты частотного анализа Фурье этого сигнала. Видно, что частоты модуляции УФ- и ИК-излучений совпадают и находятся в полосе частот примерно от 150 до 250 Гц.

Отметим, что в сигнале от молнии УФ-излучение превышает ИК-излучение (см. рис. 2а), а в случае сигналов техногенного типа амплитуда модуляции ИК-сигнала больше амплитуды модуляции УФ-сигнала, что указывает на различные условия возникновения свечения.

На рис. 4а приведен пример регистрации техногенного сигнала при изменении частоты модуляции. В данном случае частота модуляции изменилась скачком примерно от 150 до 250 Гц. Видно, что УФ- и ИК-излучения регистрируются в противофазе с временным сдвигом около трех миллисекунд, что может быть следствием процесса возбуждения ИК- и УФ-линий азота в ионосфере. На рис. 4б приведен пример регистрации сигнала флуктуаций фона ночного неба, из которого видно, что амплитуда осцилляций фона превышает уровень шума детектора.

Отметим также, что источником техногенного сигнала является процесс в атмосфере с временем высвечивания менее миллисекунды, поскольку наименьшее время нарастания и спада импульсов ос-

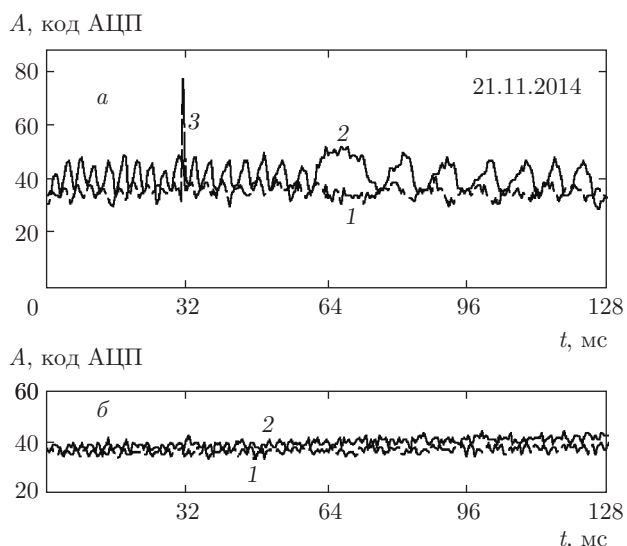


Рис. 4. а) Пример осциллограммы импульса ТСС и техногенного сигнала с изменением частоты модуляции скачком примерно от 150 до 250 Гц. Амплитуда осцилляций ИК-сигнала значительно превосходит модуляцию УФ-сигнала. б) Пример регистрации флуктуаций сигнала фона ночного неба. Сигналы УФ (1), ИК (2), ТСС (3)

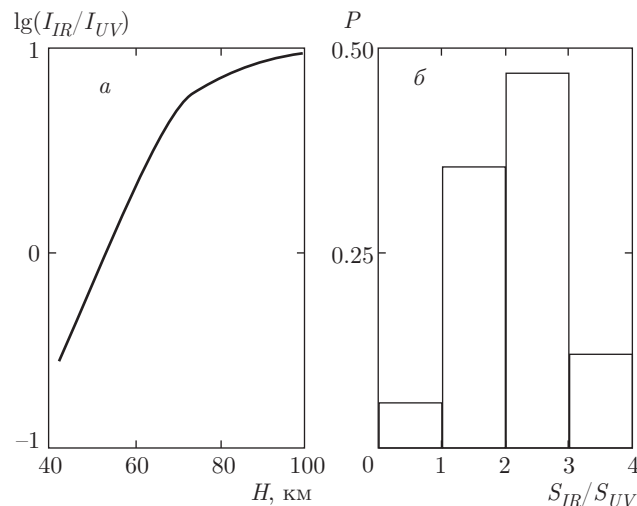


Рис. 5. а) Отношение интенсивностей (I_{IR}) и (I_{UV}) ИК- и УФ-излучений молекул азота в зависимости от высоты H , на которой находится источник излучения. б) Вероятность регистрации техногенного свечения в зависимости от отношения S_{IR}/S_{UV} амплитуд сигналов ИК- и УФ-излучений, зарегистрированных на осциллограммах

цилляций, показанных на рисунках, равно миллисекунде.

На рис. 5а представлена зависимость отношения интенсивностей ИК- и УФ-излучений молекул азота от высоты, взятая из работы [8]. Из этой зависи-

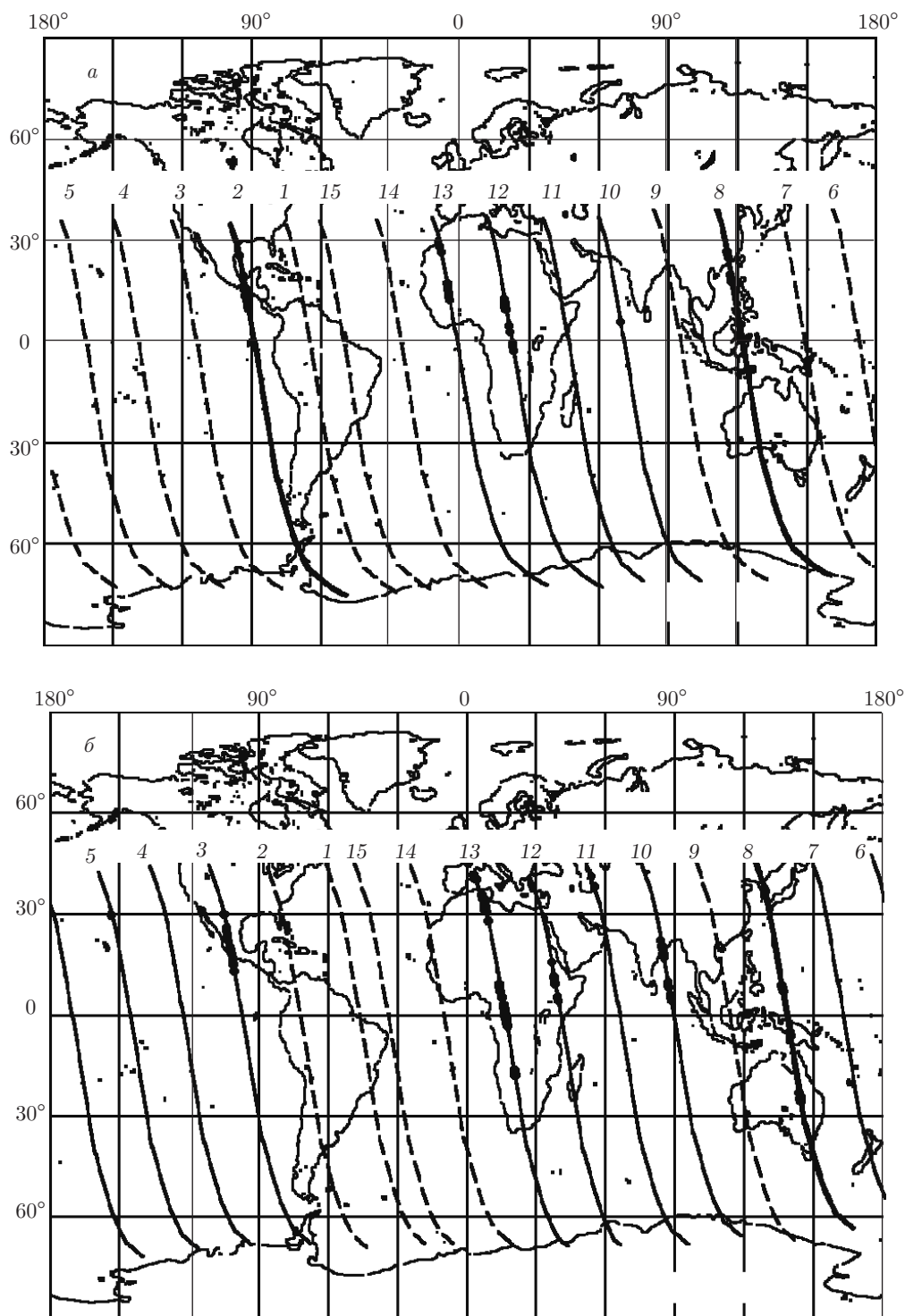


Рис. 6. Примеры географического распределения траекторий спутника на ночной стороне орбиты 5 сентября (а) и 4 октября (б) 2014 г.: жирные линии — орбиты, на которых наблюдалось техногенное свечение атмосферы; тонкие — орбиты, на которых техногенное свечение не зарегистрировано; штриховые — орбиты, на которых проводились профилактические работы; точки — координаты зарегистрированных молний

мости видно, что доля ИК-излучения растет с увеличением высоты, на которой находится источник свечения, и на высотах, превышающих сотни километров, более чем на порядок превышает УФ-излучение. На рис. 5б показана вероятность регистрации техногенного излучения в зависимости от отношения амплитуд ИК- и УФ-излучений, измеренных на осциллограмме. Видно, что ИК-сигнал практически всегда имеет большее значение. С учетом спектральной чувствительности детектора, интенсивность ИК-излучения техногенного свечения превышает интенсивность УФ-излучения не менее чем на порядок, что, согласно рис. 5а, соответствует высотам более ста километров. Действительно, чтобы перейти от амплитуд сигналов к отношению интенсивностей излучений, необходимо учитывать, что чувствительность детектора в ИК-области излучения в максимуме чувствительности примерно в пять раз меньше, чем в УФ-области.

Спектральные характеристики ФЭУ приведены в [9]. В детекторе квантовая эффективность ФЭУ в УФ-диапазоне равна 0.19, в ИК-диапазоне — 0.04.

Таким образом, из данных измерений ИК- и УФ-излучений следует, что источник техногенного свечения находится на высотах выше ста километров. Более подробно высота свечения обсуждается в разд. 4.

3.2. Географическое распределение молний и техногенного излучения, зарегистрированных с орбиты спутника Земли

На рис. 6 в качестве примера представлены карты географического распределения техногенного свечения и молний, зарегистрированных за одни сутки, соответственно 5 сентября и 4 октября 2014 г.

Сигналы регистрировались на каждой витке на ночной стороне Земли во всем диапазоне освещенностей ночного неба, начиная от Южного полюса во время южной полярной ночи, до момента выхода спутника на освещенную сторону орбиты в северном полушарии в течение примерно 28 мин. В каждом временном интервале длительностью 4.5 с, начиная с импульсов, вызванных флуктуациями фона атмосферы, отбиралась наиболее яркая вспышка и записывалась в виде осциллограммы длительностью 128 мс. Таким образом, для регистрации отбирался сигнал либо от молний, либо от транзиентных световых событий, либо от техногенного свечения с наибольшей амплитудой на временном интервале длительностью 4.5 с, а в случае их отсутствия

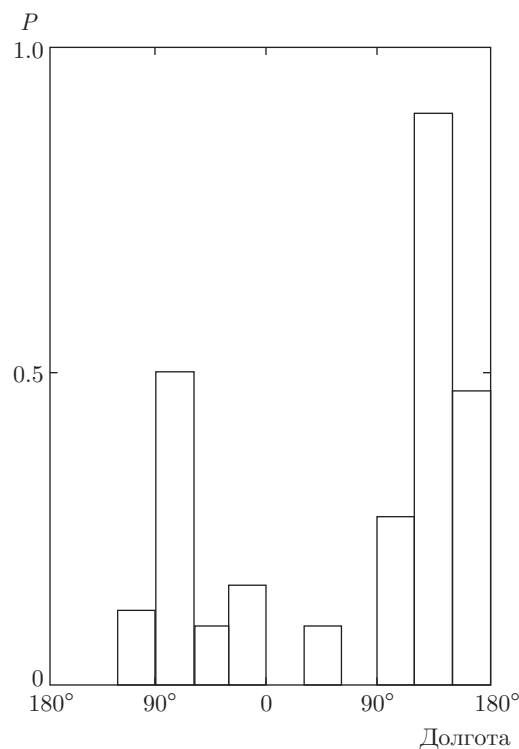


Рис. 7. Вероятность регистрации техногенного свечения в зависимости от долготы

отбиралась и записывалась осциллограмма сигнала флуктуаций фона ночного неба. На каждой витке на ночной стороне с равным периодом регистрировались примерно по 450 осциллограмм, подавляющая часть которых зарегистрирована без молний или ТСС. Отметим также, что амплитуда осцилляций техногенного свечения изменялась практически пропорционально уровню фона ночного неба, иными словами, отношение амплитуды осцилляций техногенного свечения к среднему значению фона сохранялось практически постоянным за все время наблюдений на ночной стороне Земли.

Примеры зарегистрированных осциллограмм сигналов показаны выше на рис. 2, 3 и 4.

На рис. 7 представлено распределение вероятностей наблюдения техногенных сигналов в зависимости от долготы. Видно, что наиболее часто эти сигналы регистрировались на долготах, соответствующих Австралии и Северной Америке. Также видно, что при некоторых значениях долготы на всем участке орбиты на ночной стороне техногенное свечение не наблюдалось, хотя детектор был включен и регистрировались либо флуктуации свечения фона ночного неба, либо вспышки молний или ТСС. Всего было рассмотрено около 200 рабочих витков

и 100 тысяч осциллограмм, зарегистрированных на ночной стороне Земли. Отметим, что в этом эксперименте не было обнаружено сигналов вспышек, вызванных радиоизлучением молний с преобладанием красного свечения, таким же, как в осцилляциях техногенного излучения. Возможная причина этого — низкая эффективность воздействия электрического поля разряда молнии на ионосферу на высотах выше 150 км. Примеры осциллограмм сигналов с указанием времени регистрации и географических координат, в которых наблюдались одновременно молнии и техногенное свечение, в электронном виде можно найти в [10].

4. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Основной излучающий элемент атмосферы и высота области техногенного свечения

На высотах менее 175 км наиболее распространенный элемент атмосферы — молекулярный азот, процентное содержание которого убывает с высотой. В спектре молекул азота присутствует и ИК-, и УФ-излучение, время высвечивания этих линий значительно меньше миллисекунды, что соответствует параметрам зарегистрированных сигналов. Если механизм возбуждения молекул азота, вызванного излучением радиостанций, аналогичен механизму возбуждения от НЧ-радиоизлучения молнии, то для оценки высоты свечения можно воспользоваться расчетами, приведенными в работе [8], которые представлены на рис. 5а, где показано, что если ИК-излучение ионов молекул азота превышает УФ-излучение на порядок, то источник свечения находится на высотах более 100 км.

На высотах больших 175 км наиболее распространенный элемент атмосферы — атомарный кислород, свечение красной (637 нм) и зеленой спектральных линий (537 нм) которого при воздействии высокочастотного (ВЧ) излучения наблюдалось на установке НААРР на высотах больших 250 км [3,11]. На этой установке также зарегистрировано свечение и УФ-линии (427 нм) ионов молекул азота одновременно со свечением атомов кислорода.

Время высвечивания красной и зеленой линий излучения атомарного кислорода составляет соответственно 130 и 0.7 с. Сигналы с такими постоянными времени не регистрировались в детекторе ДУФ из-за ограничения полосы пропускания со сто-

роны низких частот анализируемого сигнала на осциллограмме при его цифровой обработке. Эти наблюдения не противоречат тому, что в нашем случае в основном регистрируется свечение азота на высотах больших 175 км, поскольку время нарастания и спада зарегистрированных в эксперименте импульсов ИК-сигнала техногенного свечения, существенно меньше времени высвечивания красной линии атомов кислорода и не противоречит ИК-свечению ионов молекулярного азота. Очевидно, что в зарегистрированных сигналах присутствуют менее выраженные свечения и других элементов, входящих в состав атмосферы.

Отметим, что источником техногенного свечения не может быть источник света, расположенный на поверхности Земли, поскольку свечение наблюдалось на участке орбиты, превышающем зону прямой видимости спутника. Маловероятным кажется и то, что источником техногенного свечения является источник света, установленный на борту спутника, поскольку амплитуда осцилляций зависела от интенсивности фона ночного неба. Отметим также, что вся аппаратура спутника прошла тесты на электромагнитную совместимость, и причиной осцилляций не может быть ее взаимное влияние.

4.2. Глобальное распределение техногенного УФ- и ИК-свечения ночной атмосферы

Другой важной характеристикой является географическое распределение техногенного свечения (см. рис. 6 и 7). Техногенное свечение в основном наблюдалось на долготах Австралии и Америки в областях, охватывающих примерно 30° на полувывоте распределения по долготам и от -75° до $+55^\circ$ по широте на протяжении всего ночного участка орбиты. Общая площадь атмосферы, ограниченная этими географическими координатами, составляет примерно $3 \cdot 10^7$ км². Напомним, что осциллограммы этого свечения длительностью 128 мс регистрировались периодически каждые 4.5 с. На каждой осциллограмме отбиралась вспышка с наибольшей амплитудой на интервале времени, равном одному периоду, при этом спутник двигался на восходящей части орбиты в направлении с юга на север. Если в поле зрения детектора попадала вспышка света от молнии, то регистрировался суммарный сигнал, вызванный техногенным свечением и вспышкой молнии. Если не было ни вспышек молнии, ни техногенного свечения, то регистрировались сигналы флуктуации фона ночного неба. Вполне вероятно, что в си-

лу симметрии и вытянутости в меридиональном направлении область техногенного свечения охватывает не только южные, но и северные широты вплоть до полярных областей, которые во время эксперимента находились на освещенной Солнцем стороне орбиты спутника. Отметим, что из-за рассеяния радиоволн в волноводе, образованном ионосферой и поверхностью Земли, техногенное свечение наблюдалось над областями, совпадающими с географическими координатами в широкой полосе значений долготы наиболее мощных НЧ-радиостанций. Экспериментальное подтверждение рассеяния этих радиоволн можно найти в работе [2], в которой НЧ-излучение регистрировалось на станции Пальмира в Антарктиде от передатчиков, расположенных на разной долготе в США; при этом направление прихода излучения отличалось примерно на 20° от горизонтального направления магнитного поля в этом районе.

5. ВОЗМОЖНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ СВЕЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАДИОВОЛН

Естественно предположить, что вероятным источником обнаруженного в этой работе свечения — модуляции ночного фона атмосферы в УФ- и ИК-диапазонах — может быть электромагнитное излучение современных мощных радиостанций, которые воздействуют на ионосферу, вызывая оптические явления.

Самый мощный ВЧ-передатчик — HAARP (high-frequency active Auroral Research Program facility), излучающий 20 МВт мощности в области высоких частот (7.8 МГц), расположен на Аляске. Самый мощный НЧ-передатчик — NWC (North-West Cape transmitter), излучающий 1 МВт на частоте 19.8 кГц, расположен на западе Австралии. Очевидно, существуют и другие мощные ВЧ- и НЧ-передатчики.

Взяв за основу экспериментальные факты, полученные в этой работе, рассмотрим возможные физические процессы, приводящие к генерации свечения атмосферы.

Известно [3, 11], что при воздействии на ионосферу радиоволн ВЧ-диапазона наиболее мощной установки HAARP, сфокусированных в луч шириной около 6° при плотности излучения 0.05 МВт/км^2 , на высотах около 250 км в основном наблюдалось свечение красной (630 нм) и зеленой (537 нм) линий атомов кислорода в ночное время.

При достигнутой эффективности генерации оптического излучения, соизмеримого с фоном ночного неба на площади свечения $3 \cdot 10^7 \text{ км}^2$, необходима энергия $3 \cdot 10^7 \text{ км}^2 \times 0.05 \text{ МВт/км}^2 \approx 1.5 \cdot 10^7 \text{ МВт}$, что на несколько порядков превышает мощность этой установки. Отметим также, что генерация свечения с помощью установки HAARP противоречит глобальному распределению обнаруженного техногенного свечения — ее воздействие наблюдалось только в пределах прямой видимости.

Очевидно, что в нашем случае свечение возникает в иных физических процессах. Возможно, причиной техногенного свечения атмосферы является воздействие НЧ-передатчиков с несущей частотой излучения 10–30 кГц, что видно по совпадению траекторий орбит с географическим расположением наиболее мощных НЧ-радиостанций. Сигналы таких радиостанций распространяются изотропно на большие расстояния с малыми потерями в волноводе, образованном ионосферой и поверхностью Земли. В то же время в направлении магнитного поля НЧ-волны проникают в ионосферу по аналогии с радиоизлучением молний, вызывая ее нагрев, и выходят в космическое пространство. Известно, что наибольшая энергия молний — естественного источника мощного радиоизлучения — генерируется в области низких частот [12, 13]. НЧ-излучение молнии воздействует на ионосферу, возможно, точно так же, как и излучение НЧ-радиостанций, с той лишь разницей, что воздействие разряда молнии кратковременное. Как известно [1, 2], радиоволны молний проникают в ионосферу вдоль магнитного поля Земли, где при напряженностях электрического поля 10–20 В/м и длине свободного пробега электронов порядка сантиметра вследствие ионизации значительно увеличивают количество электронов и ионов молекул азота на высотах 70–100 км, вызывая свечение, получившее название транзиентных световых событий. Свечение возникает при напряженностях электрического поля, превышающего напряжение пробоя воздуха на этих высотах. Можно ожидать, что с увеличением высоты эффективность воздействия повышается, поскольку увеличивается длина свободного пробега электронов, а ускорение до энергий, необходимых для ионизации и возбуждения свечения молекул азота, достигается при напряженностях электрического поля меньших значений, характерных для высот 70–100 км.

Отметим также, что на осциллограммах отсутствует несущая частота радиостанций, а наблюдается только частота модуляции, т. е. происходит детектирование сигнала. Детектор ДУФ не содержит

нелинейных элементов для детектирования сигналов, поэтому можно предположить, что сигнал детектируется в ионосфере вследствие нелинейных процессов [3]. При мощности передающих станций около 1 МВт, такой как у передатчика NWC, напряженность электрического поля электромагнитной волны, распространяющейся без потерь на расстоянии 1000 км, составляет примерно 10–20 В/км и линейно уменьшается с расстоянием.

Согласно модели стандартной атмосферы, на высотах от 150 до 200 км длина свободного пробега молекул изменяется от десятков до сотен метров [14]. Эффективный пробег электронов в этом случае превышает сотни метров, и электроны под воздействием электрического поля радиостанций указанной мощности в точке наблюдения могут ускоряться до энергий, достаточных для возбуждения оптического излучения молекул атмосферы.

С увеличением высоты длина свободного пробега увеличивается, вследствие чего электроны могут ускоряться до энергий, необходимых для возбуждения свечения молекул и при меньших напряженностях электрического поля. Отметим также, что электроны при столкновениях теряют только часть своей энергии и эффективно ускоряются на траектории в несколько длин свободного пробега в направлении магнитного поля, что существенно увеличивает эффективность воздействия электрического поля радиоволн.

Тем не менее мощности современных НЧ-передатчиков недостаточно для возбуждения всей площади, на которой наблюдалось техногенное свечение атмосферы. Действительно, интенсивность излучения фона ночного неба составляет [5] около $10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ или соответствует мощности $5 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ ($0.1 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \times 5 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \approx 5 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$) техногенного излучения при глубине модуляции 10 % и средней энергии фотонов свечения 3 эВ ($5 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$). На площади наблюдения $3 \cdot 10^7 \text{ км}^2$ ($3 \cdot 10^{17} \text{ см}^2$) излучается мощность около 1.5 МВт ($3 \cdot 10^{17} \text{ см}^2 \times 5 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$), что превосходит возможности современных НЧ-передатчиков из-за низкой эффективности генерации оптического излучения с помощью радиоволн.

Вследствие этого необходимо предположить, что существуют более эффективные механизмы возбуждения техногенного свечения, чем возбуждение атмосферы электронами, ускоренными электромагнитной НЧ-волной. Возможно, что либо происходит модуляция уже существующего фона атмосферы, либо воздействие электромагнитных волн усиливается за счет внешних факторов.

Естественно, можно ожидать существование и других механизмов генерации техногенного свечения в ионосфере, которые не противоречат данным, полученным при измерениях. Проработка различных механизмов возбуждения обнаруженного свечения требует математического моделирования и выходит за рамки данной работы, основная цель которой представить результаты наблюдений.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе приводятся основные результаты изучения на спутнике «Вернов» оптических явлений в атмосфере.

Рассмотрены примеры наблюдения свечения молний и транзиентных световых событий в УФ- и ИК-диапазонах оптического спектра. Представлены осциллограммы и географическое распределение сигналов техногенного типа, вызванных излучением мощных радиостанций.

Рассмотрено возникновение свечения под воздействием как ВЧ-, так и НЧ-радиостанций. Показано, что воздействие ВЧ-передатчиков на ионосферу противоречит географическому распределению техногенного свечения. Мощности существующих НЧ-передатчиков, излучение которых соответствует географическому распределению техногенного свечения, недостаточно для создания оптических сигналов, сравнимых с фоном ночного неба при прямом воздействии электромагнитной волны на ионосферу.

На основе времен нарастания и спада зарегистрированных сигналов сделан вывод, что в основном регистрируется свечение ионов молекул азота. В этом случае, по соотношению интенсивностей ИК- и УФ-излучений показано, что техногенное свечение наблюдается в ночное время на высотах больших 100 км.

Отмечено, что в зарегистрированных сигналах отсутствует несущая частота передатчика, хотя детектор не имеет детектирующих свойств, а частота модуляции передающей станции, возможно, детектируется в ионосфере в результате нелинейных процессов [3]. Отмечено также, что УФ- и ИК-сигналы сдвинуты по времени и иногда регистрируются в противофазе, что также вызвано процессами в ионосфере, а не свойствами детектора.

Показано, что распределение по долготам техногенных свечений совпадает с расположением наиболее мощных НЧ-радиостанций в широкой полосе долгот.

Работа выполнена в рамках Федеральной космической программы Российской Федерации. Авторы благодарны А. В. Гуревичу за ценные советы и обсуждение данной работы. Авторы также выражают признательность своим коллегам, замечания которых способствовали улучшению ее изложения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Y. N. Taranenko, U. S. Inan, and T. F. Bell, *Geophys. Res. Lett.* **19**, 61 (1992).
2. U. S. Inan, *Geophys. Res. Lett.* **17**, 729 (1990).
3. А. В. Гуревич, *УФН* **177**, 1145 (2007).
4. Г. К. Гарипов, М. И. Панасюк, В. И. Тулупов и др., *ПТЭ* вып. 1, 135 (2006).
5. G. K. Garipov, B. A. Khrenov, M. I. Panasyuk et al., *Astropart. Phys.* **24**, 400 (2005).
6. G. Garipov, M. Panasyuk, S. Svertilov et al., <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2015/EGU2015-4584.pdf>.
7. G. Garipov, http://crd.yerphi.am/Conferences/tepa2015/presentation_page2.
8. G. K. Garipov, B. A. Khrenov, P. A. Klimov et al., *J. Geophys. Res.* **118**, 370 (2013).
9. http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/R1463_TPMH1349E.pdf.
10. <http://smdc.sinp.msu.ru/index.py?nav=relec>.
11. T. R. Pedersen, M. McCarrick, E. Gerken et al., *Geophys. Res. Lett.* **30**, 1169 (2003).
12. Z. Cheng, S. A. Cummer, H. T. Su, and R. R. Hsu, *J. Geophys. Res.* **112**, A06318 (2007).
13. Y. N. Taranenko, U. S. Inan, and T. F. Bell, *Geophys. Res. Lett.* **20**, 1539 (1993).
14. Гост 4401-81, Атмосфера стандартная, 158–160, ИПК изд-во стандартов, Москва (1981).