

ГЛОБАЛЬНЫЕ ТЕХНОГЕННЫЕ СВЕЧЕНИЯ ДНЕВНОЙ И НОЧНОЙ АТМОСФЕРЫ, ОБНАРУЖЕННЫЕ НА СПУТНИКЕ «ВЕРНОВ» В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ И ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНАХ ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРА

Г. К. Гарипов ^{a*}, М. И. Панасюк ^{a,b}, С. И. Свертилов ^{a,b},
В. В. Богомолов ^{a,b}, В. О. Баринава ^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 16 мая 2018 г.

На малом космическом аппарате «Вернов» (солнечно-синхронная орбита, наклонение 98° , высота 640–830 км) проводились исследования процессов генерации транзиентных и других оптических явлений в верхней атмосфере Земли под воздействием потоков электронов и электромагнитных волн высоких и низких частот, возникающих вследствие электрических электромагнитных полей [1]. Показано, что на ночной стороне в средних широтах техногенное свечение наблюдается вдоль выделенных меридианов, распределение которых соответствует долготе наиболее мощных НЧ-радиостанций [2]. Географическое распределение этого свечения резко изменяется на границе дневной и ночной сторон орбиты спутника, на дневной стороне подобные меридианы не выделяются, а их географическое распределение по долготе становится равномерным. По широте границы географического распределения областей техногенного свечения на дневной стороне становятся неустойчивыми, смещаются их северные и южные границы на всех широтах от Северного полюса до Южного полюса. В средних и низких широтах в распределениях сигналов вдоль меридианов наблюдаются зоны со случайными географическими координатами, где техногенное свечение полностью отсутствует. При изучении вспышек, вызванных разрядами в атмосфере, показано, что молнии и транзиентные световые события в ночное время суток в основном наблюдаются в экваториальных районах, которые совпадают с зонами высокой грозовой активности. В дневное время вспышки света регистрируются значительно реже, имеют короткую длительность, наиболее часто наблюдаются в полярных областях Земли, включая зимние периоды, мощность их излучения значительно превосходит мощность аналогичных по длительности коротких вспышек, которые наблюдаются ночью.

DOI: 10.1134/S0044451018100097

1. ВВЕДЕНИЕ

Оптическое излучение Земли содержит информацию о явлениях, происходящих в атмосфере и в околоземном космическом пространстве, возникающих как при воздействии электромагнитных полей молний, так и при воздействии излучений мощных радиостанций.

В работе [2] были представлены данные наблюдений техногенных сигналов оптического излучения на ночной стороне орбиты спутника «Вернов». В качестве одного из возможных источников этих сигналов рассматривалось свечение, которое возникает под воздействием электромагнитных полей современных мощных НЧ-радиостанций, воздействующих на ионосферу и ускоряющих электроны до энергий, достаточных для возбуждения оптического излучения молекул ионосферы. Было показано, что регистрируется излучение молекул азота на высотах больших 150 км, что выше нижней границы ионосферы.

* E-mail: ggkmsu@yandex.ru

Действительно, сигналы от подобных радиостанций распространяются по всем направлениям с малым затуханием на большие расстояния в области между Землей и ионосферой, но по направлению магнитных силовых линий проникают в ионосферу и могут вызывать ее нагрев более эффективно, чем излучение радиостанций, работающих на высоких частотах [3, 4].

Радиоволны мощных радиостанций воздействуют на атмосферу так же, как электромагнитное излучение разряда молний, поэтому представляется взаимодополняющим их совместное рассмотрение в одной работе, под действием радиоизлучения которых в атмосфере возникают оптические явления как природного, так и техногенного происхождения.

Действительно, максимум спектра радиоизлучения молний совпадает с частотами излучения НЧ-радиостанций и можно ожидать, что техногенное свечение возникает под действием радиостанций подобно тому, как транзиентные оптические явления возникают под действием радиоизлучения грозных разрядов. Радиоволны молний взаимодействуют с ионосферой, где при напряженностях электрического поля 10–20 В/м и длине свободного пробега электронов порядка сантиметра значительно увеличивается количество электронов и ионов молекул азота на высотах 70–100 км, что вблизи нижней границы ионосферы вызывает кратковременное свечение, получившее название транзиентных световых событий. Это свечение возникает при напряженностях электрического поля радиоволн, достаточных для пробоя воздуха на этих высотах [4, 5].

Тем не менее, несмотря на то, что частоты природного и техногенного радиоизлучения совпадают, в отличие от молний, радиоволны которых возбуждают свечение ограниченных размеров, свечение, вызванное мощными радиостанциями, наблюдалось на площадях соизмеримых с размерами Земли.

Важной особенностью радиоволн низкой частоты является и то, что это радиоизлучение в направлении магнитного поля не отражается ионосферой, а проникает в околоземное космическое пространство, распространяясь вдоль магнитных силовых линий Земли.

В ионосфере это излучение может вызывать свечение, распространяясь вдоль магнитного поля значительно выше нижней границы ионосферы более эффективно, поскольку с увеличением высоты быстро увеличивается длина свободного пробега электронов. В этом случае их ускорение до энергий, достаточных для возбуждения оптического излучения частиц ионосферы, становится возможным

на траекториях существенно большей длины при меньших напряженностях электрического поля радиоволн. Тем не менее, несмотря на то, что напряженность электрического поля радиоволн наиболее мощных НЧ-радиостанций достаточна для ускорения электронов до энергий, необходимых для возбуждения оптического излучения, мощности радиоизлучения этих станций недостаточно для нагрева ионосферы и возбуждения свечения на всей площади его наблюдения, соизмеримой с поверхностью Земли [2]. Из этого следует, что такое свечение возникает не только из-за разогрева ионосферы электромагнитной волной радиостанций, но и вследствие других физических процессов, под действием которых усиливаются оптические эффекты от воздействия радиоволн низкой частоты.

В околоземном космическом пространстве радиоизлучение рассеивает заряженные частицы в радиационных поясах Земли, что вызывает их высыпание в ионосферу, тем самым замыкается электрическая цепь между ионосферой и радиационными поясами при разрядах молний, электроны которых также могут вызывать свечение атмосферы.

По этой причине данные наблюдения оптических явлений могут быть полезными при разработке моделей глобальной электрической цепи, связывающей воедино электромагнитные процессы, возникающие при разрядах молний в нижней атмосфере с явлениями в ионосфере, околоземном космическом пространстве и радиационных поясах Земли.

Данные наблюдений транзиентных оптических явлений и техногенного свечения могут также представлять интерес и при разработке моделей естественной, не соприкасающейся со стенками лабораторных приборов плазмы, находящейся в магнитном поле Земли, оптическое излучение которой возникает под воздействием радиоволн с известными параметрами.

Важной особенностью настоящей работы также является и то, что свойства техногенного оптического излучения и свечений, вызванных грозными разрядами, изучаются не только на ночной, но и на дневной стороне орбиты спутника, где свойства ионосферы и околоземного космического пространства существенно изменяются из-за воздействия солнечного излучения.

В настоящей работе показано, что амплитуды осцилляций зарегистрированных оптических сигналов техногенного свечения пропорциональны освещенности атмосферы, а их частотный спектр совпадает с частотой модуляции несущей частоты радиоволн наиболее мощных низкочастотных пере-

датчиков. При этом географические распределения этих сигналов на дневной и ночной сторонах орбиты спутника существенно различаются. Резкие изменения этих распределений происходят на границе между тенью и освещенным Солнцем участками орбиты. На ночной стороне орбиты спутника географические распределения техногенного свечения вытянуты вдоль меридианов, долгота которых соответствует географической долготе наиболее мощных низкочастотных радиостанций, работающих в килогерцевом диапазоне длин волн [2]. На дневной стороне географические распределения техногенных сигналов также вытягиваются вдоль меридианов, которые по долготе имеют равномерное распределение, причем наиболее часто такие сигналы наблюдаются в высоких широтах и относительно реже — в районе экватора.

Географические распределения молний и транзитных световых событий на ночной и дневной сторонах также различаются и имеют различные амплитудно-временные структуры. На ночной стороне орбиты спутника молнии и транзитные световые события в основном регистрируются в экваториальных зонах над континентами в районах с высокой грозовой активностью, их сигналы состоят из одного или нескольких пиков, возникающих от вспышек оптического излучения, связанных между собой. Вспышки молний и транзитных световых событий, наблюдавшиеся на дневной стороне орбиты, имеют длительность менее нескольких миллисекунд и наиболее часто регистрируются за полярным кругом в северном и южном полушариях Земли.

Целью настоящей работы является более подробное представление данных наблюдений оптических явлений в атмосфере как на ночной, так и на дневной стороне Земли, выполненных на спутнике «Вернов», а также описание особенностей оптического детектора при регистрации сигналов во всем диапазоне изменений освещенности атмосферы. Данные наблюдения ночной атмосферы и особенности работы детектора ночью были рассмотрены в работе [2].

2. ДЕТЕКТОР УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО И ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Структурная схема детектора 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–

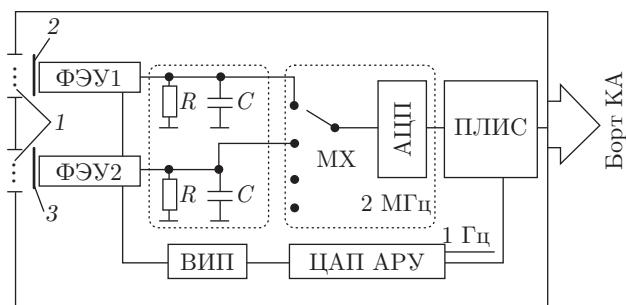


Рис. 1. Структура детектора ДУФИК: 1 — многоканальный коллиматор; 2 — УФ-светофильтр УФС-2; 3 — ИК-светофильтр КС-11; R, C — цепочка интегрирования сигнала предварительного усилителя; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ПЛИС — микропрограммируемая логика; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь АРУ; ФЭУ — фотоэлектронный умножитель типа R1463 фирмы Hamamatsu с мультищелочным фотокатодом; ВИП — высоковольтный источник питания ФЭУ; КА — космический аппарат

380 нм, а другой закрыт 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 надир. Сигналы с анода ФЭУ с помощью аналогового мультиплексора подаются на вход 12-битового АЦП и преобразуются в цифровой код с частотой преобразования 2 МГц. Логика управления и запись одного события в память спутника осуществляется в ПЛИС. В каждом временном интервале длительностью 4.5 с, начиная с импульсов, вызванных флуктуациями свечения атмосферы, отбирается наиболее яркая вспышка и записывается в память спутника для последующей передачи на Землю в виде осциллограммы, содержащей 256 точек с шагом 0.5 мс. Время интегрирования сигнала в каждой точке равно шагу на осциллограмме. При измерениях сигналы регистрируются во всем диапазоне освещенностей атмосферы благодаря применению автоматической регулировки усиления (АРУ), которая фиксирует сигнал анодного тока ФЭУ в заданном канале АЦП так, что ток ФЭУ не превосходит величин, рекомендованных производителем. Постоянная времени АРУ превышает длительность вспышки, поэтому сигнал не искажается во время записи осциллограммы. Более подробно детектор описан в работе [6].

Оперативная калибровка детектора выполнялась по фону свечения ночного неба в областях с минимальным свечением ночной атмосферы в безлунную ночь, интенсивность свечения которой была измерена на спутнике МГУ «Университетский–Татьяна» [7].

Отметим, что измерения в УФ- и ИК-областях спектра с помощью этого детектора позволяют по спектру различать излучение молекул азота и кислорода, основных элементов, образующих атмосферу, поскольку в спектре кислорода, в отличие от спектра молекул азота, практически отсутствует ультрафиолетовое излучение. Также такие измерения позволяют по соотношению интенсивностей определять высоту свечения транзитных событий в атмосфере [8]. Миллисекундное временное разрешение прибора позволяет различать излучение этих молекул и по длительности высвечивания при импульсном свечении, поскольку время высвечивания красной линии кислорода составляет 130 с, а молекулы азота — 8 мкс [9].

3. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ДЕТЕКТОРА НА НОЧНОЙ И ДНЕВНОЙ СТОРОНАХ ОРБИТЫ СПУТНИКА

На осциллограммах система АРУ удерживает базовую линию сигнала УФ-излучения на уровне, соответствующем 40 ± 2 отчетам кода АЦП. Код системы АРУ определяет коэффициент усиления ФЭУ, значение которого зависит от фона оптического излучения атмосферы и выбирается таким, чтобы базовая линия осциллограмм, с одной стороны, фиксировалась на заданном уровне анодного тока ФЭУ, а, с другой стороны, была привязана к уровню фона свечения атмосферы. Коэффициенты усиления обоих ФЭУ во всем диапазоне свечения атмосферы устанавливаются равными друг другу независимо от уровня сигнала. Поэтому при равных значениях сигналов с ФЭУ на осциллограммах их базовые линии совпадают. В общем случае уровень базовой линии ИК-излучения изменяется относительно фиксированной базовой линии УФ-излучения в зависимости от спектрального состава фонового излучения атмосферы. Также отметим, что амплитуды сигналов вспышек и уровень базовой линии на осциллограммах измеряются в кодах АЦП, пропорциональных интенсивности фона атмосферы. Для получения абсолютного числа фотонов в сигнале для каждой осциллограммы регистрируется код АРУ, который определяет коэффициенты усиления ФЭУ в момент измерения и значений кодов АЦП, которые определяют величину сигнала в каждой точке относительно базовой линии. Соотношение кодов АЦП на осциллограмме и кода АРУ с числом фотонов, попавших в ФЭУ, определяется при калибровках детектора от эталонного источника света с изменяе-

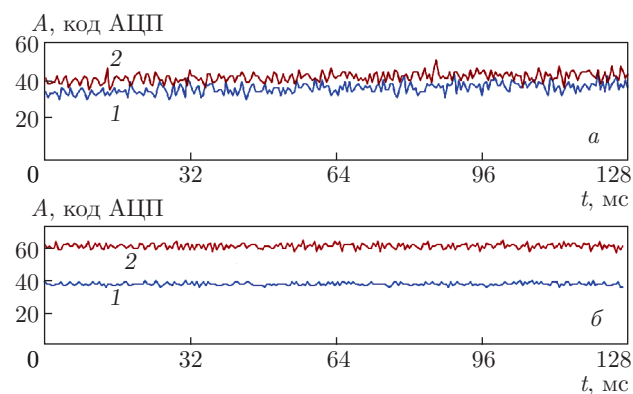


Рис. 2. а) Пример типичной осциллограммы сигнала флуктуаций фона ночного неба: 1 — УФ-излучение, 2 — ИК-излучение. Фон атмосферы в УФ-диапазоне $3 \cdot 10^7$ фотон·см⁻²·с⁻¹·ср⁻¹. Среднее число фотонов, попавших в ФЭУ детектора за время интегрирования в каждой точке базовой линии составляет $1.2 \cdot 10^2$ фотонов УФ-излучения, $1.3 \cdot 10^2$ фотонов ИК-излучения. Код АРУ=169. б) Пример типичной осциллограммы сигнала шумов электроники детектора: 1 — УФ-излучение, 2 — ИК-излучение. Фон атмосферы в УФ-диапазоне $2.8 \cdot 10^{12}$ фотон·см⁻²·с⁻¹·ср⁻¹. Среднее число фотонов, попавших в ФЭУ детектора за время интегрирования в каждой точке базовой линии составляет $1.1 \cdot 10^7$ фотонов УФ-излучения, $1.6 \cdot 10^7$ фотонов ИК-излучения. Код АРУ=45

мой интенсивностью излучения. Число фотонов во вспышке, произошедшей в атмосфере, определяется по числу фотонов, попавших в ФЭУ детектора, в предположении, что источник излучения точечный и расстояние до него равно высоте орбиты спутника.

На ночной стороне орбиты число фотонов фона атмосферы, попадающих в ФЭУ детектора за время интегрирования в каждой точке осциллограммы, составляет несколько сотен штук. В этом случае статистические флуктуации фотоэлектронов на выходе ФЭУ соизмеримы со средним числом фотоэлектронов, сигнал которых относительно базовой линии можно наблюдать на осциллограммах, поскольку усиление ФЭУ под действием АРУ на ночной стороне достигает величин, достаточных для регистрации одиночных фотоэлектронов.

На рис. 2а представлен типичный пример осциллограммы сигнала флуктуаций фона ночного неба.

Из приведенного примера видно, что на ночной стороне орбиты спутника на осциллограмме амплитуды шумов, вызванных флуктуациями сигналов УФ- и ИК-излучений, относительно базовой линии осциллограммы не превышают ± 6 делений кода АЦП, стандартное отклонение которых составляет менее 2.5 делений. Величина сигнала ИК-излучения

в этом случае превышает сигнал УФ-излучения примерно на 10 %.

На дневной стороне орбиты число фотонов фона атмосферы, попадающих в детектор за время интегрирования, составляет несколько сотен тысяч штук, флуктуации такого сигнала существенно меньше среднего значения и одного отчета кода АЦП. В этом случае основным источником флуктуаций базовой линии осциллограммы являются шумы электроники, которые также надо учитывать, поскольку при наблюдении техногенного свечения необходимо измерять очень слабые сигналы, имеющие амплитуду на несколько порядков меньшую, чем сигналы молний и транзиентных излучений, на регистрацию которых был рассчитан детектор.

На рис. 2б приведен пример осциллограммы сигнала шумов электроники детектора, видимых на дневной стороне орбиты спутника. Видно, что на этой осциллограмме сигнал ИК-излучения превышает сигнал УФ-излучения примерно на 50 %, флуктуации базовой линии по амплитуде не превышают ± 2 делений кода АЦП, стандартное отклонение которых составляет менее 1.5 делений кода АЦП.

Таким образом, средний статистический разброс значений сигнала базовой линии на осциллограммах, вызванных флуктуациями фона атмосферы и шумами электроники, не превышает 2.5 отчетов кода АЦП.

4. СИГНАЛЫ МОЛНИЙ И ТРАНЗИЕНТНЫХ СВЕТОВЫХ СОБЫТИЙ, НАБЛЮДАВШИЕСЯ НА НОЧНОЙ И ДНЕВНОЙ СТОРОНАХ ОРБИТЫ СПУТНИКА

На рис. 3а представлен пример типичной осциллограммы молнии, зарегистрированной на ночной стороне орбиты спутника с разрешением 0.5 мс. Видно, что сигнал состоит из нескольких пиков длительностью несколько миллисекунд, вызванных совпадающими по времени вспышками УФ- и ИК-излучений. В случае если длительность отдельной вспышки превышает временной интервал между соседними вспышками, то пики на осциллограмме сливаются и образуют суммарный длительный импульс более сложной формы. Исходя из кодов АЦП, зарегистрированных с помощью осциллограммы, и кода АРУ, определяется число фотонов УФ- и ИК-излучений, попавших в детектор, и число фотонов, возникших в источнике излучения (по методике, изложенной в работе [6]). При этом также измеряется и число фотонов фона атмосферы, поскольку, как бы-

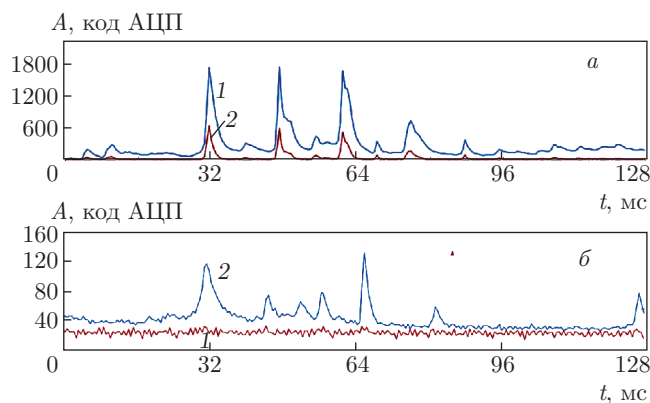


Рис. 3. а) Осциллограмма вспышки молнии со сложной структурой импульса, зарегистрированной 26.11.2014 в 12:05:17 в районе экватора с географическими координатами -7° , $+136^\circ$ (Ш, Д). Фон атмосферы в УФ-диапазоне $1.1 \cdot 10^8$ фотон·см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ ·ср $^{-1}$. Среднее число фотонов, зарегистрированных в каждой точке базовой линии за время интегрирования сигнала, составляет $3.7 \cdot 10^2$ фотонов УФ-излучения. 1 — УФ-излучение, 2 — ИК-излучение. Код АРУ = 156. б) Осциллограмма транзиентного события со сложной структурой импульса, зарегистрированного 26.11.2014 в 02:20:16 в средних широтах над территорией с географическими координатами $+29^\circ$, $+84^\circ$ (Ш, Д). Фон атмосферы $1.9 \cdot 10^8$ фотон·см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ ·ср $^{-1}$. Среднее число фотонов, попавших в ФЭУ детектора за время интегрирования сигнала в каждой точке базовой линии осциллограммы, составляет $7 \cdot 10^2$ фотонов УФ-излучения. 1 — сигнал УФ-излучения, 2 — сигнал ИК-излучения. Код АРУ = 145

ло отмечено выше, уровень базовой линии сигнала на осциллограмме соответствует уровню фона атмосферы, при этом амплитуда импульсов сигналов на осциллограммах измеряется в кодах АЦП, которые пропорциональны интенсивности фонового излучения атмосферы.

На рис. 3б приведен пример осциллограммы сигнала транзиентного светового события, состоящего из серии пиков УФ-излучения, временная структура которого похожа на временную структуру приведенного выше сигнала от молнии. Но в случае регистрации транзиентного оптического события этого типа во вспышке практически полностью отсутствует сигнал ИК-излучения, который, как видно из осциллограммы, не превышает уровень шумов, вызванных фоном ночного неба.

В детекторе усиление ФЭУ изменяется обратно пропорционально потоку света, попадающего в апертуру детектора, поэтому на дневной стороне орбиты спутника чувствительность детектора снижается на несколько порядков. В этом случае возможна регистрация тех вспышек, интенсивность излу-

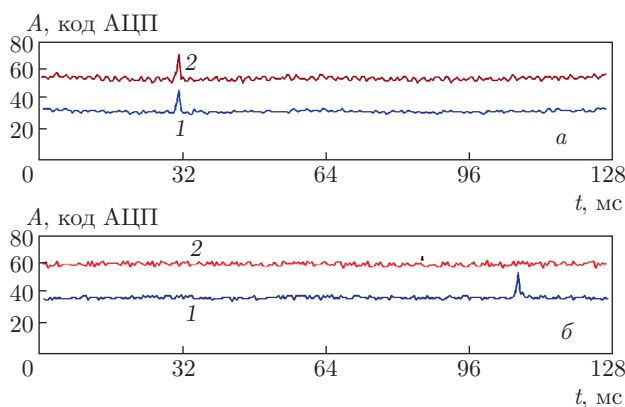


Рис. 4. а) Пример осциллограммы вспышки света, зарегистрированной на дневной стороне орбиты 30.11.2014 в 07:28:51 в северных широтах над северной Чукоткой с географическими координатами $+75^\circ$, $+170^\circ$ (Ш, Д) в зимнее время. Фон атмосферы $2.2 \cdot 10^{12}$ фотон·см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ ·ср $^{-1}$. Среднее число фотонов, попавших в ФЭУ детектора за время интегрирования сигнала в каждой точке базовой линии осциллограммы, составляет $8 \cdot 10^6$ фотонов УФ-излучения. 1 — сигнал УФ-излучения, 2 — сигнал ИК-излучения. Код АРУ = 46. б) Пример осциллограммы вспышки света, зарегистрированной 23.11.2014 в 19:26:45 на дневной стороне орбиты в средних широтах над южной Африкой с географическими координатами -31° , $+29^\circ$ (Ш, Д) в летнее время. Фон атмосферы $1.8 \cdot 10^{11}$ фотон·см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ ·ср $^{-1}$. Среднее значение числа фотонов, попавших в ФЭУ детектора за время интегрирования сигнала в каждой точке осциллограммы, составляет $6 \cdot 10^5$ фотонов УФ-излучения и $9 \cdot 10^5$ фотонов ИК-излучения. Код АРУ = 56

чения которых на несколько порядков превышает аналогичные по временной структуре вспышки, наблюдаемые на ночной стороне Земли.

Также отметим, что спектральная чувствительность детектора снижается в диапазоне ИК-излучения более, чем в 5 раз, относительно чувствительности к УФ-излучению, что необходимо учитывать при сравнении абсолютных значений сигналов, зарегистрированных на осциллограммах.

Как показали наблюдения с помощью этого детектора, на дневной стороне орбиты регистрируются только однопиковые вспышки УФ- и ИК-излучений возникающие при разрядах молнии, поток света от которых превышает фон дневной атмосферы.

На рис. 4а показан пример осциллограммы вспышки, соотношение УФ- и ИК-излучений которой отвечает разряду молнии. Интересно отметить, что это событие было зарегистрировано в зимнее время за полярным кругом.

Как правило, на дневной стороне такие вспышки, состоящие из одного пика длительностью менее нескольких миллисекунд, регистрируются в высоких широтах вне зависимости от времени года. Мощность оптического излучения вспышки, приведенной в этом примере, по нашим оценкам составляет около 30 МДж. Подобные однопиковые сигналы наблюдались также при грозах ночью, но их мощность была существенно меньше и не превышала 0.3 МДж [8]. В ночное время наибольшую мощность имели длительные вспышки со сложной структурой сигнала, подобные вспышке, приведенной на рис. 4а, энергия излучения самых мощных из них достигала нескольких сотен мегаджоулей. На дневной стороне подобные вспышки не регистрировались, поскольку плотность энергии в таких вспышках на временном интервале, равном длительности однопиковых событий, составляла менее 1 МДж, что существенно ниже порога обнаружения сигнала на дневной стороне, описанным выше детектором.

На рис. 4б приведен пример осциллограммы сигнала транзитного светового события длительностью менее миллисекунды. Подобные сигналы регистрировались и на ночной стороне орбиты спутника в областях с высокой грозовой активностью в средних и южных широтах, но их мощность так же, как и вспышек типа молний, описанных выше, была на несколько порядков меньше.

5. ТЕХНОГЕННЫЕ СИГНАЛЫ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ, НАБЛЮДАВШИЕСЯ НА НОЧНОЙ И ДНЕВНОЙ СТОРОНАХ ОРБИТЫ СПУТНИКА

На рис. 5а приведен пример осциллограммы сигнала техногенного свечения, зарегистрированного на ночной стороне орбиты спутника. На рисунке видно, что осциллограммы УФ- и ИК-излучений регистрируются в противофазе и сдвинуты по времени примерно на 3 мс. Амплитуды гармоник спектра Фурье осцилляций сигналов УФ- и ИК-излучений совпадают. На рис. 5б приведен пример осциллограммы техногенного свечения, зарегистрированной на дневной стороне орбиты спутника.

В этом примере осцилляции сигналов УФ- и ИК-излучений на дневной стороне, в отличие от осциллограммы сигнала техногенного свечения на ночной стороне, регистрируются практически синфазно, при этом временной сдвиг между осцилляциями составляет около 7 мс.

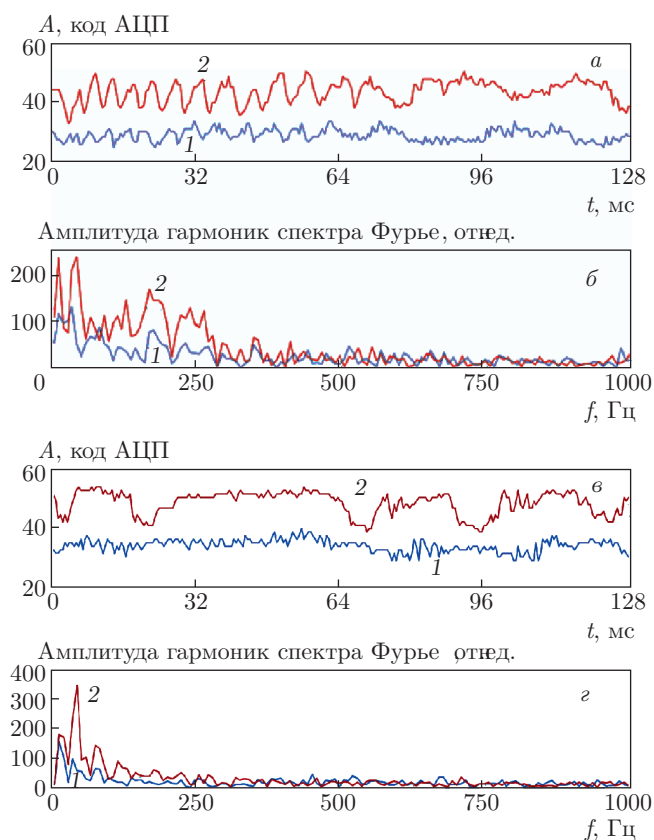


Рис. 5. *а,б*) Пример осциллограммы (*а*) и спектра Фурье (*б*) техногенного сигнала, зарегистрированного на ночной стороне орбиты спутника 20.11.2014 в 02:35:03 над северной Канадой над районом с географическими координатами $+69^\circ$, -106° (Ш, Д). Фон атмосферы $8.2 \cdot 10^8$ фотон·см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ ·ср $^{-1}$. Среднее число фотонов, попавших в ФЭУ детектора за время интегрирования в каждой точке базовой линии составляет $3 \cdot 10^3$ фотонов УФ-излучения, $4.5 \cdot 10^3$ фотонов ИК-излучения. 1 — сигнал УФ-излучения, 2 — сигнал ИК-излучения. Код АРУ = 122.
в,г) Пример осциллограммы техногенного сигнала (*в*) и спектра Фурье (*г*) зарегистрированного 03.10.2014 в 22:50:25 на дневной стороне орбиты спутника над Гренландией с географическими координатами $+65^\circ$, -45° (Ш, Д). Фон атмосферы $3.5 \cdot 10^{12}$ фотон·см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ ·ср $^{-1}$. Среднее число фотонов, попавших в ФЭУ детектора за время интегрирования в каждой точке базовой линии, составляет $1.2 \cdot 10^7$ фотонов УФ-излучения, $1.7 \cdot 10^7$ фотонов ИК-излучения. 1 — сигнал УФ-излучения, 2 — сигнал ИК-излучения. Код АРУ = 44

Основные гармоники сигналов техногенного свечения в спектре Фурье, зарегистрированных на дневной и ночной сторонах орбиты спутника, находятся в полосе частот 200 ± 150 Гц, которые совпадают с частотами модуляции радиоволн наиболее мощных низкочастотных радиостанций. Отметим, что в приведенных примерах регистрирует-

ся частота модуляции НЧ-радиостанций, а несущая частота радиостанций отфильтровывается, возможно, на этапе возбуждения техногенного свечения радиоизлучением в ионосфере из-за ее нелинейных свойств [9]. Также отметим, что амплитудно-временная структура сигналов техногенного свечения существенно отличается от структуры шумовых сигналов, приведенных на рис. 2, что указывает на то, что зарегистрированные сигналы, несмотря на их величину, не могут быть вызваны шумами электроники спутника.

6. ГЛОБАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ СИГНАЛОВ, НАБЛЮДАВШИЕСЯ НА ДНЕВНОЙ И НОЧНОЙ СТОРОНАХ ОРБИТЫ СПУТНИКА

В соответствии с рассмотренными в работе [2] предположениями о том, что техногенное оптическое излучение возникает под действием НЧ-радиоволн, можно ожидать изменения географических распределений этого свечения в полярных зонах. Объясняется это тем, что в районе полюсов заканчиваются силовые линии околоземного магнитного поля, вдоль которых распространяются радиоволны низкой частоты, а на границе ночной и дневной сторон орбиты спутника под воздействием солнечного излучения изменяется число заряженных частиц в околоземной плазме, что также влияет на распространение радиоволн.

Действительно, как уже было отмечено, радиоволны низкочастотных радиостанций отражаются от ионосферы и поверхности Земли и распространяются практически без потерь на большие расстояния по всем направлениям. В направлении магнитного поля низкочастотное излучение проникает в ионосферу и выходит в околоземное космическое пространство, двигаясь вдоль магнитных силовых линий Земли в плоскости магнитного меридиана, совпадающего с долготой источника радиоизлучения, при этом траектория этих радиоволн определяется направлением магнитного поля и состоянием околоземной плазмы [10].

Наблюдения оптических явлений в районе полюсов осложняются тем, что над этими районами спутник практически постоянно находится на освещенной Солнцем стороне орбиты. В этом случае необходимо регистрировать сигналы оптического излучения, которые на несколько порядков превышают сигналы на ночной стороне, что представляется маловероятным, поскольку, как было показано в ра-

боте [2], даже на ночной стороне при существенно меньшей плотности фонового излучения атмосферы мощности НЧ-радиостанций недостаточно для возбуждения подобных сигналов.

Тем не менее, как видно на рис. 5, техногенное свечение регистрировалось и на ночной, и на дневной стороне орбиты спутника, причем амплитуда сигналов была пропорциональна освещенности атмосферы. С одной стороны, это указывает на то, что существуют техногенные оптические явления, которые можно регистрировать во всем диапазоне освещенностей атмосферы, мощность которых на дневной стороне достигает максимальной величины. С другой стороны, подтверждается предположение о том, что либо техногенное свечение усиливается за счет дополнительного источника энергии, либо под воздействием радиоволн происходит модуляция существующего естественного фона атмосферы, поскольку для соответствующего нагрева ионосферы и возбуждения оптического излучения электромагнитной волной недостаточно мощности НЧ-радиостанций [2].

То, что сигналы техногенного излучения можно регистрировать и на ночной, и на дневной стороне орбиты также подтверждается примером, приведенным на рис. 6, где показано глобальное распределение техногенного свечения по географическим координатам, наблюдавшегося за один оборот Земли вокруг своей оси 05.09.2014 на ночной и дневной сторонах орбиты спутника. В этот день спутник находился в тени на восходящих траекториях орбиты, двигаясь на север в полосе широт от -69° до $+36^\circ$, вне этой полосы широт на восходящих траекториях и на широтах нисходящих траекторий спутник находился на дневной стороне орбиты. Как видно из этого примера, сигналы техногенного свечения были зарегистрированы и на ночной, и на дневной стороне орбиты спутника. На ночной стороне орбиты географические распределения этих сигналов вытянуты вдоль меридианов, пересекающих географические координаты Америки и Австралии, где располагаются наиболее мощные низкочастотные радиостанции [2]. Также совпадает структура сигнала и полоса частот модуляции радиоволн этих радиостанций со спектром частот, полученным при преобразованиях Фурье сигналов УФ- и ИК-излучений, пример которых показан на рис. 5. На дневной стороне орбиты спутника сигналы техногенного свечения в этот день наблюдались только в районах полюсов. В этих районах, как показано на полярных картах на рис. 6б, в распределении траекторий спутника в зависимости от азимута, вдоль которых на-

блюдалось техногенное свечение, отсутствуют выделенные направления, связанные с координатами НЧ-радиостанций. Из рис. 6 также видно, что резкое изменение географического распределения техногенного свечения происходит на границе ночной стороны орбиты спутника, причем на ночной стороне наблюдается четкая зависимость от местоположения НЧ-радиостанций. При этом на дневной стороне орбиты такая зависимость полностью отсутствует.

На рис. 7 приведен пример регистрации оптического излучения атмосферы 03.08.2014, из которого видно, что техногенное свечение на ночной стороне Земли полностью отсутствует. В этот день спутник находился в тени на восходящих траекториях орбиты, двигаясь на север в полосе широт от -80° до $+25^\circ$. На дневной стороне орбиты спутника техногенное свечение зарегистрировано только в северном полушарии. Интересной особенностью географического распределения, представленного на рис. 7, является то, что на дневной стороне техногенное свечение в средних и низких широтах наблюдалось только на одном витке спутника. Это четко указывает на то, что географическое распределение техногенного свечения на дневной стороне вытягивается вдоль меридиана так же, как и на ночной стороне. Отметим, что в этот день в районе Южного полюса техногенное свечение наблюдалось в локальных зонах, пространственные размеры которых не превышали десятков километров.

Другой пример географического распределения техногенного свечения атмосферы 10.10.2014 представлен на рис. 8. Оно существенно отличается от приведенного на рис. 7 тем, что на дневной стороне свечение наблюдается не только в полярных зонах, но и на других широтах, при этом излучение распределено равномерно по географическим долготам на всех рабочих орбитах спутника. Наиболее отчетливо это видно в средних широтах, где техногенное свечение регистрируется практически на всех дневных нисходящих траекториях спутника, которые имеют практически равномерное распределение по долготам. В меридиональном направлении в средних и низких широтах на дневной стороне в географическом распределении существует один или несколько разрывов, имеющих пространственные масштабы несколько тысяч километров, которые соответствуют зонам со случайными координатами, где отсутствует техногенное свечение. На ночной стороне, когда спутник находился в тени на восходящих траекториях орбиты, двигаясь на север в полосе широт от -58° до $+55^\circ$, свечение наблюдалось на двух

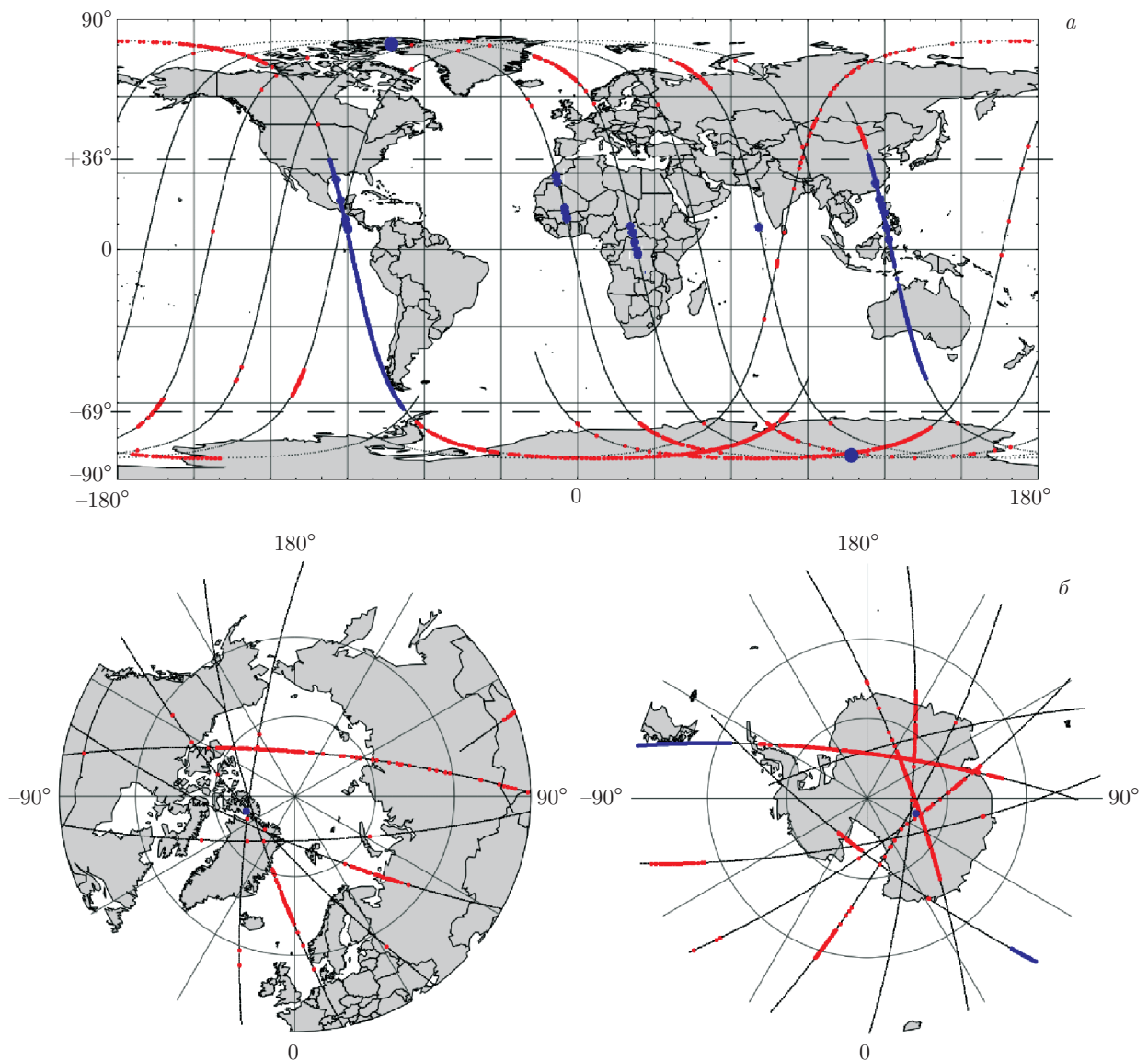


Рис. 6. Карта оптических явлений, зарегистрированных в атмосфере Земли вдоль траектории спутника 05.09.2014. *а* — глобальное распределение техногенного свечения, молний и шумовых сигналов. *б* — карты азимутального распределения траекторий спутника при наблюдении техногенного свечения в районах Северного и Южного полюсов Земли. Тонкие линии — координаты зарегистрированных шумовых сигналов. Жирные линии — сигналы техногенного свечения на дневных и ночных траекториях орбиты спутника. Жирные точки на ночной стороне орбиты — координаты наиболее мощных зарегистрированных молний. Штриховые горизонтальные линии: границы тени восходящих траекторий спутника — спутник находится на ночной стороне орбиты, вне этих границ и нисходящие траектории — спутник находится на дневной стороне орбиты

траекториях спутника вдоль меридианов, географическая долгота которых соответствовала излучению НЧ-передатчика, находящегося в Австралии. В этом случае по данным наблюдений на ночной стороне идентифицируется источник радиоизлучения, при воздействии которого на дневной стороне возника-

ет техногенное свечение, распределенное равномерно по всем долготам в северном полушарии и в южном полушарии.

Еще один интересный пример глобального географического распределения техногенного свечения, зарегистрированного 30.10.2014, показан на

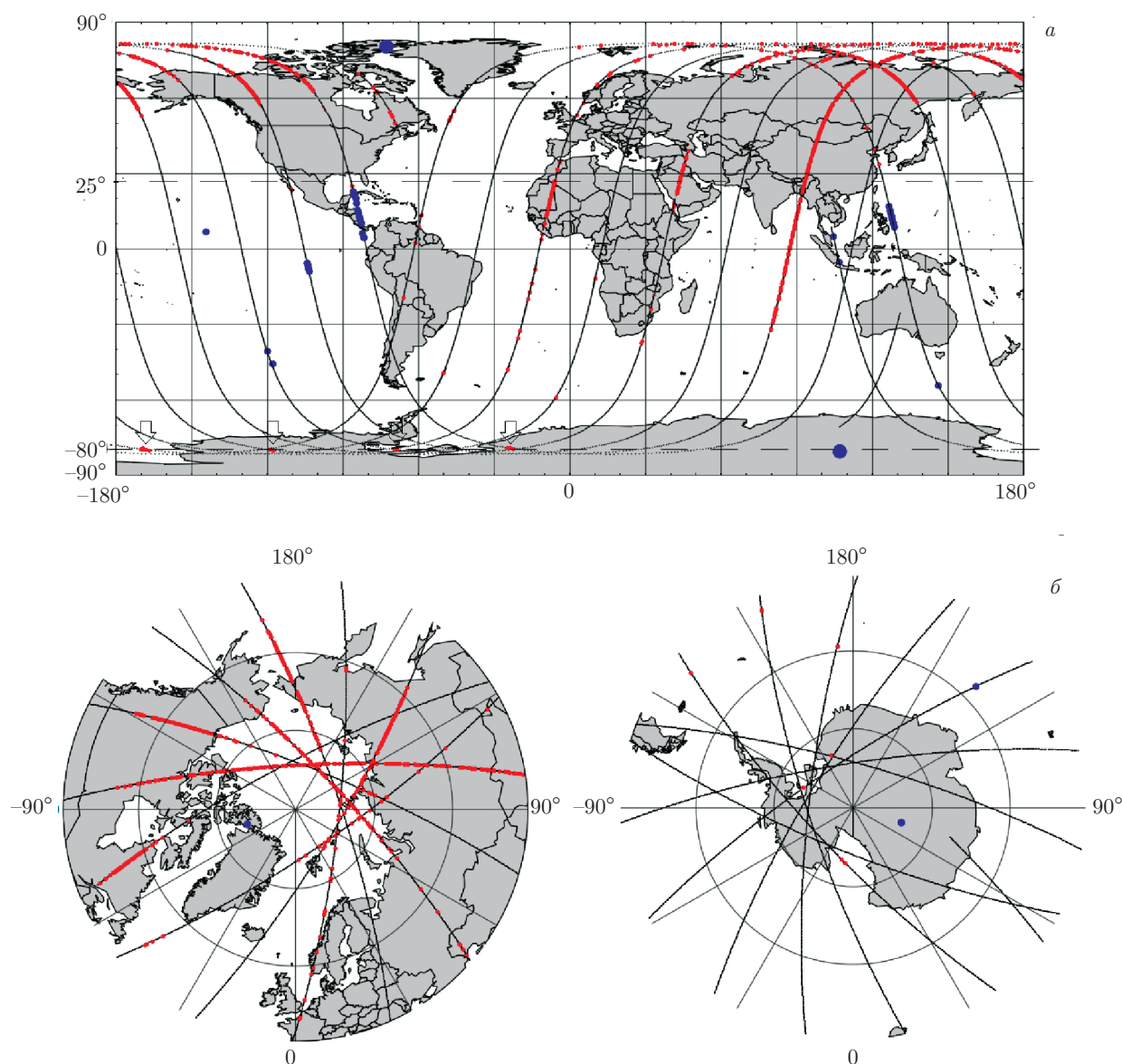


Рис. 7. Карта оптических явлений, зарегистрированных в атмосфере Земли вдоль траектории спутника 03.08.2014. *а* — глобальное распределение техногенного свечения, молний и шумовых сигналов. *б* — карты азимутального распределения траекторий спутника, при наблюдении техногенного свечения в районах Северного и Южного полюсов Земли. Тонкие линии — координаты зарегистрированных шумовых сигналов. Жирные линии — сигналы техногенного свечения на дневных и ночных траекториях орбиты спутника. Жирные точки на ночной стороне орбиты — координаты наиболее мощных зарегистрированных молний. Штриховые горизонтальные линии границы тени восходящих траекторий спутника — спутник находится на ночной стороне орбиты, вне этих границ и нисходящие траектории — спутник находится на дневной стороне орбиты. Стрелки указывают координаты «точечных» зон техногенного свечения

рис. 9. В этот день спутник находился на ночной стороне на восходящих траекториях орбиты в полосе широт от -42° до $+60^\circ$. Вне этих широт на восходящих траекториях и на всех широтах нисходящих траекторий спутник находился на дневной стороне орбиты.

На дневной стороне свечение наблюдается только в южном полушарии. В географическом распределении свечения в меридиональном направлении также наблюдаются разрывы со случайными географическими координатами, где свечение полностью отсутствует.

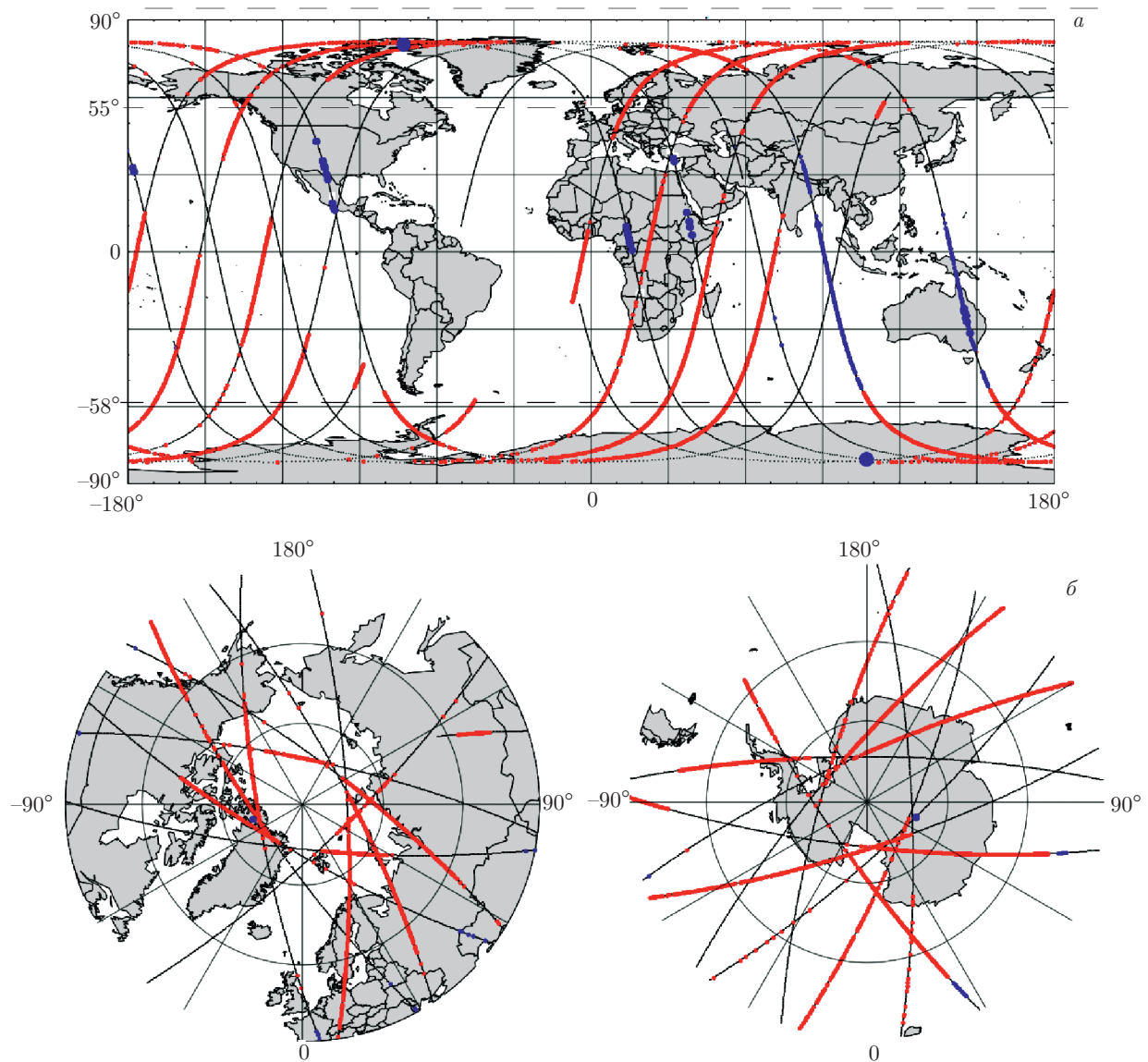


Рис. 8. Карта оптических явлений, зарегистрированных в атмосфере Земли вдоль траектории спутника 10.10.2014. *а* — глобальное распределение техногенного свечения, молний и шумовых сигналов. *б* — карты азимутального распределения траекторий спутника при наблюдении техногенного свечения в районах Северного и Южного полюсов Земли. Тонкие линии — координаты зарегистрированных шумовых сигналов. Жирные линии — сигналы техногенного свечения на дневных и ночных траекториях орбиты спутника. Жирные точки на ночной стороне орбиты — координаты наиболее мощных зарегистрированных молний. Штриховые горизонтальные линии: границы тени восходящих траекторий спутника — спутник находится на ночной стороне орбиты, вне этих границ и нисходящие траектории — спутник находится на дневной стороне орбиты

На ночной стороне в этот день сигналы техногенного свечения наблюдались в северном и южном полушариях вдоль меридиана, долгота которого проходит вблизи радиостанции, находящейся также в Австралии. При этом под воздействием радиоизлучения этой станции техногенное свечение на дневной стороне возникает только в южном полушарии.

Еще раз отметим, что на географических картах показаны только те траектории спутника, на которых была включена научная аппаратура. Траектории спутника, на которых проводились профилактические работы, не показаны.

Из приведенных рисунков видно, что свечение наблюдается и на ночной, и на дневной стороне ор-

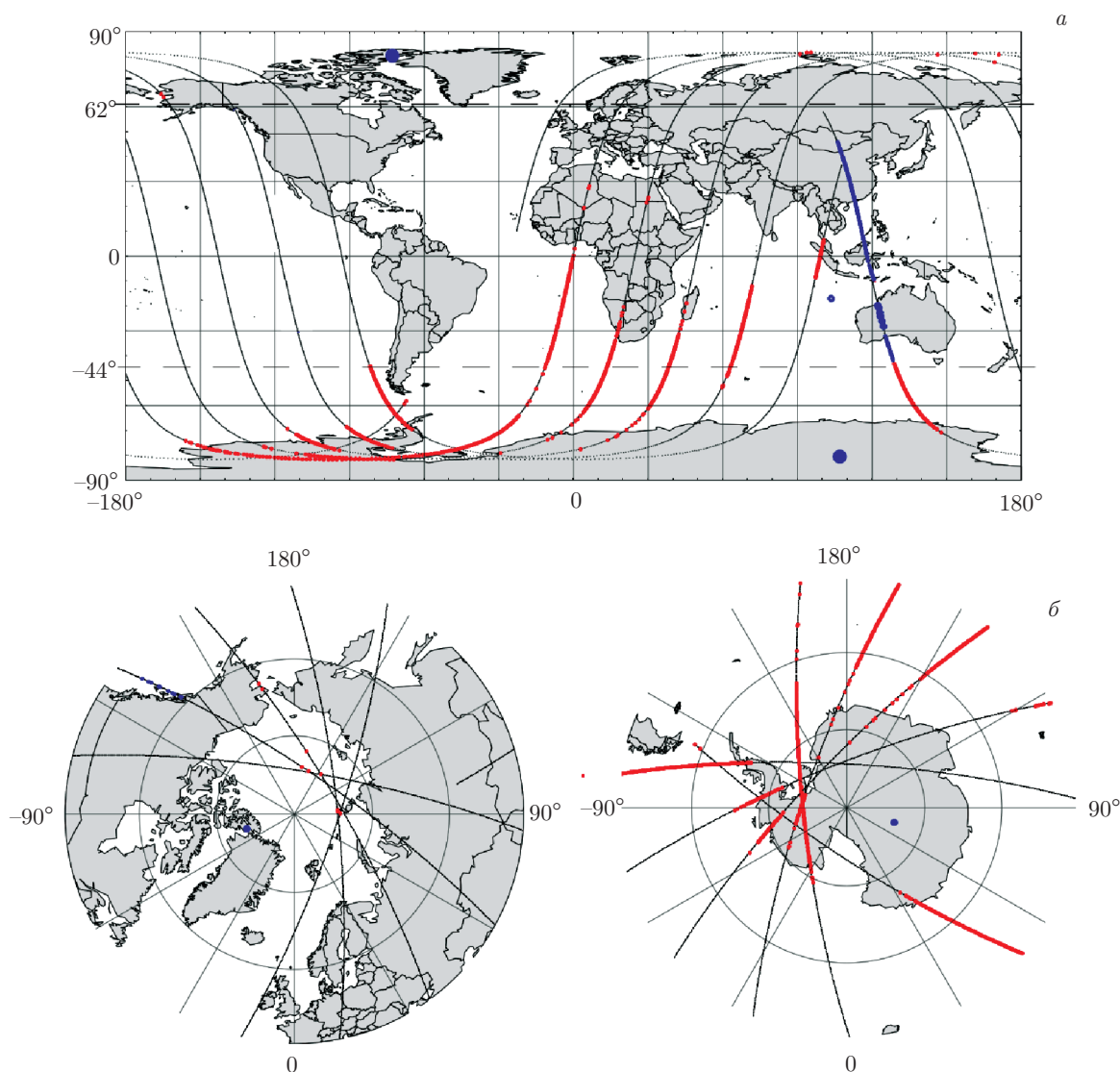


Рис. 9. Карта оптических явлений, зарегистрированных в атмосфере Земли вдоль траектории спутника 30.10.2014. *а* — глобальное распределение техногенного свечения, молний и шумовых сигналов. *б* — карты азимутального распределения траекторий спутника при наблюдении техногенного свечения в районах Северного и Южного полюсов Земли. Тонкие линии — координаты зарегистрированных шумовых сигналов. Жирные линии — сигналы техногенного свечения на дневных и ночных траекториях орбиты спутника. Жирные точки на ночной стороне орбиты — координаты наиболее мощных зарегистрированных молний. Штриховые горизонтальные линии: границы тени восходящих траекторий спутника — спутник находится на ночной стороне орбиты, вне этих границ и нисходящие траектории — спутник находится на дневной стороне орбиты

биты спутника в южном и северном полушариях Земли от Северного полюса до Южного полюса. На ночной стороне географическое распределение вытягивается вдоль выделенных меридианов, долгота которых совпадает с географической долготой наиболее мощных НЧ-радиостанций. На дневной стороне орбиты спутника распределение также вытягивается вдоль меридианов, но становится равномер-

ным по долготам и в нем исчезает зависимость от географических координат НЧ-радиостанций. Наиболее отчетливо это видно в средних широтах, где техногенное свечение наблюдается практически на всех ниспадающих траекториях, вне зависимости от их долготы. Резкое изменение географического распределения в зависимости от долготы происходит на границе ночной и дневной сторон орбиты спутника.

В районах полюсов траектории спутника, на которых наблюдается техногенное свечение, имеют равномерное распределение по азимутам, что соответствует равномерному распределению по долготам в средних и нижних широтах. Кроме того, на этих широтах в распределениях свечения вдоль меридианов наблюдаются зоны со случайными географическими координатами, где техногенное свечение полностью отсутствует.

Из приведенных примеров также видно, что глобальное распределение техногенного свечения изменяется во времени. За четыре месяца с августа по ноябрь северные границы географических распределений техногенного свечения на солнечной стороне орбиты спутника независимо от времени года смещались в южном направлении так, что в отдельные дни достигали зон южнее экватора.

Также отметим, что техногенное излучение наблюдается не только в областях, соизмеримых с размерами Земли, но и в локализованных зонах, пространственные размеры которых не превышают десятков километров (указано стрелками на рис. 7).

На ночной стороне Земли техногенное свечение в основном наблюдается вдоль меридианов, долгота которых проходит вблизи наиболее мощных НЧ-радиостанций, находящихся в Америке и Австралии. Самой мощной из них является низкочастотная радиостанция NWC (North-West Cape transmitter), излучающая 1 МВт мощности на частоте 19.8 кГц, находящаяся в западной части Австралии, воздействие которой на атмосферу в период наблюдений техногенного свечения на ночной стороне регистрировалось наиболее часто.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе приводятся результаты изучения оптических явлений в атмосфере на ночных и на дневных траекториях орбиты спутника «Вернов» в УФ- и ИК-диапазонах оптического спектра.

Рассмотрены осциллограммы и географические распределения сигналов молний, транзиентных световых событий и техногенного свечения.

В приведенных примерах показано, что молнии и транзиентные световые сигналы наблюдаются и на ночной, и на дневной сторонах Земли, где их географические распределения и сезон их наиболее вероятного наблюдения существенно различаются. Осциллограммы молний имеют случайную амплитудно-временную структуру, состоящую из совпадающих по времени одного или нескольких пиков различной длительности и амплитуды УФ- и

ИК-излучений. Сигналы транзиентных световых событий, распознаваемых в этом эксперименте, также имеют сложную амплитудно-временную структуру подобную молниям, но в этих сигналах отсутствует ИК-излучение. Сигналы молний и транзиентных световых событий в ночное время наиболее часто наблюдаются в экваториальных зонах в сезон гроз. На дневной стороне орбиты с наибольшей вероятностью одиночные вспышки молний и транзиентных световых событий наблюдаются в полярных областях вне зависимости от времени года. По мощности излучения эти вспышки на несколько порядков превышают аналогичные одиночные вспышки, зарегистрированные ночью в районах грозовой активности. Вспышки со сложной структурой, состоящие из нескольких пиков, имеют значительно меньшую амплитуду сигнала, и для их наблюдения на дневной стороне, возможно, чувствительность детектора была недостаточна.

Географические распределения техногенных сигналов, зарегистрированных на дневной и ночной сторонах орбиты спутника, также существенно различаются. На ночной стороне географическое распределение сигналов техногенного свечения вытягивается вдоль выделенных меридианов, которые соответствуют географическим координатам наиболее мощных НЧ-радиостанций. На дневной стороне орбиты спутника географические распределения этих сигналов в зависимости от долготы имеют равномерный вид, в котором нет выделенных меридианов, связанных с географическим расположением радиостанций. Резкое изменение географического распределения техногенного свечения происходит на границе ночной и дневной сторон орбиты спутника. В полярных широтах сигналы техногенного свечения регистрируются вдоль траекторий спутника, пересекающих области полюса равномерно по всем азимутам практически над всей освещенной Солнцем поверхностью, направление которых не связаны с координатами НЧ-радиостанций. Амплитуды этих сигналов пропорциональны интенсивности фона атмосферы во всем диапазоне освещенностей. В отличие от молний, осциллограммы сигналов УФ- и ИК-излучений техногенного свечения сдвинуты по времени на несколько миллисекунд, регистрируются либо синфазно, либо в противофазе, со случайным сдвигом по времени, кроме того, в сигналах молний преобладает УФ-излучение, а в сигналах техногенного свечения — ИК-излучение. Основные гармоники спектра Фурье сигналов УФ- и ИК-излучений совпадают, наиболее вероятные частоты находятся в интервале 200 ± 150 Гц. При этом амплитуды

да сигналов техногенного свечения изменяется пропорционально фону атмосферы, который в период наблюдений изменялся в диапазоне, превышающем четыре порядка (в приведенных примерах от $8.2 \cdot 10^8$ до $3.5 \cdot 10^{13}$ фотон·см⁻²·с⁻¹·ср⁻¹).

За четыре месяца наблюдений (с августа по ноябрь) северная граница географического распределения техногенного свечения, наблюдавшегося на освещенных частях орбиты спутника, смещалась из районов Северного полюса на юг и достигала зон южнее экватора. Скорость изменения географических координат границ свечения не объясняется полностью сезонными изменениями, поскольку в указанный период не изменялись условия наблюдений этих сигналов на широтах выше 70° в северном и южном полушариях, но при этом происходили явные изменения географического распределения техногенного свечения. В указанный период в средних широтах на ночной стороне орбиты спутника подобных изменений не наблюдалось.

Таким образом, часть данных наблюдений показывает, что техногенное свечение возникает под воздействием НЧ-радиостанций, излучение которых распространяется в плоскости геомагнитного меридиана вдоль силовых линий магнитного поля и может вызывать свечение, распределенное вдоль географического меридиана.

Действительно, на ночной стороне орбиты в средних широтах техногенное свечение наблюдается на выделенных географических меридианах, долгота которых отличается от долготы магнитного меридиана НЧ-радиостанции на величину типичного отклонения на запад долготы траектории спутника на ночной стороне, возникающего вследствие наклона его орбиты и вращения Земли вокруг своей оси.

На то, что свечение возникает под действием радиоволн этих станций, также указывает и частотный спектр осцилляций сигналов УФ- и ИК-излучений, который соответствует частоте модуляции несущей частоты радиоизлучения этих станций.

Тем не менее этих представлений недостаточно, чтобы объяснить данные наблюдений на дневной стороне.

Географические распределения техногенного свечения на дневной стороне наиболее вероятно прерываются в районе экватора, где образуются зоны со случайными географическими координатами, в которых полностью отсутствует свечение, а не в районе полюсов, где заканчиваются околоземные

силовые линии магнитного поля, вдоль которых распространяются радиоволны низкой частоты.

Смещение северных и южных границ глобального распределения техногенного свечения за четыре месяца наблюдений в южном направлении не объясняется полностью сезонными изменениями длительности наблюдения на дневной части орбиты спутника, которая увеличивалась в южном полушарии и уменьшалась в северном полушарии.

Также трудно объяснить пропорциональную зависимость интенсивности техногенного свечения от освещенности атмосферы, а не от мощности радиостанций. Эти факты показывают, что техногенное свечение возникает не только за счет ускорения электронов радиоволнами в ионосфере, но и вследствие других процессов, усиливающих воздействие радиоизлучения.

Для объяснения наблюдающегося техногенного свечения необходимо найти причины естественного происхождения, под влиянием которых усиливается воздействие радиоизлучения НЧ-станций настолько, что становится возможным наблюдение сигналов техногенного свечения во всем диапазоне освещенностей атмосферы на дневной и ночной сторонах орбиты спутника.

На то, что такие причины существуют, указывает смещение и значительные флуктуации северных и южных границ географического распределения техногенного свечения, что является следствием естественных процессов в магнитосфере, а также ее турбулентности, из-за которой на дневной стороне орбиты спутника возникают зоны со случайными географическими координатами, в которых полностью отсутствует техногенное свечение.

Не исключено также и то, что техногенное свечение возникает вблизи космического аппарата, что не противоречит данным наблюдения, но в этом случае из-за более близкого расположения источника свечения для наблюдения сигнала требуется существенно меньшая интенсивность его свечения, а для возбуждения этого свечения и меньшая мощность НЧ-радиостанций. Для проверки перечисленных предположений с целью выявления геофизических причин возникновения обнаруженных оптических явлений необходимы дополнительные эксперименты на космических аппаратах и математическое моделирование процессов в околоземной плазме, находящейся в магнитном поле, на которую воздействует солнечное излучение и излучение НЧ-радиостанций.

Эксперимент выполнен 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, принявшим участие в дискуссиях по этой работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. I. Panasyuk, S. I. Svertilov, V. V. Bogomolov et al., *Adv. Space Res.* **57**, 835 (2016).
2. Г. К. Гарипов, М. И. Панасюк, С. И. Свертилов и др., *ЖЭТФ* **150**, 470 (2016).
3. Y. N. Taranenko, U. S. Inan, and T. F. Bell, *Geophys. Res. Lett.* **19**, 61 (1992).
4. Y. N. Taranenko, U. S. Inan, and T. F. Bell, *Geophys. Res. Lett.* **20**, 1539 (1993).
5. U. S. Inan, S. A. Cummer, and R. A. Marshall, *J. Geophys. Res.* **115**, A00E36 (2010).
6. Г. К. Гарипов, М. И. Панасюк, В. И. Тулупов и др., *ПТЭ* **1**, 135 (2006).
7. G. K. Garipov, B. A. Khrenov, M. I. Panasyuk et al., *Astropart. Phys.* **24**, 400 (2005).
8. G. K. Garipov, B. A. Khrenov, P. A. Klimov et al., *J. Geophys. Res.* **118**, 2 (2013).
9. А. В. Гуревич, *УФН* **177**, 1145 (2007).
10. Б. Н. Гершман, В. А. Угаров, *УФН* **72**, 235 (1960).