

УДК 537.591.5

## ИНДУЦИРОВАННЫЕ ВЫСЫПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ ВНУТРЕННЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ В ОКЕАНИИ

© 2023 г. Е. А. Гинзбург<sup>1, \*</sup>, М. Д. Зинкина<sup>1, \*\*</sup>, Ю. В. Писанко<sup>1, 2, \*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной геофизики

им. акад. Е.К. Федорова Росгидромета, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный (Московская обл.), Россия

\*e-mail: e\_ginzburg@mail.ru

\*\*e-mail: marinaantipina20@mail.ru

\*\*\*e-mail: pisanko@ipg.geospace.ru

Поступила в редакцию 30.01.2023 г.

После доработки 10.04.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

По данным наблюдений радиационной обстановки в космосе с борта ИСЗ “Метеор-М № 2”, находящегося на солнечно-синхронной круговой орбите высотой ~832 км, выявлено 25 аномальных возрастных потоков электронов длительностью ~6–8 мин каждое. Эти редкие события зарегистрированы в 2014–2022 гг., в Океании, в низких широтах в утренние часы местного времени в спокойных геомагнитных условиях, в энергиях от ~100 кэВ до нескольких МэВ. Потоки электронов в канале черенковского счетчика наблюдались на уровне потоков галактических космических лучей в полярных шапках, а в каналах других счетчиков – на уровне потоков в максимуме внешнего радиационного пояса. Предполагается, что наблюдались высыпания электронов из внутреннего радиационного пояса: при баунс-колебаниях электроны попадали в циклотронный резонанс с радиоизлучением, инициированным наземными и/или судовыми передатчиками в утренние часы местного времени.

DOI: 10.31857/S0016794023600072, EDN: GSKPZL

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Фоновые потоки во внутреннем радиационном поясе, в том числе и на орбите ИСЗ серии “Метеор”, а также их вариации изучаются почти 75 лет: устоявшиеся к настоящему времени представления относительно динамики радиационных поясов изложены в обзоре [Ковтюх, Панасюк, 2008]. Уже свыше 15 лет в низких широтах вне Южно-Атлантической Аномалии (в том числе и вблизи экватора) на орбитах высотой менее 1000 км наблюдаются небольшие (по сравнению с радиационными поясами), но вполне заметные потоки энергичных электронов. Такие потоки квази-захваченных электронов регистрируются в обоих полушариях. Иногда это происходит даже при низкой геомагнитной активности [Петров и др., 2020; Grachev et al., 2005; Grigoryan et al., 2008; Голубков и др., 2022]. В частности подробно исследовались [Suvorova et al., 2019] несколько возрастных потоков электронов с энергией свыше 30 кэВ на  $L < 1.2$  в Океании в течение суток 1 августа 2008 года в спокойных геомагнитных условиях. Однако о заметных возрастаниях пото-

ков электронов с энергией свыше 100 кэВ в эти сутки авторы не сообщали.

По данным наблюдений радиационной обстановки в космосе с борта ИСЗ “Метеор-М № 2”, находящегося на солнечно-синхронной круговой орбите высотой ~832 км, выявлено 25 аномальных возрастных потоков электронов длительностью ~6–8 мин каждое. Эти редкие события зарегистрированы в 2014–2022 гг., в Океании в низких широтах в утренние часы местного времени в спокойных геомагнитных условиях, в энергиях от ~100 кэВ до нескольких МэВ. Потоки в каждом таком событии оказались на уровне потоков в максимуме внешнего пояса. Описание и возможная интерпретация этого явления – цель настоящего сообщения.

### 2. РЕЗУЛЬТАТЫ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

ИСЗ “Метеор-М № 2” (запущен 8 июля 2014). Орбита – солнечно-синхронная, высота в восходящем узле  $h = 832$  км, наклонение  $i \sim 98.8^\circ$ , период обращения  $T = 101.3$  мин. Ориентация спутни-

**Таблица 1.** Основные расчетные характеристики счетчиков в каналах, использовавшихся в настоящей работе

Канал	Прибор/Счетчик	Направление осей счетчиков и поле регистрации	Тип частицы и диапазон энергий (МэВ)	Эффективная площадь (см <sup>2</sup> ) или геометрический фактор (см <sup>2</sup> стер)
СЧ	ГАЛС/черенковский	Z, 4π	Протоны >600 Электроны >8	40 см <sup>2</sup>
СГ1	ГАЛС/гейгеровский	Z, 2π	Протоны >15 Электроны >0.8	0.8 см <sup>2</sup>
СГ2	ГАЛС/гейгеровский	Z, 2π	Протоны >25 Электроны >2.1	0.8 см <sup>2</sup>
Д1	СКЛ/Телескопические сборки из полупроводникового детектора и двух сцинтилляторов	X и Z, 30°	Электроны >0.1	0.1 см <sup>2</sup> стер
Д2			Электроны >0.3	0.1 см <sup>2</sup> стер
Д3			Электроны >0.7	0.1 см <sup>2</sup> стер

ка – трехосная, ось  $X$  – по вектору скорости, ось  $Z$  – от центра Земли к спутнику, в сторону открытого космоса.

Радиометрической аппаратурой ИСЗ “Метеор-М № 2”, начиная с августа 2014 года и по настоящее время (конец 2022 года), проводятся непрерывные наблюдения потоков заряженных частиц. За 8 лет наблюдений накоплен материал о более чем 20000 прохождений через дрейфовые оболочки, относящиеся к внутреннему радиационному поясу. И за это же время мы обнаружили 25 аномальных случаев необычного поведения потоков частиц.

Такие события были зафиксированы приборами ГАЛС (разработан в ИПГ) и СКЛ (разработан в НИИЯФ МГУ). В составе прибора ГАЛС: счетчик Черенкова (канал СЧ) и два газоразрядных счетчика Гейгера (каналы СГ1 и СГ2) для регистрации частиц без разделения на протоны и электроны.

Прибор СКЛ имеет в своем составе две телескопических сборки ДАС4, каждая из которых состоит из трех детекторов: одного полупроводникового и двух сцинтилляционных. Логическая система ДАС4 формирует несколько энергетических интервалов: Д1–Д6 для электронов и Д7–Д12 для протонов. Угловые размеры поля регистрации ДАС4 – 30°. Телескопы ДАС4 установлены в двух взаимно перпендикулярных направлениях – по оси  $X$  и по оси  $Z$ .

Основные расчетные характеристики счетчиков в каналах, использовавшихся в настоящей работе, представлены в табл. 1.

Все зарегистрированные события наблюдались на нисходящем участке орбиты – при движении ИСЗ из северного полушария в южное.

В табл. 2 эти события перечислены, а на рис. 1 показан типичный пример.

В первом столбце табл. 2 указана дата события; во втором – долгота события (в градусах); в третьем – длительность события (в минутах); в четвертом –  $L$ -координата ИСЗ в начале события; в пятом –  $B$ -координата (в Гс) ИСЗ в начале события; в шестом – широта (в градусах) ИСЗ в начале события; в седьмом –  $L$ -координата ИСЗ в конце события; в восьмом –  $B$ -координата (в Гс) ИСЗ в конце события; в девятом – широта (в градусах) ИСЗ в конце события.

Из рис. 1 видно, что события проявляются в широком диапазоне энергий. Чаще всего черенковский счетчик (СЧ) регистрировал почти прямоугольный пик в потоке электронов с высоким передним выбросом, второй счетчик Гейгера (СГ2) – пик, близкий по форме к зарегистрированному черенковским детектором, а первый счетчик Гейгера (СГ1) – колоколообразный пик. Потоки в канале черенковского счетчика наблюдались на уровне потоков галактических космических лучей в полярных шапках, а в каналах других счетчиков – на уровне потоков в максимуме внешнего радиационного пояса. Заметим, что в канале черенковского счетчика, который регистрирует электроны с энергией более 8 МэВ и протоны галактических космических лучей (ГКЛ) с энергией более 800 МэВ, фон протонов ГКЛ вблизи экватора в Океании существенно понижен из-за геомагнитного обрезания. Вогнутая почти симметричная относительно экватора кривая между 45° N и 45° S на рис. 7 справа иллюстрирует этот эффект. Превышения потоков относительно этой кривой мы интерпретируем как аномальные события. Маловероятно, что аномальные события, каждый раз одновременно регистрируемые местным утром в спокойных геомагнитных усло-

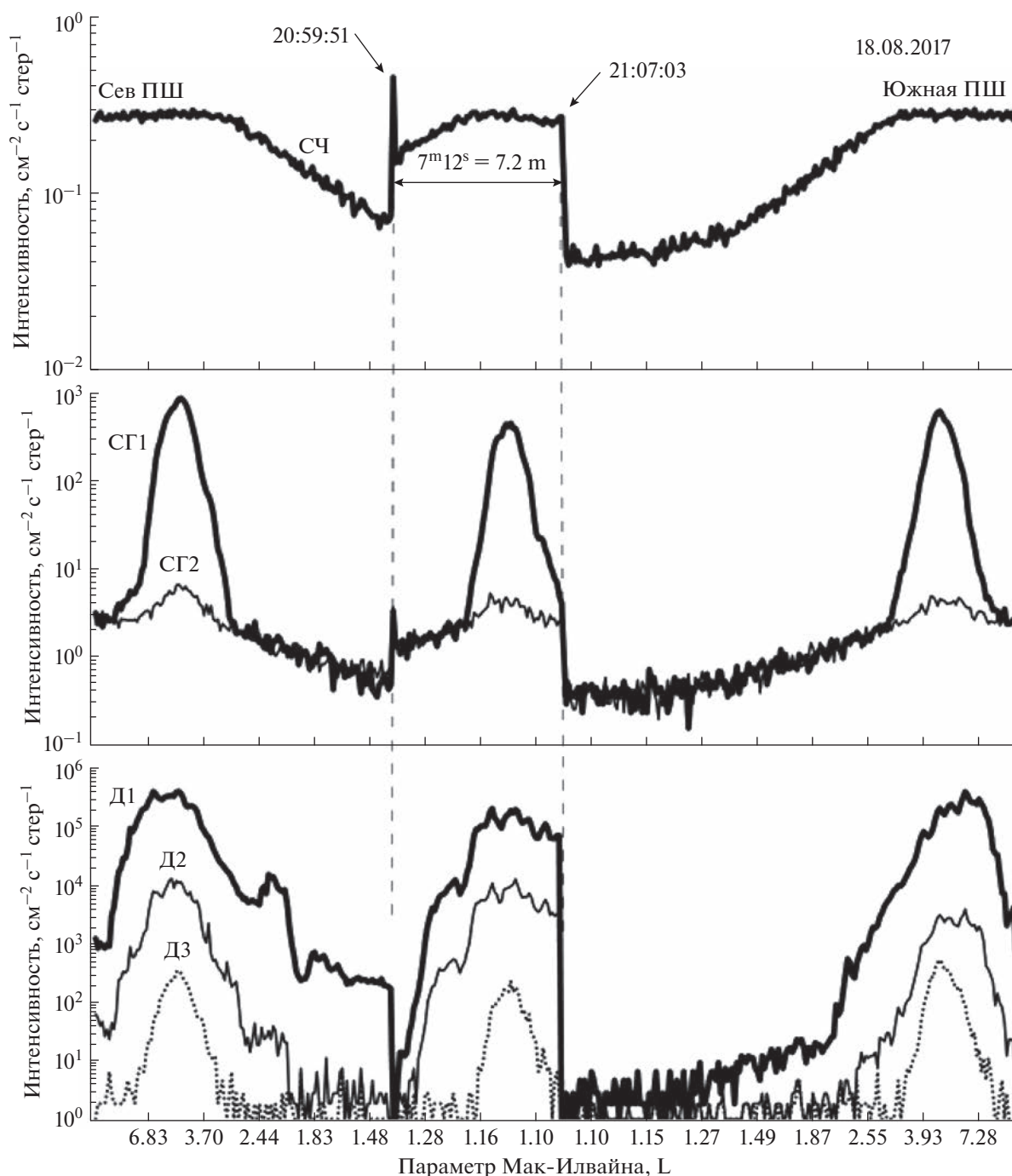
Таблица 2. События, зарегистрированные ИСЗ “Метеор-М № 2”

Дата	$\lambda$	$\Delta T$	$L_{\text{начало}}$	$B_{\text{начало}}$	$\Phi_{\text{начало}}$	$L_{\text{конец}}$	$B_{\text{конец}}$	$\Phi_{\text{конец}}$
09.10.2014	179.6	6:30	1.1	0.228	8.8	1.23	0.278	-14.4
13.08.2015	182.7	6:18	1.14	0.231	14.6	1.14	0.25	-8.2
11.06.2016	179.1	8:12	1.15	0.248	-7.5	1.98	0.363	-35.9
15.08.2016	185.3	7:30	1.42	0.272	31.4	1.1	0.227	4.5
30.09.2016	179	7:00	1.19	0.265	-12.6	2.02	0.364	-36.4
09.07.2017	180.6	6:30	1.1	0.227	8.2	1.24	0.278	-15.3
18.08.2017	183.6	7:24	1.14	0.268	30.7	1.09	0.228	4.8
07.09.2017	186	6:48	1.83	0.312	42.4	1.18	0.233	18.6
27.12.2017	183	7:30	1.44	0.275	32.5	1.1	0.228	6.2
13.03.2018	178	6:00	1.09	0.231	2.6	1.31	0.293	-18.5
25.03.2019	182.4	8:24	3.52	0.376	59.01	1.35	0.267	30.03
31.03.2019	170.6	6:36	1.15	0.256	-8	1.75	0.351	-30.7
05.04.2019	171.1	6:30	1.13	0.25	-5.4	1.65	0.343	-28.5
29.07.2019	179.7	6:18	2.49	0.355	52.4	1.35	0.271	30.8
22.11.2019	174	7:00	1.63	0.302	39.9	1.12	0.235	14.6
27.12.2019	176	8:24	2.94	0.365	56.4	1.27	0.259	27.1
11.02.2020	167.6	6:12	1.09	0.232	7.8	1.25	0.289	-14.3
02.03.2020	168.5	6:18	1.14	0.238	17.4	1.1	0.255	-4.7
18.01.2021	161.6	6:48	1.22	0.259	25.6	1.09	0.245	1.8
24.05.2021	156.2	6:18	1.08	0.238	9.8	1.22	0.291	-12.3
03.06.2021	156.7	6:00	1.09	0.239	13.8	1.15	0.272	-6.9
08.06.2021	156.8	6:36	1.11	0.241	15.8	1.15	0.273	-7
18.06.2021	160	8:12	1.14	0.248	20.4	1.17	0.28	-8.4
24.02.2022	156.3	6:18	1.08	0.238	10.1	1.22	0.291	-12.3
26.05.2022	145	7:24	1.1	0.251	16.7	1.18	0.29	-9.6

виях в широком диапазоне энергий двумя конструктивно различными приборами (ГАЛС и СКЛ) в течение более 8 лет в разные сезоны (табл. 2), были аппаратурным эффектом.

На рис. 2 представлены аппроксимации энергетических спектров для примера события, показанного на рис. 1. Рисунок 2 выполнен в двойном логарифмическом масштабе (*log-log scale*), в котором степенная функция отображается прямой линией. Представлены аппроксимации спектров для трех моментов времени ( $t_1$  – 20:59:51 UT – на-

чало события,  $t_2$  – максимум скорости счета для электронов с энергией  $>700$  кэВ,  $t_3$  – 21:07:03 UT – конец события). Прослеживаются очевидные особенности временной эволюции спектра, которые определяются временным профилем этого события. В 20:59:51 UT в начале события – наблюдается резкий скачок в показаниях гейгеровских счетчиков и счетчика Черенкова, который по величине в несколько раз превосходит фоновые показания в этих каналах. Фоновые значения обусловлены потоками ГКЛ. В этот момент в каналах ДАС4 (СКЛ) на выходе регистрируется сигнал, соответ-



**Рис. 1.** Пример показаний радиационной аппаратуры ИСЗ “Метеор-М № 2” во время события (отмечено вертикальными пунктирными линиями; событие регистрировалось с 20:59:51 по 21:07:03 всемирного времени UT).

ствующий приборному шуму ДАС4 (левая панель на рис. 2). Приборный шум в показаниях ДАС4 регистрировался и в момент 20:07:03 UT (правая панель на рис. 2).

Географическое положение всех событий отмечено маркерами на карте, показанной на рис. 3. Широту события мы условно определили как  $(\varphi_{\text{начало}} + \varphi_{\text{конец}})/2$  (см. табл. 2). Радиус окружно-

сти вокруг каждого маркера события  $\sim 1770$  км задавался исходя из длительности события  $\sim 6\text{--}8$  мин и скорости движения ИСЗ по орбите  $\sim 8$  км/с. Географические координаты событий 24.05.2021 и 24.02.2022 почти совпадают, и на карте они обозначены одним маркером. Видно, что половина событий произошла вблизи геомагнитного экватора, а также, что со временем (см. табл. 1) геогра-

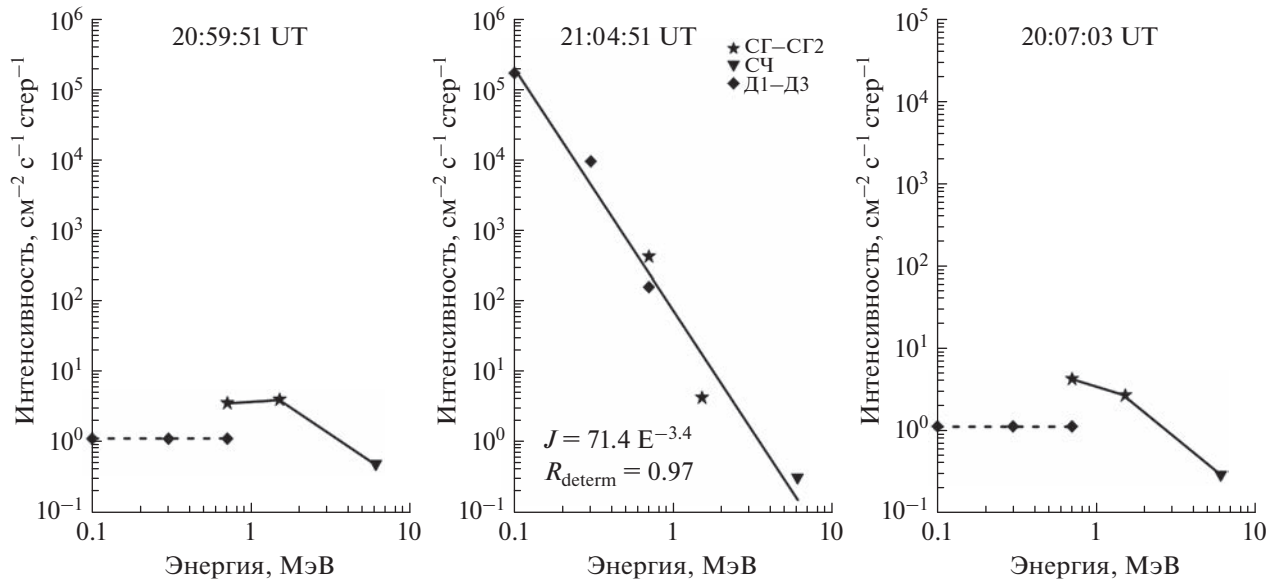


Рис. 2. Энергетические спектры высыпающих электронов в различные моменты времени.

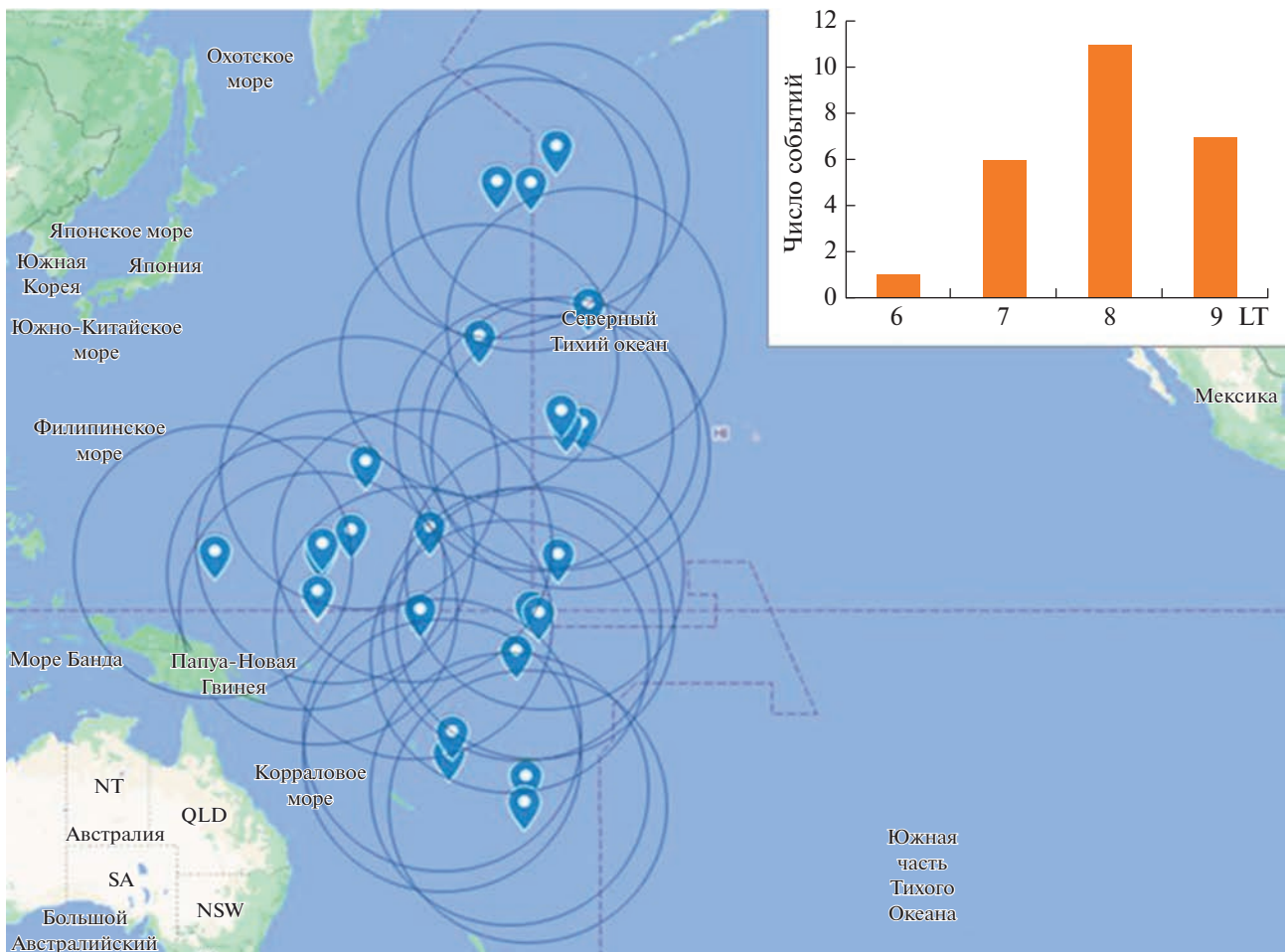


Рис. 3. Географическое положение всех зарегистрированных событий. В правом верхнем углу — гистограмма событий в зависимости от местного времени.

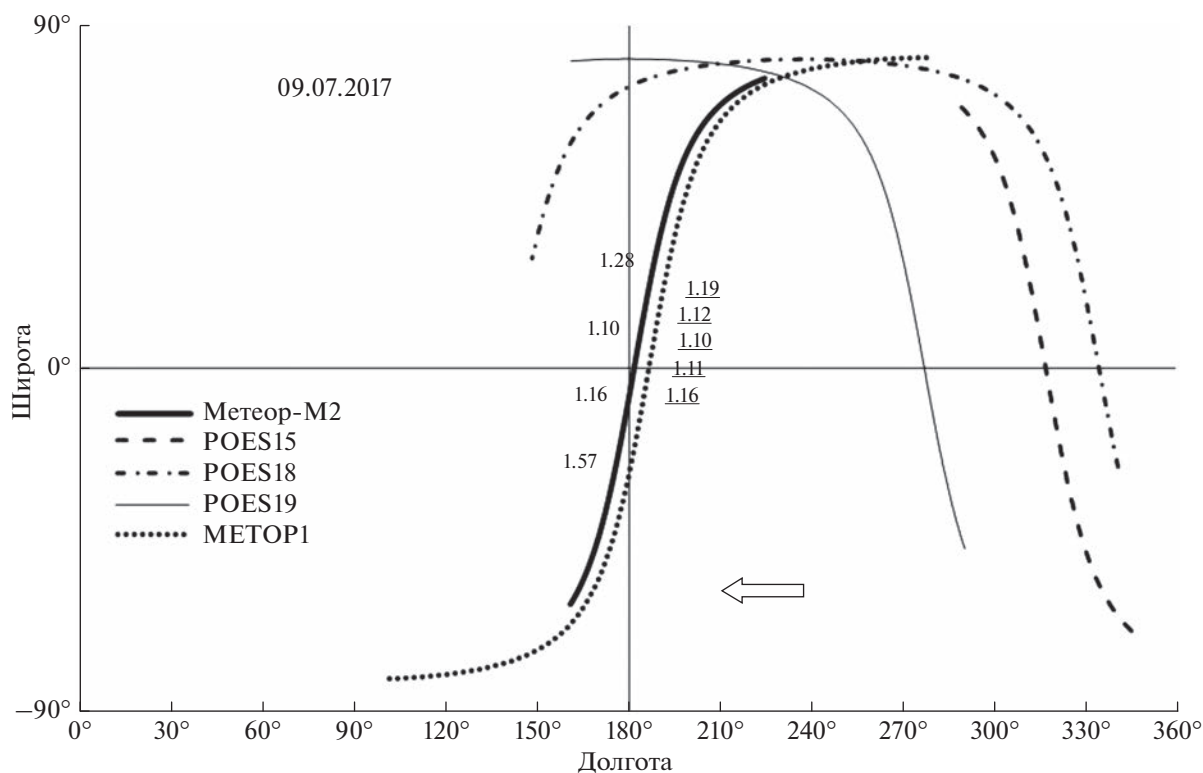


Рис. 4. Орбиты ИСЗ “Метеор-М № 2”, POES-15, POES-18, POES-19, МЕТОР-1 во время события 09.07.2017.

фическая локализация событий дрейфует к западу, в направлении моря Сулу. В правом верхнем углу на рис. 3 показана гистограмма числа событий в зависимости от местного времени ( $LT$ ). На ней видно, что чаще всего события происходили около 8 утра местного времени.

В моменты регистрации всех событий мы определили местонахождение американских ИСЗ POES-15, POES-18, POES-19, МЕТОР-1, МЕТОР-2, имеющих полярные солнечно-синхронные орбиты схожие по параметрам с орбитой “Метеор-М № 2”. Четыре события, при которых американские ИСЗ находились ближе всего к ИСЗ “Метеор-М № 2”, указаны в табл. 3. Третья и четвертая строки табл. 3 означают, что в момент события 2 марта 2020 г. вблизи ИСЗ “Метеор-М № 2”

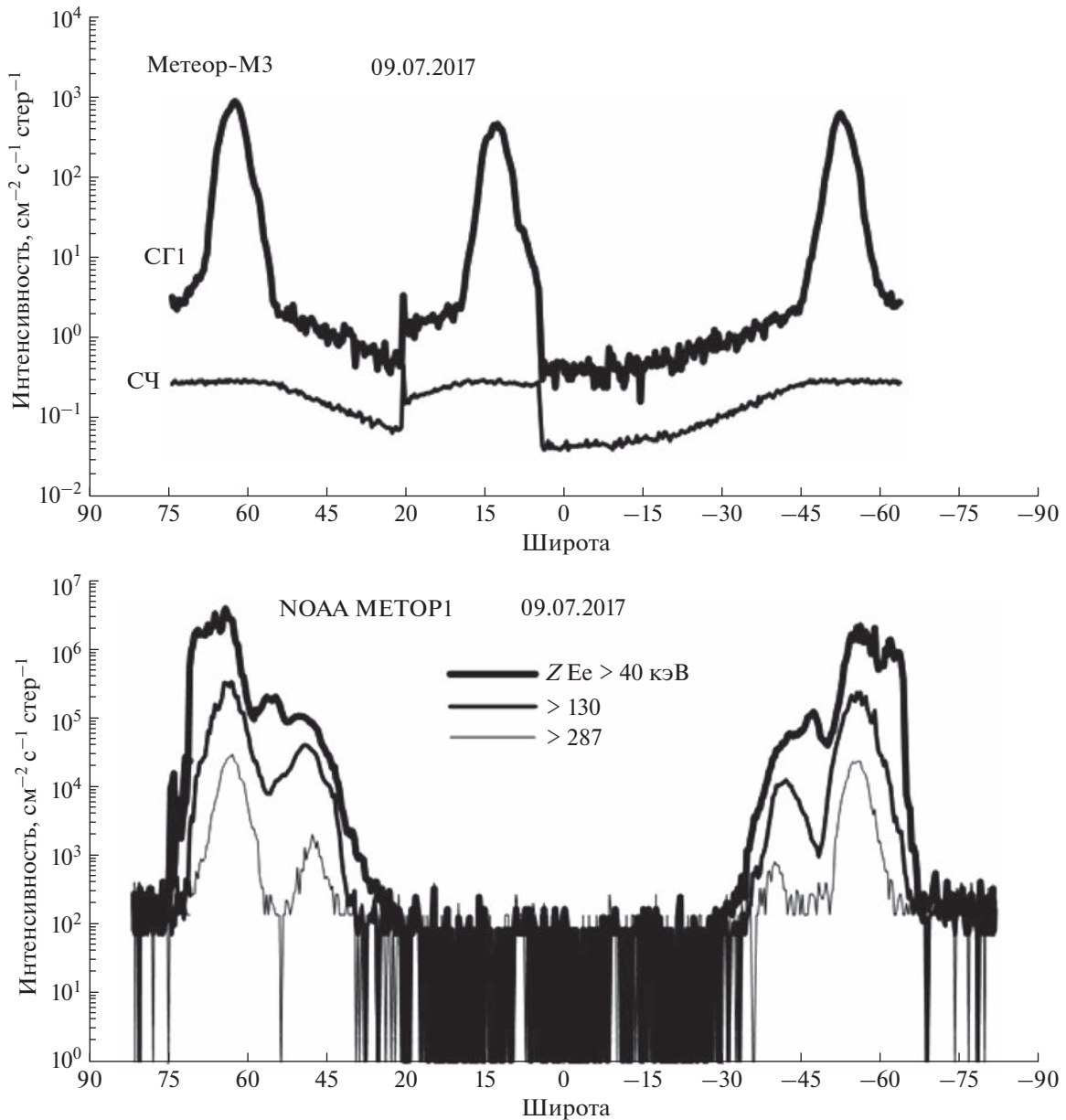
находились сразу два американских ИСЗ – POES-18 и МЕТОР-1.

Однако эти американские ИСЗ не зафиксировали событий, которые зарегистрировал ИСЗ “Метеор-М № 2”. В качестве примера на рис. 4 приведены орбиты ИСЗ для события 09.07.2017 г.; соответствующие показания приборов российского и американского ИСЗ приведены на рис. 5, из которого ясно, что ИСЗ МЕТОР-1 событие не зафиксировал.

На рис. 6 приведена карта, на которой обозначены положения и траектории российских и американских ИСЗ, попавших в табл. 3. Траектории ИСЗ “Метеор-М № 2” обозначены сплошными линиями, траектории американских ИСЗ – пунктирными линиями. Как и на рис. 3, вокруг каждо-

Таблица 3. Четыре события, при которых американские ИСЗ находились ближе всего к ИСЗ “Метеор-М № 2”

Дата	ИСЗ США	Широта (град.)	Долгота (град.)	ИСЗ РФ	Широта (град.)	Долгота (град.)	Расстояние между ИСЗ
2017.07.09	МЕТОР-1	17	190.4	Метеор-М №2	-3	181.1	2638 км
2018.03.13	МЕТОР-1	-22	183.8		-8	181.2	1764 км
2020.03.02	POES-18	-3	181.6		6	168.5	1969 км
2020.03.02	МЕТОР-1	-8	186.4		6	168.5	2816 км
2021.01.18	POES-15	25	159.2		14	161.6	1395 км



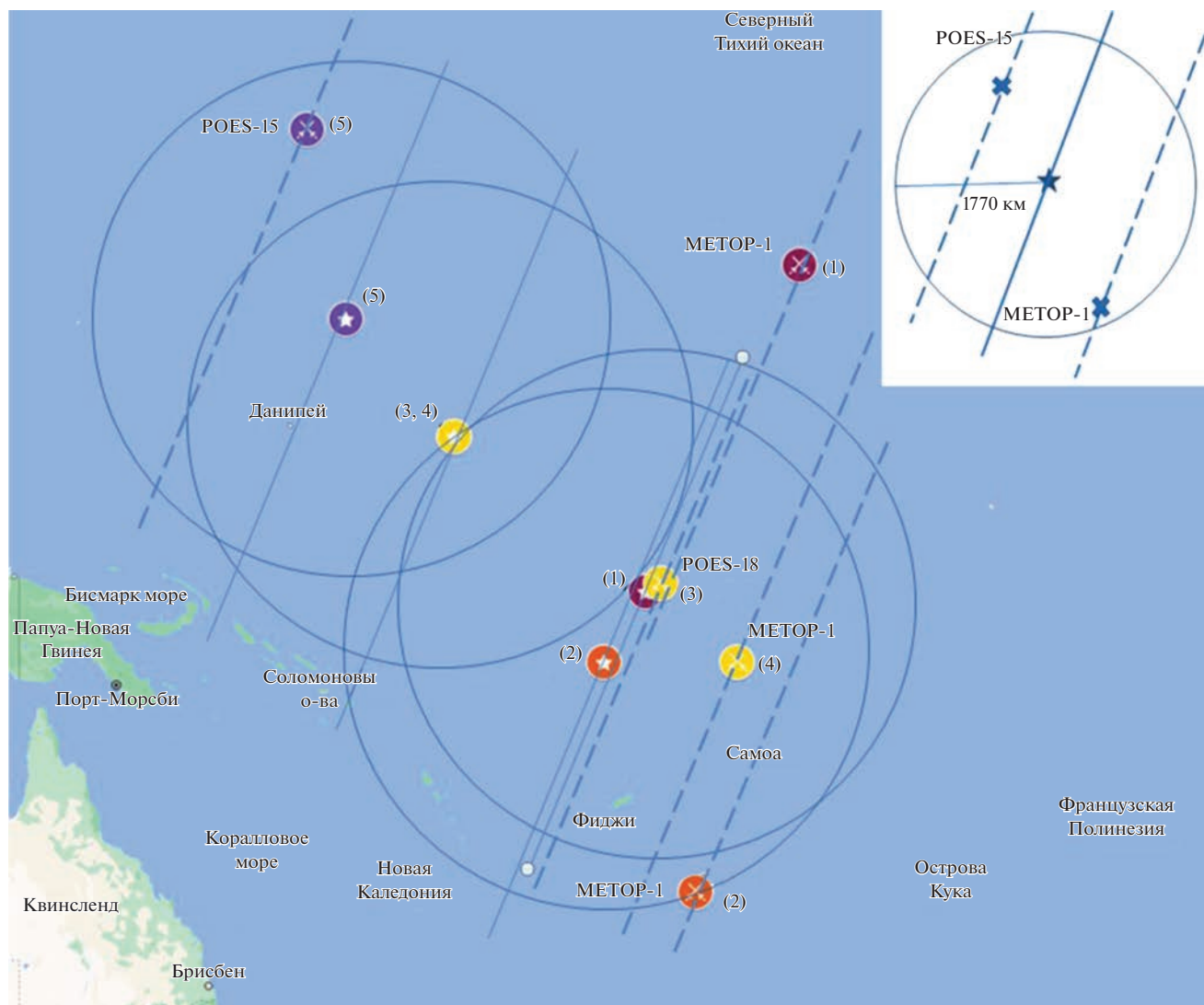
**Рис. 5.** Показания радиационной аппаратуры ИСЗ “Метеор-М № 2” и ИСЗ МЕТОР-1 во время события 09.07.2017. По оси абсцисс отложена широта точки наблюдения.

го маркера ИСЗ “Метеор-М № 2” (обозначен звездой) нарисован круг радиусом 1770 км. Рядом с каждым ИСЗ (в круглых скобках) показан номер строки из табл. 3, в которой упомянут этот ИСЗ. В правом верхнем углу на рис. 6 представлена схема, на которой все четыре круга, относящихся к ИСЗ “Метеор-М № 2”, наложены друг на друга, образуя один общий круг, в центре которого — маркер ИСЗ “Метеор-М № 2”. При таком наложении траектории двух из пяти американских ИСЗ из табл. 3, присутствующие на карте, попадают внутрь этого круга. Поскольку все американские ИСЗ не зафиксировали событий, эта схе-

ма может иллюстрировать предположение, что соответствующие события, по-видимому, имеют вытянутую вдоль траектории ИСЗ “Метеор-М № 2” форму: примерно в направлении проекции геомагнитных силовых линий на поверхность Земли.

Слева на рис. 7 приведена частота встречаемости (гистограмма) событий в зависимости от  $B$ -координаты события, которую мы условно определили как  $B = (B_{\text{начало}} + B_{\text{конец}})/2$  (см. табл. 2), а справа на двух рисунках, расположенных один под другим, широтные профили потоков энергичных электронов черенковского счетчика





**Рис. 6.** Карта с траекториями ИСЗ из таблицы 3. В правом верхнем углу – схема, иллюстрирующая тезис о вытянутости формы событий вдоль траектории ИСЗ “Метеор-М № 2”.

вблизи экватора (верхняя правая картинка) и на некотором удалении от него по широте (нижняя правая картинка). Из гистограммы видно, что события чаще происходили при  $B \sim 0.25\text{--}0.26$  Гс и при  $B \sim 0.31$  Гс. Две картинки справа на рис. 7 расшифровывают гистограмму с учетом роста напряженности геомагнитного поля от экватора с широтой. Правая верхняя картинка на рис. 7 отражает первый пик на гистограмме ( $B \sim 0.25\text{--}0.26$  Гс), а правая нижняя картинка на рис. 7 – второй пик на гистограмме ( $B \sim 0.31$  Гс).

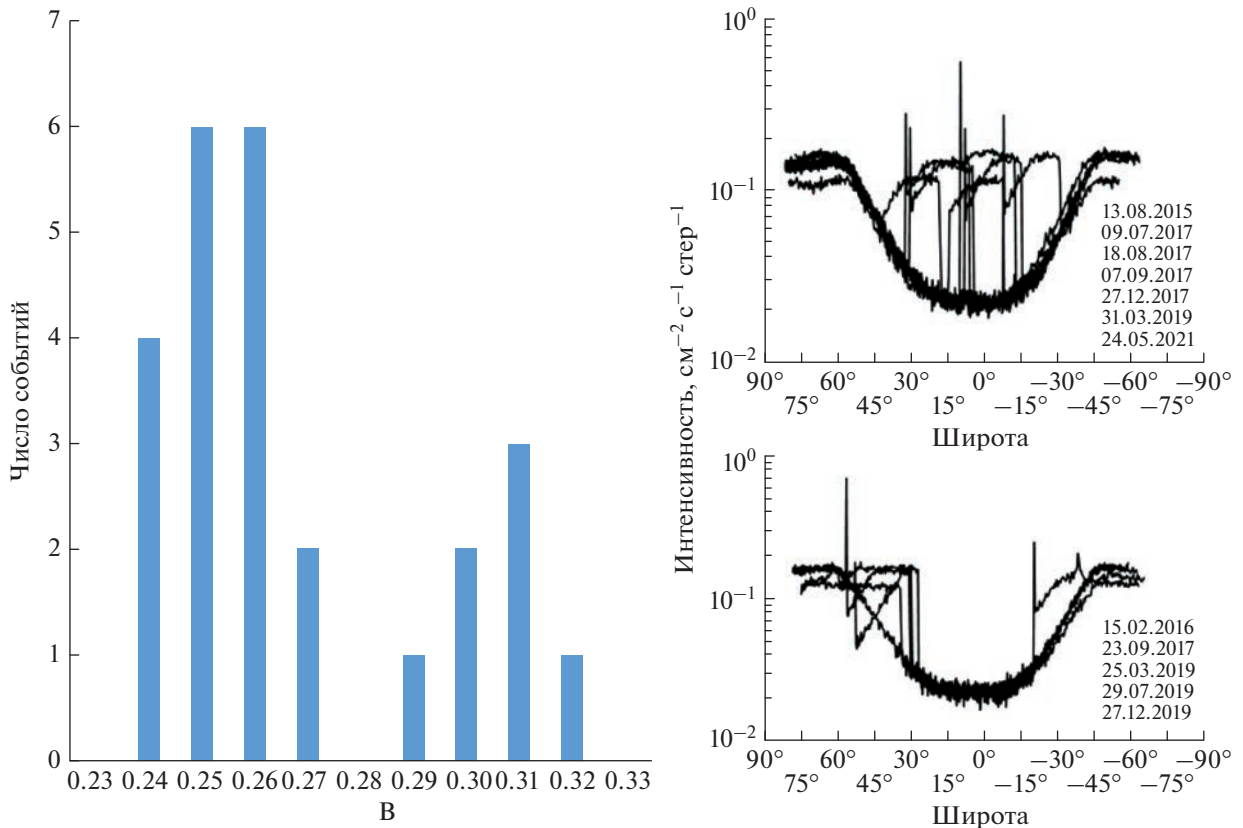
### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Поскольку значимые потоки энергичных электронов регистрируются на небольших L-оболочках в течение месяцев, а то и лет [Петров и др.

2020], рассматривают различные пути появления электронов на этих оболочках.

Например, внешнюю подпитку таких оболочек могли бы обеспечить высыпания энергичных электронов из зоны захвата (инжекция сверху) при их взаимодействии со свистовыми волнами, генерируемыми в грозовых разрядах под ионосферой [Inan et al. 1985; Bortnik et al., 2002]. При этом постулируется утечка сквозь ионосферу в магнитосферу части электромагнитной энергии свистовых волн при их распространении в волноводе земля–ионосфера. Проблемы проникновения свистовых волн вверх через ионосферу не возникает в случае инъекции электронов из высотных грозовых разрядов (инжекция снизу) непосредственно в околоземное космическое пространство [Петров и др. 2020]. Основа этой концепции





**Рис. 7.** Частота встречаемости событий при различных  $B$  (левая часть рисунка); профили скорости счета черенковско-го счетчика для некоторых из наблюдаемых событий в зависимости от широты точки наблюдения (правая часть рисунка).

в следующем. Повышенные потоки электронов вблизи геомагнитного экватора “начинают появляться” к востоку от Африки, т.е. там, куда должны дрейфовать электроны, инжектированные над областями высокой грозовой активности в экваториальной Африке. Кроме того количество локальных максимумов потоков электронов существенно увеличивается в областях высокой грозовой активности в Юго-Восточной Азии. К сожалению, эти соображения не помогают при интерпретации обнаруженных нами редких аномальных событий в Океании. Дело в том, что все события были зарегистрированы в западной части Тихого океана (рис. 3) около 21 ч всемирного времени UT, т.е. утром по местному времени. Однако максимум грозовой активности наступает между 15–18 ч местного времени, а минимум – между 6–12 ч [Денисенко, Ляхов, 2021], и время азимутального дрейфа квази-захваченных энергичных электронов вокруг Земли – несколько часов. Поэтому мы предполагаем, что наблюдавшиеся события возникали в результате взаимодействия энергичных электронов внутреннего радиационного пояса с радиоволнами мегагерцо-

вого диапазона, инициированными местными наземными и/или судовыми передатчиками.

Утром (для определенности около 8 ч утра местного времени) критическая частота  $f_oF2$  в спокойных гелиогеофизических условиях составляет от 4.5 до 7 МГц по наблюдениям ионосферных станций (Hobart, Canberra, Salisbury, Brisbane, Vanimo) в Тасмании, на восточном побережье Австралии, в Океании и на Новой Гвинее [Scali and Dyson, 1989]; от 6 до 7 МГц – по наблюдениям ионосферных станций Manila (Филиппины) и Okinawa (Япония) [Akala et al., 2010]; от 5 до 6 МГц – по наблюдениям ионосферной ст. Guam (владение США) [Rastogi, 1959]. Утренняя перестройка ионосферы, которая сопровождается появлением в это время заметных градиентов электронной концентрации, позволяет предположить возникновение благоприятных условий для генерации там стимулированных излучений на субгармониках волн накачки, излучаемых наземными и/или судовыми передатчиками на частотах, близких к критическим – 5–7 МГц. На теоретическую возможность генерации субгармоник в неоднородной плазме указывали [Gradov and Stenflo, 1980], а сгенерированная в ионосфере

первая субгармоника частоты волны накачки была зарегистрирована экспериментально [Derblom et al., 1989]. Прохождение местным утром во внутренний радиационный пояс сигналов наземных передатчиков с частотами десятки килогерц (существенно меньших критической частоты 5–7 МГц) блокируется ионосферой [Meredith et al., 2019].

Частоты в диапазоне 5–7 МГц используют станции сухопутных, морских и воздушных подвижных служб, служба стандартных частот и сигналов времени, радиовещательные станции, радиолюбители ([https://digital.gov.ru/opendata/7710474375-trpch/table/?utm\\_referrer=https%3a%2f%2fwww.google.com%2f](https://digital.gov.ru/opendata/7710474375-trpch/table/?utm_referrer=https%3a%2f%2fwww.google.com%2f)).

Ничто не запрещает сгенерированным субгармоникам распространяться из ионосферы вверх во внутренний радиационный пояс. Циклотронная частота электронов в поясе ~1 МГц, и утреннее появление мегагерцового радиоизлучения способно за счет циклотронного резонанса спровоцировать там в это время питч-угловую диффузию электронов в конус потерь при баунс-колебаниях. Ларморовский радиус электронов пояса не превосходит нескольких километров, а длина трассы баунс-колебаний таких электронов между точками отражения вдоль геомагнитной силовой линии составляет тысячи километров, что позволяет геометрически ограничиться приближением ведущего центра. Наименьшая энергия регистрируемых в событиях электронов ~100 кэВ ( $\beta \approx 0.55$ ) предполагает релятивистское рассмотрение. Если частота субгармоник больше электронной циклотронной частоты, то в резонанс попадают электроны пояса, которые при баунс-колебаниях удаляются от ионосферной области генерации субгармоник. В этом случае условие циклотронного резонанса записывается в виде:

$$\frac{eB}{m2\pi}(1-\beta^2)^{1/2} = \frac{\Omega}{n}(1-\beta\cos\alpha)(1-\beta^2)^{-1/2}. \quad (1)$$

Здесь  $n = 2, 3, 4, \dots$  – номер субгармоники радиоволны накачки (первая, вторая и т.д.);  $e$  – элементарный электрический заряд;  $m$  – масса покоя электрона;  $B$  – величина геомагнитного поля в точке взаимодействия субгармоники и электрона;  $\alpha$  – угол между направлением распространения субгармоники и направлением движения ведущего центра электрона;  $\Omega$  – несущая частота радиоволны накачки;  $\beta = v/c$ ,  $v$  – скорость электрона;  $c$  – скорость света. Обозначим через:

$$x = \frac{2\Omega m\pi}{neB} > 1. \quad (2)$$

Из (1) следует, что  $x > 1$ , если  $\beta < \cos\alpha$ . Из (1) также следует уравнение на  $\beta$ :

$$\beta^2 - \beta x \cos\alpha + x - 1 = 0$$

у которого два корня:

$$\beta_{1,2} = \frac{x}{2} \cos\alpha \pm \left( \frac{x^2 \cos^2\alpha}{4} - x + 1 \right)^{1/2}. \quad (3)$$

Первый корень (знак “минус” перед круглой скобкой) соответствует относительно небольшим энергиям электронов, при которых электронная циклотронная частота почти не уменьшается, а частота радиоволны уменьшается почти линейно за счет эффекта Доплера. Второй корень (знак “плюс” перед круглой скобкой) соответствует большим энергиям электронов, при которых электронная циклотронная частота резко падает за счет релятивистского увеличения массы электрона, а на доплеровское уменьшение частоты радиоволны начинает влиять релятивистское (в  $(1-\beta^2)^{-1/2}$  раз) “растяжение” промежутков времени (частота обратно пропорциональна периоду). Таким образом, для заданных  $x$  и  $\alpha$  в циклотронный резонанс с субгармоникой попадают сразу две (по энергии) группы электронов внутреннего радиационного пояса (рис. 8). При этом, область допустимых значений  $\alpha$  зависит от энергии: чем больше энергия электрона, тем ближе к нулю наибольший угол  $\alpha$ , при котором возможен резонанс ( $\beta < \cos\alpha$ ).

Подкоренное выражение положительно

$$\frac{x^2 \cos^2\alpha}{4} - x + 1 > 0$$

если

$$\cos^2\alpha > \frac{4}{x} \left( 1 - \frac{1}{x} \right). \quad (4)$$

Из (3) следует, что  $0 < \beta_{1,2} < 1$  если

$$\cos\alpha < \frac{2}{x}. \quad (5)$$

Из (4) и (5) вытекает неравенство:

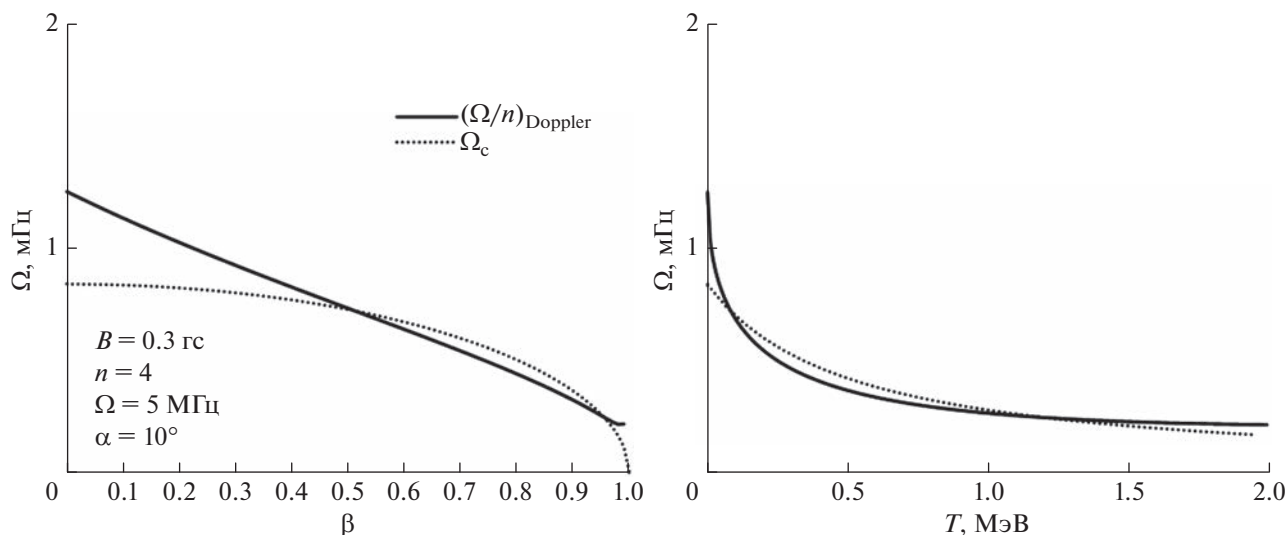
$$\frac{2}{x} > \left[ \frac{4}{x} \left( 1 - \frac{1}{x} \right) \right]^{1/2} \quad (6)$$

которое удовлетворяется при  $x < 2$ .

Таким образом,  $1 < x < 2$ , что с учетом (2) ограничивает номера субгармоник  $n$ , на которых при заданных значениях  $\Omega$  и  $B$  возможен циклотронный резонанс, неравенством:

$$\frac{\pi m \Omega}{eB} < n < 2 \frac{\pi m \Omega}{eB}. \quad (7)$$

Геомагнитное поле на участках орбиты, где регистрировались события, изменяется от  $B_{\min} \sim 0.25$  Гс до  $B_{\max} \sim 0.3$  Гс, а частота радиоволн накачки мо-



**Рис. 8.** Зависимость доплеровского сдвига третьей субгармоники частоты волны накачки (правая часть уравнения (1)) и циклотронной частоты ( $\Omega_c$ ) (левая часть уравнения (1)) от  $\beta$  электрона внутреннего радиационного пояса (левая панель). Зависимость доплеровского сдвига третьей субгармоники частоты волны накачки и циклотронной частоты от энергии электрона внутреннего радиационного пояса (правая панель).

жет варьироваться от  $\Omega_{\min} \sim 5$  МГц до  $\Omega_{\max} \sim 7$  МГц. Тогда

$$\frac{\pi m \Omega_{\min}}{e B_{\min}} = 3.57, \quad \frac{\pi m \Omega_{\min}}{e B_{\max}} = 2.98,$$

$$\frac{\pi m \Omega_{\max}}{e B_{\min}} = 5.00, \quad \frac{\pi m \Omega_{\max}}{e B_{\max}} = 4.17.$$

Из (7) следует, что для  $(\Omega_{\min}, B_{\min})$  резонанс возможен при  $n = 4, 5, 6, 7$ ; для  $(\Omega_{\min}, B_{\max})$  — при  $n = 3, 4, 5$ ; для  $(\Omega_{\max}, B_{\min})$  — при  $n = 6, 7, 8, 9, 10$ ; для  $(\Omega_{\max}, B_{\max})$  — при  $n = 5, 6, 7, 8$ . Видно, что возрастание частоты волны накачки и уменьшение геомагнитного поля сдвигает в сторону увеличения номера субгармоник возможного резонанса. Поскольку мощность радиоизлучения на субгармонике обычно падает с увеличением ее номера, то можно ожидать более эффективной диффузии электронов в конус потерь при резонансе на первых субгармониках. В нашем случае резонансы на второй ( $n = 3$ ) и третьей ( $n = 4$ ) субгармониках представляются наиболее реалистичными, хотя и резонансы на остальных возможных субгармониках формально не запрещены.

В резонансы с субгармониками попадают частицы разных энергий, что и обуславливает регистрацию индуцированных аномальных событий в широком диапазоне энергий. Местным утром критическая частота ионосферы относительно низкая, поэтому резонансы (и, соответственно, аномальное событие) ожидаются скорее утром.

Для полноты заметим, что предлагаемая интерпретация в терминах резонанса на субгармониках не единственна. Все приведенные неслож-

ные математические выкладки не меняются и в другом варианте интерпретации представленных спутниковых наблюдений. В этом другом варианте частота волны передатчика в диапазоне 5–7 МГц, способная утром проникнуть сквозь ионосферу вверх в радиационный пояс, предполагается кратко выше гирочастоты находящегося в поясе электрона (с учетом релятивистского эффекта Доплера). Тогда электрон (в своем циклотронном вращении) окажется в фазе с ускоряющим электрическим полем каждые несколько периодов волны. Увеличение энергии электрона спровоцирует изменение его питч угла и уход в конус потерь.

Заметим, что, как видно из табл. 2, из 25 наблюдавшихся событий 2 события можно условно отнести к области зазора. Это 25.03.2019 ( $L_{\text{начало}} = 3.52$ ,  $L_{\text{конец}} = 1.35$ ) и 27.12.2019 ( $L_{\text{начало}} = 2.94$ ,  $L_{\text{конец}} = 1.27$ ). В качестве возможной причины возникновения этих двух событий нельзя исключить и развитие циклотронной неустойчивости в зазоре [Ma et al., 2017].

Длительность каждого события составляет примерно 6–8 мин. В зоне связи с наземным комплексом приема, обработки и распространения информации (НКПОР) ИСЗ “Метеор”, при скорости  $\sim 8$  км/с, находится около 10 мин [Макриденко и др., 2008]. Длительность события немного короче времени пребывания ИСЗ в зоне сеанса связи с НКПОР. Это позволяет предположить, что каждое событие регистрируется при нахождении ИСЗ в зоне работы того или иного местного наземного и/или судового передатчика, излучающего на частоте от  $\sim 5$  МГц до  $\sim 7$  МГц. Небольшая разница во времени может быть следствием того,

что в сеансе связи с НКПОР наземная приемная антенна осуществляет автосопровождение ИСЗ, а при пересечении орбитой ИСЗ зоны работы стороннего передатчика автосопровождение отсутствует.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным наблюдений радиационной обстановки в космосе с борта ИСЗ “Метеор-М № 2”, находящегося на солнечно-синхронной круговой орбите высотой ~832 км, выявлено 25 аномальных возрастаний потоков электронов длительностью ~6–8 мин каждое. Эти редкие события зарегистрированы в 2014–2022 гг., в Океании в низких широтах в утренние часы местного времени в спокойных геомагнитных условиях, в энергиях от ~100 кэВ до нескольких МэВ. Потоки электронов в канале черенковского счетчика наблюдались на уровне потоков галактических космических лучей в полярных шапках, а в каналах других счетчиков — на уровне потоков в максимуме внешнего радиационного пояса. Все события наблюдались на нисходящем участке орбиты — при движении ИСЗ из северного полушария в южное. Половина событий произошла вблизи геомагнитного экватора. В моменты регистрации событий с борта ИСЗ “Метеор-М № 2” американские ИСЗ, имеющие схожие по параметрам солнечно-синхронные орбиты, не зафиксировали событий, которые зарегистрировал ИСЗ “Метеор-М № 2”. Это может указывать на то, что соответствующие события, по-видимому, имеют вытянутую вдоль траектории ИСЗ “Метеор-М № 2” форму: примерно в направлении проекции геомагнитных силовых линий на поверхность Земли.

По-видимому, наблюдавшиеся события можно интерпретировать как высыпания электронов из внутреннего радиационного пояса. При баунс-колебаниях электроны попадают в циклотронный резонанс с радиоизлучением, инициированным наземными и/или судовыми передатчиками в утренние часы местного времени.

Мы благодарны двум анонимным рецензентам за сделанные замечания и высказанные предложения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Голубков М.Г., Дмитриев А.В., Суворова А.В., Голубков Г.В. Пространственное распределение высыпаний интенсивных потоков быстрых электронов в ионосферу в 23-м и 24-м солнечных циклах // Химич. физика. Т. 41. № 5. С. 84–89. 2022.  
<https://doi.org/10.31857/S0207401X22050065>

— Денисенко В.В., Ляхов А.Н. Сравнение наземных и спутниковых данных о пространственно-временном распределении грозных разрядов при низкой солнечной активности // Солнечно-земная физика. Т. 7.

№ 4. 2021.

<https://doi.org/10.12737/szf-74202112>

— Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения “Метеор-3М” с космическим аппаратом “Метеор-М” № 1 (Справочные материалы) (Под редакцией: д. т. н. Макриденко Л.А., д. т. н. Волкова С.Н., д. т. н. Трифонова Ю.В., к. т. н. Горбунова А.В.), Москва, ФГУП “НПП ВНИИЭМ”. С. 142. 2008.

— Ковтюх А.С., Панасюк М.И. Радиационные пояса Земли. В: коллективной монографии “Плазменная гелиогеофизика” (под ред. Л.М. Зеленого и И.С. Веселовского) // Физматлит, М. Т. 1. С. 510–534. 2008.

— Петров В.Л., Богомолов А.В., Богомолов В.В., Калегав В.В., Панасюк М.И., Свертилов С.И., Косенко А.А. Пространственные и временные характеристики потоков электронов субрелятивистских энергий в околоземном космическом пространстве по данным спутника Вернов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 2. С. 152–163. 2020.

— Таблица распределения полос частот между радиослужбами Российской Федерации в диапазоне частот от 3 кГц до 400 ГГц (Утверждена решением ГКРЧ России от 8.04.1996) [https://digital.gov.ru/opendata/7710474375-trpch/table/?utm\\_referrer=https%3a%2f%2fwww.google.com%2f](https://digital.gov.ru/opendata/7710474375-trpch/table/?utm_referrer=https%3a%2f%2fwww.google.com%2f).

— Akala A.O., Adeloye A.B., Somoye E.O. Ionospheric foF2 variability over the Southeast Asian sector // Journal of Geophysical Research, V. 115. A09329. 2010.  
<https://doi.org/10.1029/2010JA015250>.

— Bortnik J., Inan U.S., Bell T.F. L dependence of energetic electron precipitation driven by magnetospherically reflecting whistler waves // Journal of Geophysical Research. V. 107. № A8. 1150. 2002. <http://doi.org/10.1029/2001JA000303>

— Derblom H., Thide B., Leyser T.B., Nordling J.A., Hedberg A., Stubbe P., Kopka H., Rietveld M. Tromso heating experiments: stimulated emission at HF pump harmonic and subharmonic frequencies // J. Geophysical Research. V. 94. Issue A8. P. 10.111–10.120. 1989.  
<https://doi.org/10.1029/JA094iA08p10111>

— Grachev E.A., Grigoryan O.R., Klimov S.I., Kudela K., Petrov A.N., Schwingenschuh K., Sheveleva V.N., Stetiarova J. Altitude distribution analysis of electron fluxes at L = 1.2–1.8 // Advances in Space Research. V. 36. P. 1992–1996. 2005.

— Gradov O.M., Stenflo L. Nonlinear subharmonic generation in nonuniform plasmas // Plasma Physics. V. 22. Issue 7. P. 727–732. 1980.

— Grigoryan O.R., Panasyuk M.I., Petrov V.L., Sheveleva V.N., Petrov A.N. Spectral characteristics of electron fluxes at L < 2 under the Radiation Belts // Advances in Space Research. V. 42. P. 1523–1526. 2008.

— Inan U.S., Carpenter D.L., Helliwell R.A., Katsufarakis J.P. Sunionospheric VLF/LF phase perturbations produced by lightning-induced particle precipitation // J. Geophysical Research. V. 90. P. 7457–7469. 1985.

— Ma Q., Li W., Thorne R.M., Bortnik J. et al. Diffusive transport of several hundred keV electrons in the Earth’s slot region // J. Geophysical Research: Space Physics. V. 122. P. 10235–10246. 2017.  
<https://doi.org/10.1002/2017JA024452>

- *Meredith N.P., Horne R.B., Clilverd M.A., Ross J.P.* An investigation of VLF transmitter wave power in the inner radiation belt and slot region // *J. Geophysical Research: Space Physics*. V. 124. P. 5246–5259. 2019.  
<https://doi.org/10.1029/2019JA026715>
- *Rastogi R.G.* The diurnal development of the anomalous equatorial belt in the F2 region of the ionosphere // *J. Geophysical Research*. V. 64. № 7. P. 727–732. 1959.
- *Scali J.L., Dyson P.L.* Behavior of the F2 layer at mid-latitudes. in: *Solar-Terrestrial Predictions: Proceedings of a Workshop at Leura, Australia October 16–20, Volume 2: geomagnetic and space environment papers and ionospheric papers* (ed. R.J. Thompson, D.G. Cole, P.J. Wilkinson, M.A. Shea, D. Smart, G. Heckman), Air Force Geophysics Laboratory, Bedford, Massachusetts, IPS Radio and Space Services, Chatswood, NSW 2057, Australia, U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Boulder, Colorado, P. 352–366. 1989.
- *Suvorova A.V., Dmitriev A.V., Parkhomov V.A.* Energetic electron enhancements under the radiation belt ( $L < 1.2$ ) during a non-storm interval on 1 August 2008 // *Annales Geophysicae*. V. 37. P. 1223–1241. 2019.  
<https://doi.org/10.5194/angeo-37-1223-2019>