

УДК 537.591.5

ИНДУЦИРОВАННЫЕ ВЫСЫПАНИЯ ПРОТОНОВ ИЗ ВНУТРЕННЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ В ОКЕАНИИ

© 2025 г. Е. А. Гинзбург^{1, *}, М. Д. Зинкина^{1, **}, Ю. В. Писанко^{1, 2, ***}

¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова Росгидромета (ИПГ Росгидромета), Москва, Россия

²Московский 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 30.01.2024 г.

После доработки 10.04.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Зафиксированы события индуцированных высыпаний протонов из внутреннего радиационного пояса, сопровождавшие примерно половину (11) из 25 аномальных электронных высыпаний, зарегистрированных с борта ИСЗ “Метеор-М № 2” в 2014–2022 гг. в Океании в низких широтах в утренние часы местного времени в спокойных геомагнитных условиях. Предполагается, что такие события могли бы быть спровоцированы попаданием протонов в циклотронный резонанс с низкочастотным излучением, стимулированным в ионосфере плавучим нагревным стендом. Также обсуждаются наблюдаемые эффекты в аномальных электронных высыпаниях, которые можно интерпретировать в рамках концепции плавучего нагревного стенда.

Ключевые слова: внутренний радиационный пояс, протонные и электронные высыпания, плавучий нагревный стенд

DOI: 10.31857/S0016794025010052, **EDN:** AENIQH

1. ВВЕДЕНИЕ

Внутренний радиационный пояс заполнен, в том числе, и энергичными протонами. Он относительно стабилен – среднее время пребывания там таких протонов ~10 лет. Развита теоретическая [Selesnik et al., 2007] и эмпирическая (по данным наблюдений спутников Van-Allen Probes) [Selesnik et al., 2018] модели протонного радиационного пояса.

Тем не менее, время от времени отмечаются протонные высыпания из этого пояса. Низкоширотные зоны протонных высыпаний в энергиях (0.58–35) МэВ наблюдались с борта спутника OHZORA [Nagata et al., 1988]. Сообщалось [Biryakov et al., 1996] о высыпаниях протонов с энергиями до нескольких МэВ из внутреннего радиационного пояса, наблюдавшихся на орбите космической станции “Мир” (~400 км) вблизи экватора. Существование вблизи геомагнитного экватора потоков высыпающихся протонов с энергиями более 30 МэВ регистрировали из-

мерения с борта ИСЗ “CORONAS-I” [Bashkirev et al., 1999]. Были измерены [Petrov et al., 2008] и смоделированы [Petrov et al., 2009] спектры высыпающихся протонов с энергиями до 10 МэВ вблизи геомагнитного экватора ($L < 1.15$) на низких (<1000 км) орбитах.

Сильная магнитная буря ноября 2003 г. привела к почти полному высыпанию протонов с энергиями 27–45 МэВ из внутреннего радиационного пояса [Selesnik et al., 2013]: пояс практически опустел. Кроме сильных магнитных бурь в качестве возможной причины событий наблюдаемых высыпаний протонов из внутреннего радиационного пояса обсуждалось [Shao et al., 2009] и выходящее в космос излучение наземных радиопередатчиков.

По данным наблюдений с борта ИСЗ “Метеор-М № 2” выявлено 25 аномальных возрастных потоков электронов [Гинзбург и др., 2023]. 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. 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.

Цель настоящего сообщения – поиск индуцированных высыпаний протонов (20–45 МэВ) из внутреннего радиационного пояса во время вышеназванных 25 электронных событий и возможной взаимосвязи этих протонных и электронных явлений.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ПРОТОННЫХ ВЫСЫПАНИЙ

Метеорологический спутник РФ “Метеор-М № 2” запущен 8.07.2014 г. Орбита – солнечно-синхронная, высота в восходящем узле $h = 832$ км, наклонение $i \sim 98.8^\circ$, период обращения $T = 101.3$ мин. Ориентация спутника – трехосная, ось X – по вектору скорости, ось Z – от центра Земли к спутнику, в сторону открытого космоса.

Регистрирующая потоки заряженных частиц аппаратура спутника включала в себя приборы ГАЛС (разработан в ИПГ) и СКЛ (разработан в НИИЯФ МГУ). Прибор ГАЛС имел в своем составе счетчик Черенкова (канал СЧ, угол регистрации 4л) и два газоразрядных счетчика Гейгера (каналы СГ1 и СГ2, углы регистрации 2л). Прибор СКЛ имел в своем составе две телескопические сборки ДАС1. Каждая сборка состояла из полупроводникового (кремниевое) детектора и расположенного за ним на одной продольной оси сцинтилляционного детектора (CsI). В табл. 1

Таблица 1. Энергетические интервалы каналов приборов ГАЛС и СКЛ

Прибор	Канал	Диапазон энергий, МэВ	
		протоны	электроны
ГАЛС			
	СЧ	>600	>8
	СГ1	>15	>0.8
	СГ2	>25	>2.1
СКЛ, ДАС1		протоны	
	Д3	10–160	
	Д4	20–45	

представлены расчетные энергетические характеристики протонных каналов Д3 и Д4, логика которых строилась на одновременных показаниях полупроводникового и сцинтилляционного детекторов; отделение сигналов протонов от сигналов электронов в каналах Д3 и Д4 осуществлялось на основе совпадений и антисовпадений электрических импульсов с обоих детекторов с величиной, пропорциональной выделяемой в них энергии пролетающей частицей. Угловые размеры поля регистрации ДАС – 30° .

Сборки установлены в двух взаимно перпендикулярных направлениях – по оси X и по оси Z . В этой же табл. 1 представлены и энергетические характеристики каналов прибора ГАЛС. Частота опроса всех каналов – 1 с, время накопления – 1 с. В дальнейшем для улучшения статистики (особенно статистики малых потоков) в работе использовались накопленные за 6 с показания. В случае маленьких потоков они использовались непосредственно в виде количества зарегистрированных за 6 с частиц. В случае достаточно больших потоков использовались значения, выраженные в единицах интенсивностей.

В Океании траектория ИСЗ “Метеор-М №2” пролегает почти в направлении геомагнитного поля. Поэтому в качестве наиболее подходящего для исследования индуцированных высыпаний протонов в наблюдавшихся 25 электронных событиях вблизи экватора мы выбрали телескоп ДАС1, установленный по оси X (по вектору скорости). Как и любой сцинтиллятор, CsI чувствителен не только к протонам, но и к электронам. Поток электронов с энергиями более 10 МэВ во внутреннем радиационном поясе очень невелик, а с энергиями более 20 МэВ – исчезающе мал. Поэтому в канале Д4, чувствительном к энергиям 20–45 МэВ, регистрируются только протоны. Канал же Д3 воспринимает, вообще говоря, и электроны с энергией более 10 МэВ.

Для исследования протонных высыпаний мы использовали канал Д4, собрав в одну выборку показания этого канала, зарегистрированные во всех 25 рассматриваемых событиях; общий объем выборки составляет 2578 точек, каждая из которых соответствует количеству протонов, зарегистрированных в канале Д4 в течение 6 с.

На рис. 1 приведена относительная частота встречаемости, построенная по этой выборке. Видно, что почти 90% времени датчик “молчал” – протоны в канале не регистрировались, что связано как с местом наблюдения событий (на противоположной от Южно-Атлантической аномалии стороне Земли, где магнитное поле повышено), так и со спокойными геомагнитными

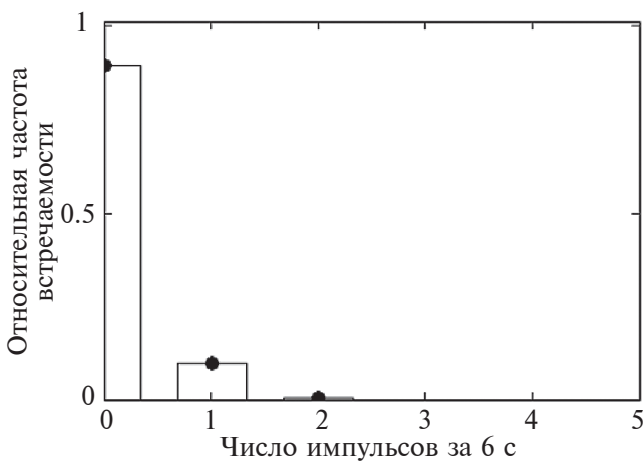


Рис. 1. Относительная частота встречаемости протонов в канале Д4, зарегистрированных в 25 аномальных событиях.

условиями, когда были зафиксированы все события. Форма относительной частоты встречаемости позволяет предположить экспоненциальное распределение скоростей счета, а максимальная зарегистрированная скорость счета (2 протона / 6 с) — оценить параметр экспоненциального распределения λ из условия, что вероятность того, что скорость счета не превысит этого максимума, составляет не менее 0.99995; это дает $\lambda \approx 5$. При экспоненциальном распределении вероятность появления следующего события не возрастает и не убывает с течением времени, отсчитываемого с момента регистрации предыдущего события. Это оправдывает использование такого распределения при описании случайного появления протонов на орбите ИСЗ “Метеор-М № 2” как при распаде нейтронов альbedo, так и в результате редких протонных кулоновских столкновений во внутреннем радиационном поясе.

Мы провели проверку нашей статистической выборки на наличие выбросов с использованием одностороннего порога, предложенного Dovoedo [2011] для экспоненциального распределения в виде: $UF = Q_{50} + K(n)(Q_{75} - Q_{50})$, где UF (upper fence) — порог, $Q_{50} = \ln 2 / \lambda$ — второй квантиль (медиана), $Q_{75} = \ln 4 / \lambda = 2Q_{50}$ — третий квантиль, $K(n)$ — коэффициент, зависящий от объема выборки. Следуя Dovoedo [2011], для нашей выборки мы приняли $K(2578) = 13.212$, так что $UF = \ln 2 / 5 + 13.212 (2 \ln 2 / 5 - \ln 2 / 5) = (1 + 13.212) \ln 2 / 5 = 14.212 \times 0.13869 = 1.97$, и каждое превышение этого порога в данных наблюдений мы считали выбросом. Значения коэффициентов $K(n)$ затабулированы Dovoedo [2011] путем проведения численных экспериментов с заданным в аналитическом виде (с участием,

в том числе, неполной бета-функции) выражением для вероятности того, что одно (или несколько) значений из выборки экспоненциального распределения неверно классифицируются как выбросы.

В табл. 2 собраны 11 из 25 событий, рассмотренных в работе [Гинзбург и др., 2023], в каждом из которых наблюдался, по крайней мере, один выброс, т.е. когда в канале Д4 в течение 6 с регистрировалось 2 или более протонов.

Оказалось, что в 11 событиях, где отмечены выбросы, протоны в канале Д4 регистрируются гораздо чаще, чем в событиях, где выбросы отмечены не были. На рис. 2 в качестве примеров приведены показания канала Д4 в событии 15.08.2016 г. — одном из 11 событий (левая половина рис. 2), где наблюдались выбросы, и (для сравнения) показания канала Д4 в одном (22.11.2019 г.) из остальных 14 событий (правая половина рис. 2), где выбросы не наблюдались. Показания черенковского счетчика приняты признаком событий.

Видно, что на левом из рис. 2 в канале Д4 наблюдалось существенно больше импульсов, в том числе естественно, и импульсы, классифицированные как выбросы из экспоненциального распределения. Это может свидетельствовать в пользу того, что помимо распада нейтронов альbedo и кулоновских столкновений протонов во вну-

Таблица 2. События, в каждом из которых наблюдался, по крайней мере, один выброс в показаниях канала Д4

Дата события	Число выбросов	$L_{\text{начало}}$	$L_{\text{конец}}$
13.08.2015	1	1.14	1.14
11.06.2016	1	1.15	1.98
15.08.2016	2	1.42	1.1
30.09.2016	1	1.19	2.02
07.09.2017	2	1.83	1.18
27.12.2019	2	2.94	1.27
11.02.2020	1	1.09	1.25
02.03.2020	1	1.14	1.1
18.01.2021	1	1.22	1.09
24.05.2021	1	1.08	1.22
18.06.2021	2	1.14	1.17

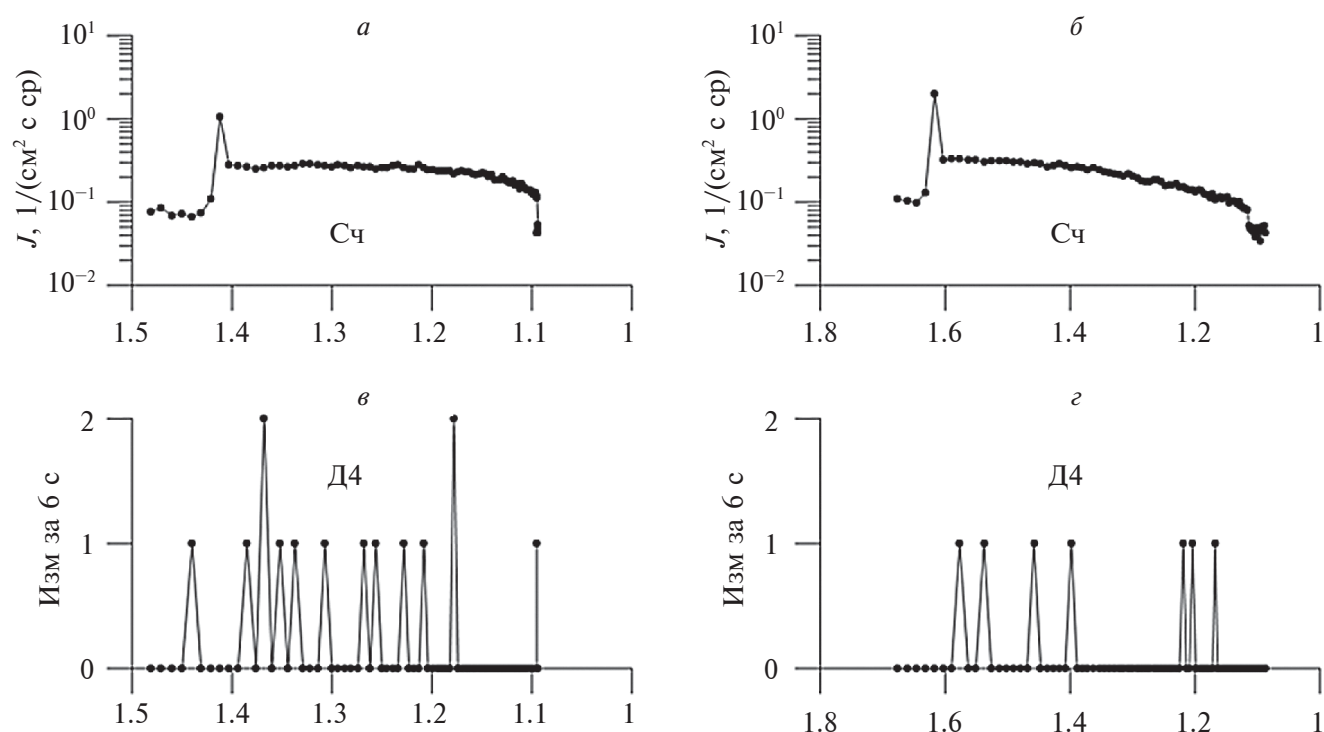


Рис. 2. Примеры событий, когда в показаниях канала Д4 наблюдались выбросы протонов (15.08.2016 г., 20:59:27–21:07:27 UT) (графики (а) и (в)) и когда выбросы не наблюдались (22.11.2019 г., 20:59:45–21:07:03 UT) (графики (б) и (г)). По оси абсцисс на всех графиках отложено значение параметра Мак-Илвейна (L) вдоль траектории ИСЗ “Метеор-М № 2”, по осям ординат на верхних графиках интенсивности потоков, на нижних – число протонов, зарегистрированное в канале Д4 за 6 с. Графики (а) и (б) – это показания черенковского счетчика, принятые в качестве признака события.

треннем поясе, уже учтенных в рамках экспоненциального распределения, более частому появлению протонов на орбите ИСЗ “Метеор-М № 2” в событиях, где отмечены выбросы, способствовало еще что-то.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Протоны с энергиями (20–45) МэВ – нерелятивистские. В Океании, где были зарегистрированы события, напряженность магнитного поля на орбите ИСЗ “Метеор-М № 2” варьируется от 0.25 до 0.29 Гс, что соответствует вариации протонной циклотронной частоты от 381.2 до 442.1 Гц.

Если считать причиной выбросов в канале Д4 циклотронный резонанс протонов, пребывающих вблизи зеркальной точки отражения, с электромагнитными волнами, излучаемыми на частотах ~ 400 Гц, и принять во внимание, что в утренние часы местного времени (~ 8 утра), когда были зарегистрированы все 11 событий, прохождение во внутреннем радиационном поясе сигналов наземных передатчиков с частотами ~ 400 Гц блокируется ионосферой [Meredith et al., 2019], то сле-

дует заключить, что единственный тип наземного и/или судового передатчика, способный местным утром спровоцировать выбросы протонов – это нагревный стэнд, работающий на несущей частоте 5–7 МГц (близкой к критической частоте слоя $F2$ в это время), модулируемой, в частности, частотой ~ 400 Гц. При этом источником радиоволн с частотой ~ 400 Гц во внутреннем радиационном поясе является диамагнитный ток, развивающийся в слое $F2$ ионосферы по границам зоны нагрева, сила которого осциллирует на частоте модуляции ~ 400 Гц.

При широком спектре модуляции осциллирующий ток, возникающий по границам зоны нагрева в слое $F2$ ионосферы, может порождать во внутреннем радиационном поясе волны разных частот. Они способны за счет циклотронного резонанса спровоцировать там не только протонные высыпания, но иpitch-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 точка-

ми отражения вдоль геомагнитной силовой линии составляет тысячи километров, что позволяет геометрически ограничиться приближением ведущего центра. Наименьшая энергия регистрируемых в событиях электронов ~ 100 кэВ предполагает релятивистское рассмотрение. Поскольку частота волны меньше электронной циклотронной частоты (~ 1 МГц), то в резонанс попадают электроны пояса, которые при баунс-колебаниях приближаются к ионосферной области нагрева. В этом случае условие циклотронного резонанса записывается в виде:

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

Здесь e – элементарный электрический заряд; m – масса покоя электрона; B – величина геомагнитного поля в точке взаимодействия волны и электрона; α – угол между направлением распространения волны и направлением движения ведущего центра электрона; Ω – частота волны; $\beta = v/c$, v – скорость электрона; c – скорость света. В левой части уравнения (1) записана циклотронная частота электрона (с учетом релятивистского увеличения его массы), а в правой части – частота электромагнитной волны, сдвинутая в соответствии с релятивистским эффектом Доплера (с учетом того, что электрон движется навстречу волне).

Переписывая (1) в виде:

$$\beta^2 + \frac{2\pi m\Omega}{eB}\beta\cos\alpha - 1 + \frac{2\pi m\Omega}{eB} = 0,$$

$$\beta_{1,2} = -\frac{\pi m\Omega}{eB}\cos\alpha \pm \left[\left(\frac{\pi m\Omega}{eB}\cos\alpha \right)^2 + 1 - \frac{2\pi m\Omega}{eB} \right]^{1/2},$$

и учитывая, что $\left(\frac{2\pi m\Omega}{eB}\right) \ll 1$, $0 < \beta < 1$, получаем:

$$\beta = 1 - \frac{\pi m\Omega}{eB}\cos\alpha,$$

$$\Omega = \frac{eB}{\pi m\cos\alpha}(1-\beta).$$

Отсюда следует, что для попадания в циклотронный резонанс электронов с энергией 8 МэВ и выше (черенковский счетчик СЧ) частота модуляции должна составлять ~ 3 кГц и ниже, для электронов с энергией 2.1 МэВ и выше (гейгеровский счетчик СГ2) ~ 30 кГц и ниже, и для электронов с энергией 0.8 МэВ и выше (гейгеровский счетчик СГ1) ~ 125 кГц и ниже. Это значит, что, помимо циклотронного резонанса электронов на субгармониках несущей частоты (5–7 МГц) [Гин-

збург и др., 2023], предполагаемого во всех 25 событиях, в 11 из 25 событий возможен также циклотронный резонанс на волнах, которые генерируются и на частотах модуляции. Если в каких-либо (из 11 выявленных) событиях несущая частота модулирована помимо ~ 400 Гц и килогерцовыми частотами, то задействуется дополнительный к резонансу на субгармониках механизм стимулирования электронных высыпаний. Следовательно, можно ожидать, что и среднее по этим 11 событиям значение потока высыпавшихся электронов окажется больше среднего по оставшимся 14 событиям значения потока таких электронов. Следует заметить, что в число этих 14 событий вошли 3 события, во время которых протонный канал Д4 отключался. Это события 25.03. 2019 г., 31.03. 2019 г. и 5.04. 2019 г. Мы подсчитали средние значения потоков, зарегистрированных черенковским счетчиком (СЧ) и двумя гейгеровскими счетчиками (СГ1, СГ2), отдельно по 11 событиям, в которых были отмечены выбросы, и по оставшимся 11 событиям (14–3), в которых выбросы отмечены не были. Соответствующие стандартные отклонения мы также подсчитали. Результаты приведены в табл. 3.

Из табл. 3 в каждом из трех каналов ГАЛС просматривается тенденция к повышению среднего по 11 событиям, в которых наблюдались выбросы, потока по сравнению со средним потоком по 11 событиям, в которых выбросы не наблюдались. Эта тенденция может указывать на присутствие среди модулирующих частот помимо сотен герц также единиц и десятков килогерц в том или ином из 11 выявленных событий, в которых наблюдались выбросы. Из табл. 3 видно также, что стандартные отклонения для двух из трех каналов ГАЛС (СГ2 и СЧ) оказались меньше средних значений, а выяснение причины больших стандартных отклонений по каналу СГ1 показало, что это – следствие колоколообразной формы профиля его показаний во время событий в отличие от почти прямоугольных профилей показаний СЧ и СГ2 (см. рис. 1 [Гинзбург и др., 2023]).

Местоположение известных наземных нагревных стенов [Streltsov et al., 2018] исключает их использование в Океании, где ИСЗ “Метеор-М № 2” зарегистрировал 25 аномальных событий высыпаний. В литературе [Papadopoulos, 2015; Esser et al., 2017, 2018; Eliasson and Papadopoulos, 2017, 2018] сообщалось о целесообразности создания мобильного нагревного стенда морского базирования, в том числе, для проведения исследований в районе геомагнитного экватора. Такой стенд мог бы нагревать слой F_2 ионосферы. Диамагнитный ток на границах зоны нагрева спосо-

Таблица 3. Потоки в каналах прибора ГАЛС

Канал	Средний по 11 событиям поток (1/см ² с стер) (выбросы наблюдались)	Средний по 11 событиям поток (1/см ² с стер) (выбросы не наблюдались)
СГ1	53.58 ± 99.24	14.20 ± 33.25
СГ2	2.77 ± 1.78	2.06 ± 0.82
СЧ	0.26 ± 0.086	0.23 ± 0.07

бен (посредством генерируемого этим осциллирующим током магнитного звука) индуцировать вторичные (осциллирующие на той же частоте) токи в области E [Papadopoulos et al., 2011a, b; Eliasson et al., 2012, 2018; Sharma et al., 2016; Vartanyan et al., 2016; Eliasson and Papadopoulos, 2017]. При работе в районе геомагнитного экватора вторичные осциллирующие токи в E -области индуцируются непосредственно под зоной нагрева слоя $F2$ [Papadopoulos et al., 2011a; Eliasson et al., 2012; Wang et al., 2016; Eliasson and Papadopoulos, 2016]. Вторичные токи запитывают волновод Земля–ионосфера электромагнитными волнами на частоте модуляции, а также генерируют альвеновские волны той же частоты, которые выходят во внутренний радиационный пояс [Shao et al., 2009; Papadopoulos et al., 2011a, b; Eliasson et al., 2012; Wang et al., 2016; Gekelman et al., 2019]. Циклотронный резонанс с альвеновскими волнами на частотах десятки герц, возникающий при движении протонов внутреннего радиационного пояса вдоль геомагнитного поля в направлении зоны нагрева, приведет к их питч-угловой диффузии в конус потерь [Shao et al., 2009]. Возможно, этим резонансом объясняется колоколообразная форма профиля показаний канала СГ1, воспринимающего не только электроны с энергией более 0.8 МэВ, но и протоны с энергией более 15 МэВ (табл. 1), которых во внутреннем поясе примерно на порядок больше, чем протонов с энергией более 25 МэВ, регистрируемых в канале СГ2. Высыпание при баунс-колебаниях протонов может быть спровоцировано плавучим нагревным стендом, если среди модулирующих присутствуют и частоты в десятки герц.

Инженерные проработки макетов специализированных антенной системы [Esser et al., 2017, 2018] и электрической цепи отбора мощности от источника энергии к антенной системе [Narayan, 2020] демонстрируют, что мобильный нагревный стенд вполне возможно разместить на трех стальных морских баржах размером 120×32.2 м каждая. В крайнем случае, даже двух таких барж могло бы

хватить. В этом последнем варианте площадь зоны нагрева стендом в ионосфере оценивается величиной ~2500 км² [Esser et al., 2018].

Осциллирующий диамагнитный ток, протекающий по границам зоны нагрева в слое $F2$, генерирует электромагнитные волны на частотах модуляции, а постоянная составляющая этого диамагнитного тока изменяет магнитное поле околоземного космического пространства во время нагрева ионосферы. Мы смоделировали основные черты такого изменения суперпозицией поля центрального земного диполя и поля соленоида, расположенного на геомагнитном экваторе на высоте 300 км в слое $F2$ и ориентированного вдоль дипольной силовой линии (области, где наблюдались события, по-видимому, имеют вытянутую вдоль геомагнитных силовых линий форму [Гинзбург и др., 2023]). Такой (“вакуумный”) подход уже использовали ранее [Shabansky, 1965] (при моделировании магнитного поля на дневной стороне магнитосферы суперпозицией двух диполей) и [Triskova and Veselovsky, 1992] (при моделировании магнитного поля внешней гелиосферы суперпозицией диполя и постоянного однородного поля). В нашем случае суперпозиция оправдывается тем, что магнитное поле во внутреннем радиационном поясе в спокойных геомагнитных условиях практически потенциально [Тверской, 2004]. Поле вне соленоида мы рассчитывали, следуя Callaghan and Maslen [1960]. Диаметр соленоида мы приняли ~10 км [Streletsov et al., 2018], так что длина соленоида ~250 км определилась, исходя из оценки площади зоны нагрева в ионосфере величиной ~2500 км² [Esser et al., 2018]. Плотность поверхностного диамагнитного тока соленоида мы оценивали из условия баланса полного (теплового плюс магнитного) давления на границе раздела нагретой и не нагретой (фоновой) ионосферной плазмы:

$$\begin{aligned}
 n_{i\phi} k T_{i\phi} + n_{e\phi} k T_{e\phi} + \frac{B_{\phi}^2}{8\pi} = \\
 = n_{in} k T_{in} + n_{en} k T_{en} + \frac{B_n^2}{8\pi}.
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

Здесь k — постоянная Больцмана; $(n_{i\phi}, n_{e\phi}, T_{i\phi}, T_{e\phi}, B_{\phi})$ — ионная и электронная концентрации, ионная и электронная температуры, напряженность магнитного поля на границе раздела со стороны фоновой плазмы; $(n_{in}, n_{en}, T_{in}, T_{en}, B_n)$ — ионная и электронная концентрации, ионная и электронная температуры, напряженность магнитного поля на границе раздела со стороны нагретой плазмы. Считаем ионосферную плазму квазинейтральной; для оценок примем, что при нагреве электронная концентрация увеличивается в среднем на 50%, электронная температура — на ~30%, а ионная температура практически не изменяется [Streltsov et al., 2018].

$$\begin{aligned} n_{i\phi} &= n_{e\phi}; n_{in} = n_{en}; n_{en} = n_{e\phi} + \frac{1}{2} n_{e\phi}; \\ T_{en} &= T_{e\phi} + \frac{1}{3} T_{e\phi}; T_{in} = T_{i\phi}. \end{aligned} \quad (3)$$

Из соотношений (2) и (3) с учетом $B_{\phi} + B_n \approx 2B_{\phi}$ получаем

$$B_{\phi} - B_n = \frac{4\pi}{B_{\phi}} n_{e\phi} k \left(\frac{1}{2} T_{i\phi} + T_{e\phi} \right).$$

Тогда плотность поверхностного тока на границе раздела нагретой и не нагретой областей (i):

$$i = \frac{c}{4\pi} (B_{\phi} - B_n) = \frac{c}{B_{\phi}} n_{e\phi} k \left(\frac{1}{2} T_{i\phi} + T_{e\phi} \right). \quad (4)$$

Критической частоте слоя $F2$ (5–7) МГц в Океании в утренние часы местного времени (~8 утра) соответствует $n_{e\phi} = 4.5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ при $foF2 = 6 \text{ МГц}$. Принимая $T_{e\phi} = 2500 \text{ К}$, $T_{i\phi} = 1000 \text{ К}$, $B_{\phi} = 0.25 \text{ Гс}$, из (4) находим $i \approx 0.075 \text{ А/м}^2$. Тогда полный ток на единицу длины соленоида в 1 метр составляет $2\pi 750 \text{ А/м}$. На рис. 3 приведены результаты расчета зависимости магнитного поля от магнитной широты для суперпозиции диполя и соленоида (сплошная линия) и диполя (пунктирная линия) для $L = 1.1$. Видно, что наличие соленоида (моделирующего магнитный эффект от плавучего нагревного стенда) изменяет магнитное поле на малых L . Поле повышается в пределах $\sim 3^\circ$ магнитной широты от экватора — места дислокации стенда (в рассматриваемом модельном случае стенд помещался на магнитном экваторе), а далее оно оказывается меньше дипольного вплоть до широты $\sim 10^\circ$.

При регистрации событий речь идет о появлении электронов в точке силовой линии, удаленной от вершины этой линии. В отсутствие электромагнитной волны частицы с условно маленькими баунс-амплитудами группируются вблизи вершины силовой линии. Воздействие волны на эти первоначально удаленные от ИСЗ “Метеор-М № 2”

частицы приводит к изотропизации их питч-углового распределения, или, что то же самое, к увеличению баунс-амплитуды, в том числе и такому, что частицы могут опускаться до высоты орбиты ИСЗ “Метеор-М № 2” и ниже. Часть из них способна достичь атмосферы — это высыпающиеся частицы. Те же, которые не попадут в конус потерь и не станут высыпающимися, окажутся квази-захваченными, регистрируемыми на высоте $\sim 800 \text{ км}$ в зоне работы передатчика. То есть датчики ГАЛС регистрируют и, вообще говоря, не различают две популяции электронов. Во-первых, это квази-захваченные электроны (с такими питч-углами, что их зеркальные точки располагаются ниже орбиты ИСЗ “Метеор-М № 2”), которые после отражения возвращаются назад в радиационный пояс. Во-вторых, это высыпающиеся электроны с питч-углами в конусе потерь, которые позволяют им высыпаться из радиационного пояса в атмосферу. Осциллирующий диамагнитный ток, протекающий по границам зоны нагрева в слое $F2$, приводит к высыпаниям релятивистских электронов за счет циклотронного резонанса на частотах модуляции. Это работает на увеличение числа регистрируемых высыпающихся электронов дополнительно к тем, что высыпаются при циклотронном резонансе на субгармониках несущей частоты (5–7 МГц). С другой стороны, постоянная составляющая ионосферного диамагнитного тока изменяет магнитное поле на малых L в районе дислокации стенда. Изменения магнитного поля поднимают или опускают высоту зеркальных точек по отношению к орбите ИСЗ “Метеор-М № 2”. Изменения высоты зеркальных точек уменьшают или увеличивают число регистрируемых датчиками ГАЛС квази-захваченных электронов. Влияние изменения

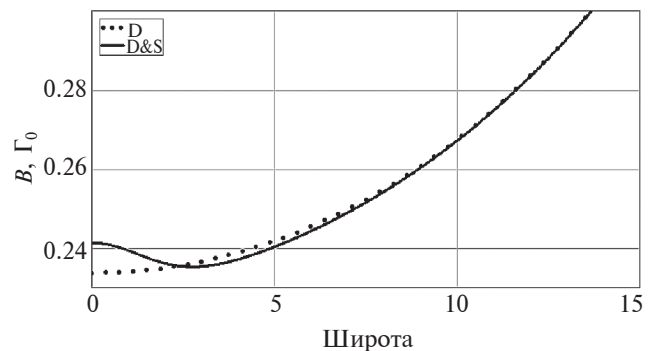


Рис. 3. Результаты модельного расчета зависимости магнитного поля от магнитной широты для суперпозиции диполя и соленоида (сплошная линия) и диполя (пунктирная линия). В рассматриваемом модельном случае стенд помещался на магнитном экваторе.

магнитного поля на показания датчиков ГАЛС иллюстрирует событие 9.07.2017 г. (рис. 4).

Видно, что сразу после типичного резкого (длительностью несколько десятков секунд) всплеска показаний всех датчиков ГАЛС в начале события, связанного с увеличением числа регистрируемых выпадающих электронов, наблюдается провал с последующим постепенным возрастанием скорости счета датчиков. Провал можно интерпретировать как дефицит числа регистрируемых квази-захваченных электронов, связанный с локальным повышением (по сравнению с диполем) магнитного поля вблизи расположения стенда за счет вклада постоянной составляющей осциллирующего диамагнитного тока, протекающего по границам зоны нагрева. Дальнейшее увеличение скорости счета всех датчиков, в свою очередь, может указывать на понижение общего магнитного поля с удалением от стенда (см. рис. 3) и, соответственно, увеличение числа регистрируемых квази-захваченных электронов. Все это происходит на фоне повышенного числа выпадающих электронов в событии.

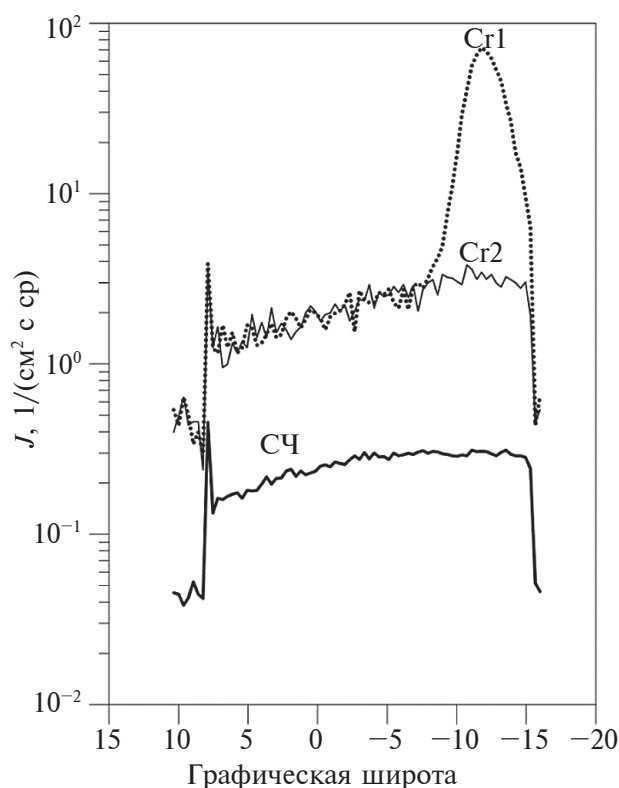


Рис. 4. Показания датчиков ГАЛС для события 9.07.2017 г. По оси абсцисс — географическая широта в градусах, по оси ординат — интенсивности. Магнитный экватор для рассматриваемого события расположен на $\sim 6^\circ$ N.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Примерно половина (11) из 25 аномальных выпадений электронов, зарегистрированных с борта ИСЗ “Метеор-М № 2” 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, сопровождалась индуцированными выпадениями протонов с энергиями 20–45 МэВ. Если причина явления — резонанс на циклотронной частоте протонов (~ 400 Гц), то (поскольку в утренние часы местного времени прохождение в космос наземных сигналов с частотами ~ 400 Гц блокируется ионосферой) единственный тип наземного и/или судового передатчика, способный местным утром обеспечить присутствие низкочастотного электромагнитного излучения во внутреннем радиационном поясе — это нагревный стенд. Источником радиоволн с частотой ~ 400 Гц во внутреннем радиационном поясе является диамагнитный ток, развивающийся в слое $F2$ ионосферы по границам зоны нагрева, сила которого осциллирует на частоте модуляции ~ 400 Гц. В циклотронный резонанс со стимулированным низкочастотным излучением могут попасть и релятивистские электроны внутреннего радиационного пояса при широком спектре частот модуляции. В частности, для попадания в циклотронный резонанс электронов с энергией 8 МэВ и выше (черенковский счетчик СЧ) частота модуляции должна составлять ~ 3 кГц и ниже, для электронов с энергией 2.1 МэВ и выше (гейгеровский счетчик СГ2) ~ 30 кГц и ниже, и для электронов с энергией 0.8 МэВ и выше (гейгеровский счетчик СГ1) ~ 125 кГц и ниже. Постоянная составляющая осциллирующего диамагнитного тока, протекающего по границам зоны нагрева в слое $F2$, может изменять магнитное поле на малых L во время нагрева ионосферы, что подтверждают модельные расчеты; это, в свою очередь, отразится на временных профилях показаний прибора ГАЛС.

В литературе [Papadopoulos, 2015; Eliasson and Papadopoulos, 2016] сообщалось о целесообразности создания мобильного нагревного стенда морского базирования, в том числе, для проведения исследований в районе геомагнитного экватора. Инженерные проработки макетов специализированных антенной системы [Esser et al., 2017, 2018] и электрической цепи отбора мощности от источника энергии к антенной системе [Narayan, 2020] демонстрируют, что мобильный нагревный стенд вполне возможно разместить на трех стальных морских баржах размером 120×32.2 м каждая.

Стало быть, аномальные электронные и протонные высыпания из внутреннего радиационного пояса, зарегистрированные с борта ИСЗ “Метеор-М №2” в 2014–2022 гг. в Океании в низких широтах в утренние часы местного времени в спокойных геомагнитных условиях, допускают интерпретацию, согласно которой они представляют собой побочные проявления ионосферных экспериментов с использованием плавучего наземного стенда.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гинзбург Е.А., Зинкина М.Д., Писанко Ю.В. Индуцированные высыпания электронов из внутреннего радиационного пояса, зарегистрированные в Океании // Геомагнетизм и аэронавтика. Т. 63. № 6. С. 751–763. 2023.
- Тверской Б.А. Основы теоретической космофизики // Избранные труды. М.: УРСС. С. 376. 2004. ISBN 5-354-00647-3.
- Bashkurov V.F., Denisov Yu.I., Gotselyuk Yu.V., Kuznetsov S.N., Myagkova I.N., Sinyakov A.V. Trapped and quasi-trapped radiation observed by CORONAS-I satellite // Radiation Measurements. V. 30. P. 537–546. 1999.
- Biryakov A.S., Grigoryan O.R., Kuznetsov S.N., Ryaboshapka A.V., Ryabukha S.B. Low-energy charged particles at near equatorial latitudes according to MIR orbital station data // Adv. Space Res. V.10. P.10189. 1996.
- Callaghan E.E., Maslen S.H. The magnetic field of a finite solenoid // NASA Technical Note D-465, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, National Aeronautics and Space Administration, Washington, October 1960.
- Dovoedo Y.H. Contributions to outlet detection methods: some theory and applications // A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Department of Information Systems, Statistics, and Management Science in the Graduate School of the University of Alabama, Tuscaloosa, Alabama. P. 180. 2011. <https://ir-api.ua.edu/api/core/bitstreams/48a91f94-9ee7-4918-8c3c-d1757737ea85/content>
- Eliasson B., Chang C.-L., Papadopoulos K. Generation of ELF and ULF electromagnetic waves by modulated heating of the ionospheric F2 region // J. Geophys. Res. V. 117. P. 10320. 2012. <https://doi.org/10.1029/2012JA017935>
- Eliasson B., Papadopoulos K. HF wave propagation and induced ionospheric turbulence in the magnetic equatorial region // J. Geophys. Res. Space. V.121. P. 2727–2742. 2016. <https://doi.org/10.1002/2015JA022323>
- Eliasson B., Papadopoulos K. Pitch angle scattering of relativistic electrons near electromagnetic ion cyclotron resonances in diverging magnetic fields // Plasma Phys. Control. Fusion. V. 59. P. 104003. 2017. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa8100>
- Eliasson B., Milikh G.M., Liu T.C., Shao X., Papadopoulos K. Simulations of the generation of energetic electrons and the formation of descending artificial plasma layers during HF heating at Arecibo // J. Geophys. Res. Space. V. 123. P. 10301–10309. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018JA026073>
- Esser B., Beeson S.R., Dickens J.C., Mankowski J.J., Antonsen T.M., Neuber A.A. The path to a transportable ionospheric heater – tuning methods // IEEE Trans Plasma Sci. V. 45. P. 1051–1057. 2017. <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2699925>
- Esser B., Mauch D., Dickens J., Mankowski J., Neuber A. Tunable, electrically small, inductively coupled antenna for transportable ionospheric heating // Radio Sci. V. 53. P. 496–508. 2018. <https://doi.org/10.1002/2017RS006484>
- Gekelman W., Pribyl P., Vincena S., Tang S.W., Papadopoulos K. Ferrite based antennae for launching Alfvén waves // Rev. Sci. Instrum. V. 90. P. 083505. 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5103171>
- 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. Geophys. Res. Space. V. 124. P. 5246–5259. 2019. <https://doi.org/10.1029/2019JA026715>
- Nagata K., Kohno T., Hasere N., Kikuchi J., Doke T. Electron (0.19–3.2 MeV) and proton (0.58–35 MeV) precipitations observed by OHZORA satellite at low latitude zones L = 1.6–1.8 // Planet. Space Sci. V. 36. P. 591. 1988.
- Narayan A.H. A highly efficient, megawatt class, constant impedance tunable power extraction circuit for mobile ionospheric heaters // Dissertation submitted to the Faculty (Electrical Engineering Department) of the Graduate School of the University of Maryland, College Park in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. P. 81. 2020. <https://doi.org/10.13016/vhln-r6io>
- Papadopoulos K., Chang C.-L., Labenski J., Wallace T. First demonstration of HF-driven ionospheric currents // Geophys. Res. Lett. V. 38. P. 20107. 2011. <https://doi.org/10.1029/2011GL049263>
- Papadopoulos K., Gumenov N.A., Shao X., Doxas I., Chang C.L. HF-driven currents in the polar ionosphere // Geophys. Res. Lett. V. 38. P. 12103. 2011. <https://doi.org/10.1029/2011GL047368>
- Papadopoulos K. Ionospheric modifications using mobile, high power HF transmitters based on TPM technology // Paper presented at 2015 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS), 24–28 May, Antalya, Turkey. 2015. <https://doi.org/10.1109/PLASMA.2015.7179496>
- Petrov A.N., Grigoryan O.R., Panasyuk M.I. Energy spectrum of proton flux near geomagnetic equator at low altitudes // Adv. Space Res. V. 41. P. 1269–1273. 2008.

- Petrov A.N., Grigoryan O.R., Kuznetsov N.V. Creation of model of quasi-trapped proton fluxes below Earth's radiation belt // *Adv. Space Res.* V. 43. P. 654–658. 2009.
- Selesnick R.S., Looper M.D., Mewaldt R.A. A theoretical model of the inner proton radiation belt // *Space Weather*. V. 5. S04003. 2007. <https://doi.org/10.1029/2006SW000275>
- Selesnick R.S., Hudson M.K., Kress B.T. Direct observation of the CRAND proton radiation belt source // *J. Geophys. Res.—Space*. V. 118. P. 7532–7537. 2013. <https://doi.org/10.1002/2013JA019338>
- Selesnick R.S., Baker D.N., Kanekal S.G., Hoxle V.C., Li X. Modeling the proton radiation belt with Van Allen probes relativistic electron-proton telescope data // *J. Geophys. Res.—Space*. V. 123. P. 685–697. 2018. <https://doi.org/10.1002/2017JA024661>
- Shabansky V.P. On the first phase of a magnetic storm // *Space Res.* V. 5. P. 125–147. 1965.
- Shao X., Papadopoulos K., Sharma A.S. Control of the energetic proton flux in the inner radiation belt by artificial means // *J. Geophys. Res.* V. 114. A07214. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009JA014066>
- Sharma A.S., Eliasson B., Shao X., Papadopoulos K. Generation of ELF waves during HF heating of the ionosphere at midlatitudes // *Radio Sci.* 51. P. 962–971. 2016. <https://doi.org/10.1002/2016RS005953>
- Streltsov A.V., Berthelier J.-J., Chernyshov A.A., Frolov V.L., Honary F., Kosch M.J., McCoy R.P., Mishin E.V., Rietveld M.T. Past, present and future of active radio frequency experiments in space // *Space Sci. Rev.* 214:118. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7>
- Triskova L., Veselovsky I.S. On the large-scale magnetic field structure in the outer heliosphere / *Solar Wind Seven*. Ed. E. Marsh, R. Schwenn. New York, London, Seoul, Tokio: Pergamon Press. P. 297–300. 1992.
- Vartanyan A., Milikh G.M., Eliasson B., Najmi A.C., Parrot M., Papadopoulos K. Generation of whistler waves by continuous HF heating of the upper ionosphere // *Radio Sci.* V. 51. P. 1188–1198. 2016. <https://doi.org/10.1002/2015RS005892>
- Wang Y., Gekelman W., Pribyl P., Van Compernelle B., Papadopoulos K. Generation of shear Alfvén waves by repetitive electron heating // *J. Geophys. Res.—Space*. V. 121. P. 567–577. 2016. <https://doi.org/10.1002/2015JA022078>

Induced Proton Precipitations from the Inner Radiation Belt Registered in Oceania

E. A. Ginzburg^{1,*}, M. D. Zinkina^{1,**}, Yu. V. Pisanko^{1,2,***}

¹*Fedorov Institute of Applied Geophysics, Roshydromet, Moscow, Russia*

²*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny (Moscow Region), Russia*

*e-mail: e_ginzburg@mail.ru

**e-mail: marinaantipina20@mail.ru

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

Detected were induced proton precipitations from the inner radiation belt went with almost a half (11) of 25 anomalous electron events registered onboard “Meteor-M №2” satellite in 2014–2022 in Oceania at low latitudes in the morning hours of local time under quiet geomagnetic conditions. It is surmised that such proton precipitations could be a manifestation of cyclotron resonance between protons and low frequency electromagnetic waves stimulated by a mobile ionospheric heater. Observed effects in anomalous electron events, which could be interpreted in the framework of a mobile ionospheric heater concept, are also discussed.

Keywords: the inner radiation belt, proton and electron precipitation, mobile ionospheric heater