

Высотный ход потоков суб-релятивистских электронов в области Южно-Атлантической аномалии по данным измерений на спутнике формата кубсат “СириусСат-1”

А. В. Богомолов⁺¹⁾, В. В. Богомолов^{+*}, А. Ф. Июдин⁺, В. В. Калегаев^{+*}, М. В. Коржик[°], В. И. Оседло⁺,
М. В. Подзолко⁺, В. В. Сазонов[×], С. И. Свертилов^{+*}

⁺Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, 119991 Москва, Россия

^{*}Физический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

[×]Факультет космических исследований, МГУ им. М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

[°]Белорусский государственный университет имени Ф. Скорины,
Научно-исследовательский институт ядерных проблем, 220030 Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 2 декабря 2023 г.

После переработки 23 декабря 2023 г.

Принята к публикации 27 декабря 2023 г.

Рассмотрены результаты измерений потоков электронов с энергиями > 0.3 МэВ на заключительных участках траектории полета спутника “СириусСат-1” в диапазоне высот от ~ 400 до 180 км в области Южно-Атлантической аномалии. Существующие модели распределений потоков электронов в околоземном пространстве, например, АЕ8 и АЕ9, в основном касаются захваченных частиц радиационных поясов на высотах более 400 км. Данные о потоках электронов суб-релятивистских энергий на относительно малых высотах менее 300 км практически отсутствуют. Благодаря тому, что спутник “СириусСат-1” продолжал функционировать вплоть до моментов сгорания в атмосфере, были проведены уникальные измерения высотного хода потоков суб-релятивистских электронов, в том числе в области Южно-Атлантической аномалии.

DOI: 10.31857/S1234567824040116, EDN: szmzge

1. Введение. На сегодняшний день о распределении потоков электронов в околоземном космическом пространстве (ОКП) накоплен обширный экспериментальный материал. На основе этих данных разработаны теоретические модели, описывающие распределение заряженных частиц в радиационных поясах Земли (РПЗ). В части электронов следует отметить модель АЕ9 [1], основанную на более новых экспериментальных данных, по сравнению с широко используемыми моделью АЕ8 [2] и моделью НИИЯФ МГУ [3], разработанными в 1970–1980-х гг. Модель АЕ9 основана на измерениях космических аппаратов (КА) серий LANL-GEO, GPS, POLAR, SAMPEX, НЕО и др., выполненных в 1990–2011 гг. Модель описывает пичч-угловое распределение и общие потоки электронов с энергиями 0.01–10 МэВ в координатах, связанных с интегральными инвариантами (I , Φ) движения захваченных частиц в магнитном поле.

Однако необходимо подчеркнуть, что большинство полученных на сегодняшний день эксперимен-

тальных данных и, соответственно, построенные на их основе модели относятся к высотам более 350–400 км. Этому есть вполне понятное объяснение, связанное с тем, что на малых высотах из-за наличия остаточной атмосферы спутники не могут долго существовать, а в случае схода с орбиты на заключительных этапах полета, научная аппаратура, как правило, уже не работает.

В то же время картина распределения потоков электронов на малых высотах имеет свои особенности и их изучение представляет самостоятельный интерес. Распределение потоков захваченных частиц на малых высотах определяется положением условной границы магнитных дрейфовых оболочек относительно верхних слоев атмосферы, поскольку именно взаимодействие с атомами и ионами остаточной атмосферы является основным фактором, определяющим время существования захваченных и квази-захваченных частиц на конечных траекториях. В свою очередь, конфигурация дрейфовых оболочек определяется магнитным полем Земли, которое может претерпевать существенные долговременные изменения, при которых меняется, как главный ди-

¹⁾e-mail: aabboog@srd.sinp.msu.ru

польный момент, так и гармоники более высокого порядка [4], которые определяют асимметрию поля на малых высотах. Поэтому, потоки частиц радиационных поясов на малых высотах, помимо вариаций, связанных с геомагнитной активностью, также испытывают долговременные изменения, связанные с вековыми изменениями магнитного поля Земли (см., например, [5]).

С учетом особенностей распределения заряженных частиц в геомагнитном поле большие потоки электронов суб-релятивистских энергий на малых высотах наблюдаются в районе Южно-Атлантической аномалии (ЮАА), т.е. фактически во внутреннем радиационном поясе. Настоящая работа посвящена результатам измерений потоков электронов с энергиями > 0.3 МэВ на заключительных участках траектории полета спутника “СириусСат-1” [6] в диапазоне высот от ~ 400 до 180 км в области ЮАА.

2. Описание эксперимента. Спутник “СириусСат-1” был запущен вместе с идентичным КА “СириусСат-2” с Международной космической станции (МКС) 15 августа 2018 г. и успешно проработал до 9 декабря 2020 г. Орбита спутника соответствовала орбите МКС, т.е. характеризовалась наклоном 51° и высотой, менявшейся от ~ 430 км в начале полета (август 2018 г.) до ~ 180 км в декабре 2020 г. [7].

В качестве полезной нагрузки (ПН) на спутниках “СириусСат” работал детектор космического излучения измеряющий потоки заряженных частиц (главным образом электронов) и гамма-квантов в диапазоне энергий 0.3–3.0 МэВ. Для идентификации частиц в ПН использовался трехслойный детектор (1.0 см CsI(Tl), 0.23 см CsI(Na), 0.2 см пластмассовый сцинтиллятор), геометрическая площадь регистрирующей поверхности каждого сцинтиллятора составляла 4 см^2 . Все три сцинтиллятора просматривались двумя фотоэлектронными умножителями (ФЭУ). Суммарная амплитуда сигналов на выходах ФЭУ пропорциональна энерговыделению в детекторе и измерялась с использованием специальных электронных схем (амплитудно-цифровых преобразователей). Для определения абсолютных значений энергии была проведена предполетная калибровка прибора с использованием стандартных радиоактивных источников. При этом разделение событий, зарегистрированных в разных сцинтилляторах, осуществлялось по их характерным временам высвечивания. Такое устройство детектора позволило осуществлять идентификацию типа регистрируемых частиц методом временного анализа. Временное разрешение де-

тектора составляло ~ 20 мкс. Энергетический диапазон определяется конфигурацией детекторного узла прибора – толщинами сцинтилляторов и защитного кожуха (0.1 см). Соответственно в пластмассовом сцинтилляторе преимущественно регистрировались электроны с энергией > 500 кэВ, а в неорганических сцинтилляторах – преимущественно гамма-кванты с энергиями от 300 кэВ до ~ 3 МэВ. С конечной вероятностью в пластмассовом сцинтилляторе могли также регистрироваться протоны с энергиями более 5 МэВ, значимые потоки таких частиц наблюдаются только в области ЮАА, но их величины на порядок величины меньше потоков суб-релятивистских электронов. Потоки частиц других типов на орбите спутника вообще пренебрежимо малы [8]. Более подробное описание детектора космических излучений на спутнике “СириусСат-1” дано в [6].

Важной особенностью этого эксперимента было то, что, кроме мониторингового режима, в котором за заданный интервал экспозиции (как правило, 1 с) фиксировалось число регистрируемых электронов (в основном пластмассовым сцинтиллятором) и гамма-квантов (в основном неорганическими сцинтилляторами), был также режим записи массивов событий (так называемый “по-событийный”). Под событием подразумевается факт регистрации гамма-кванта или заряженной частицы. В этом режиме записывалось точное время регистрации события и информация о количестве света, собранного в сцинтилляторах за 600 нс (“быстрый компонент”) и за 2 мкс (“медленный компонент”). Эта информация позволила в дальнейшем определить тип зарегистрированной частицы и ее энергию. Именно запись массивов позволила проводить анализ быстрых (суб-секундных) вариаций. Однако, низкая пропускная способность канала связи не позволяла проводить частые измерения в этом режиме. С помощью прибора проводились измерения, как медленных, так и быстрых изменений потоков электронов и гамма-квантов на орбите. За время эксперимента в “по-событийном” режиме было получено несколько массивов данных, относящихся к областям захваченной радиации, в том числе ЮАА, “зазора” и высыпаний из внутреннего пояса.

3. Особенности траектории спутнике “СириусСат-1” на заключительной стадии полета. Срок гарантированного существования КА “СириусСат-1” составлял 6 месяцев [9], баллистический срок существования – около 18 месяцев. Конструктивный баллистический коэффициент КА “СириусСат-1”, рассчитанный по его массово-габаритным характеристикам составляет 0.012–

0.029, что на порядок выше, чем баллистический коэффициент Международной космической станции [10], поэтому на скорость снижения КА существенное влияние оказывает плотность атмосферы Земли на высоте его полета. Рассматриваемый КА не был оборудован автономной системой навигации, данными по радиоконтролю орбиты коллектив авторов не располагал. Параметры движения КА брались из публичного сервиса space-track.org, предоставляющего данные американской системы контроля космического пространства NORAD в виде двухстрочных элементов (TLE). Данные именно NORAD традиционно используются для определения орбит КА такого класса, как “СириусСат-1”. Данный способ позволяет задать замкнутую эллиптическую орбиту, но не может задать незамкнутую траекторию схода КА с орбиты, поэтому для последнего участка полета КА траектория строилась при помощи математической модели, основанной на интегрировании системы уравнений движения КА, предложенной в [10].

При моделировании орбитального движения КА “СириусСат-1” учитывалась неоднородность гeопотенциала Земли в виде поля сферических гармоник 8×8 и силы атмосферного торможения в предположении, что молекулы атмосферного газа совершают с поверхностью КА абсолютно неупругий удар. Для определения плотности атмосферы использовалась ее динамическая модель [11], параметры геомагнитной и солнечной активностей брались с сайта celestrak.org.

Модель орбитального движения содержит 7 изменяемых параметров – начальный радиус-вектор и вектор скорости, а также баллистический коэффициент. По координатам, получаемым в рамках модели SGP4 [12], при помощи метода наименьших квадратов определялись параметры орбиты и баллистический коэффициент [10]. Точки орбиты брались в двухчасовом интервале с центром в момент времени заданного TLE с шагом в 10 с. Далее решение интегрировалось до момента, когда высота КА над референсным эллипсоидом не станет меньше 140 км. Ошибка определения орбиты считалась статистически.

При помощи указанного метода по последним трем TLE от 08-09 декабря 2020 г. были получены следующие оценки параметров орбитального движения КА:

- среднеквадратичное отклонение (СКО) радиус вектора = 2723.21 м;
- СКО вектора скорости = 3621.82 мм/с,
- баллистический коэффициент = 0.0126767.

Таблица 1. Расчетные значения высоты орбиты КА “СириусСат-1”

Дата	Время, UTC, ч:м:с	Высота орбиты, км
08.12.2020	19:43:09	194.702
08.12.2020	20:43:09	186.879
08.12.2020	21:43:09	211.665
08.12.2020	22:43:09	191.897
08.12.2020	23:43:09	182.733
09.12.2020	0:43:09	208.592
09.12.2020	1:43:09	188.374
09.12.2020	2:43:09	179.658
09.12.2020	3:43:09	202.132
09.12.2020	4:43:09	184.594
09.12.2020	5:43:09	177.816
09.12.2020	6:43:09	193.573
09.12.2020	7:43:09	181.398
09.12.2020	8:43:09	175.908
09.12.2020	9:43:09	182.578
09.12.2020	10:43:09	177.694
09.12.2020	11:43:09	171.645
09.12.2020	12:43:09	168.79
09.12.2020	13:43:09	172.217
09.12.2020	14:43:09	162.893
09.12.2020	15:43:09	150.794
09.12.2020	16:43:09	158.807
09.12.2020	17:43:09	138.412

Значения высоты орбиты КА “СириусСат-1” на завершающем этапе его функционирования представлены в табл. 1.

Последняя строчка в табл. 1 соответствует ожидаемому времени схода КА с орбиты – 17:43:09 UTC 9 декабря 2020 г.

Примечателен тот факт, что при определении параметров орбиты по набору TLE за интервал времени 01–05 ноября 2020 г., получены значения параметров орбитального движения КА:

- СКО радиус вектора = 4575.94 м;
 - СКО вектора скорости = 5055.071.82 мм/с;
 - баллистический коэффициент = 0.0124984;
- ожидаемое время схода КА с орбиты – 22:17:32.4393 UTC 9 декабря 2022 г., и соответствующая высота орбиты 135.939 км, что близко к значениям табл. 1. Следует отметить, что движение КА на таких низких орбитах тяжело прогнозируется из-за неопределенностей, связанных с состоянием атмосферы, поэтому требуется ежедневное уточнение. Соответственно, орбита на конечной стадии и время схода были предсказаны по данным за последние 2 дня до конца полета спутника. Сравнение с прогнозом, сделанным за месяц до окончания миссии, показывает, что используемый метод дает вполне приемлемую точность.

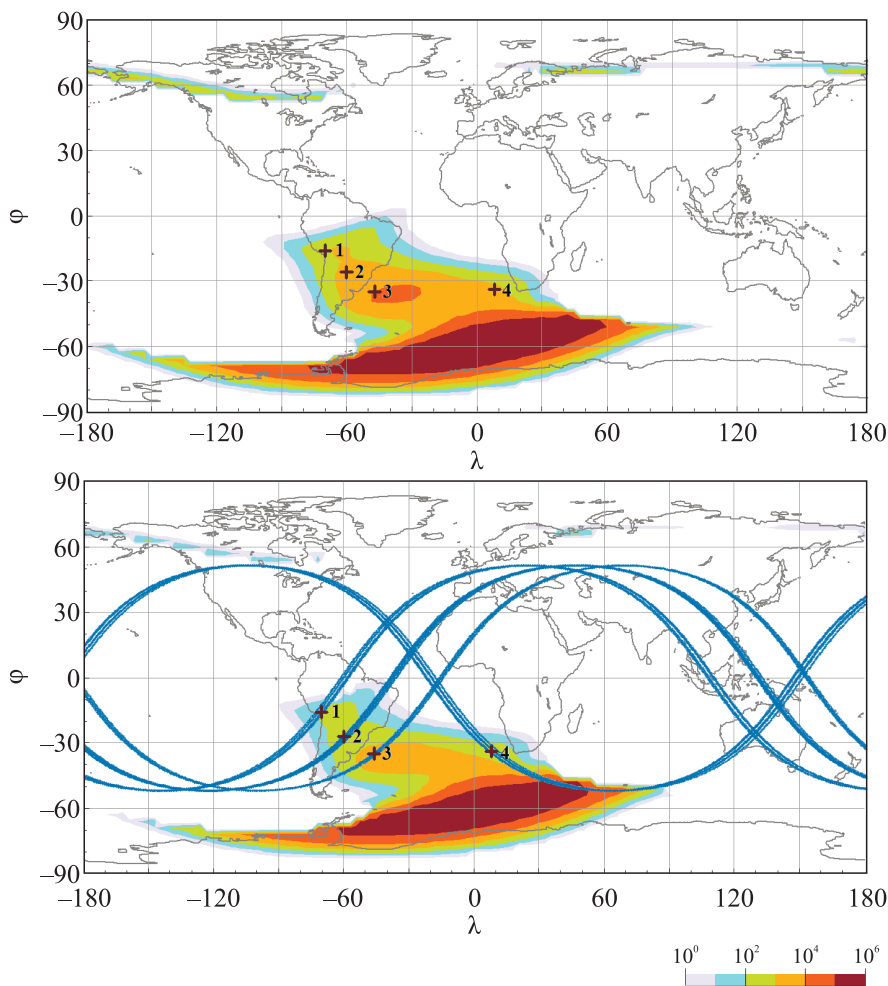


Рис. 1. (Цветной онлайн) Карты распределений потоков электронов с $E > 500$ кэВ на высотах 400 км (вверху) и 300 км (внизу). Цветовая шкала интенсивностей в $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ приведена внизу рисунка. Представленные распределения построены из теоретической модели АЕ9 с учетом поправки на вековую вариацию геомагнитного поля за 2020 г. На нижней карте также изображены линиями проекции траекторий орбиты спутника, проходящих через области, для которых строились высотные зависимости потоков электронов

Несмотря на достаточно большие значения СКО, полученные на основе аппроксимации данных TLE, которые, по всей видимости, являются следствием непригодности модели SGP4 для расчета незамкнутых орбит и больших расхождений модели атмосферы с реальностью на заданных высотах, полученные расчетные значения времени схода КА с орбиты, соответствуют реальности. Спутник “СириусСат-1” прекратил существование именно 09 декабря 2020 г.

4. Результаты измерений высотного хода потоков электронов в области ЮАА на спутнике “СириусСат-1”. На рисунке 1 представлены карты распределений потоков электронов с энергиями $E > 500$ кэВ на высотах 400 и 300 км, построенные по модели АЕ9 [1] для 2020 г. Это эмпирическая модель, полученная из усредненных данных измерений

потоков электронов в основном в первом десятилетии XXI в. на различных КА, указанных во Введении. Эта модель также учитывает ежегодные поправки на вековую вариацию магнитного поля Земли.

Для определения высотного хода электронов в области ЮАА были выбраны четыре географические области, (отмечены прямыми крестиками на рис. 1), для каждой из которых значения широты φ и долготы λ имели небольшой разброс значений (2° по φ и 4° по λ). Были отобраны витки, проходившие вблизи ЮАА через указанные области, когда спутник уже начал быстро терять высоту (8 и 9 декабря 2020 г.), но при этом измерялись значимые скорости счета. Также условие отбора подразумевало, что через отмеченные области проходили витки, когда спутник был на высоте более 400 км, и для них имелась ин-

формация о темпе счета суб-релятивистских электронов.

Для каждого прохождения спутником областей, отмеченных на рис. 1, измерялись средние за временной интервал пересечения области значения скорости счета электронов с энергией > 500 кэВ – J . Затем отдельно для каждой области были построены зависимости величины J от соответствующей высоты орбиты спутника, которые приведены на рис. 2 (высота орбиты также бралась средней по области для каждого пересечения).

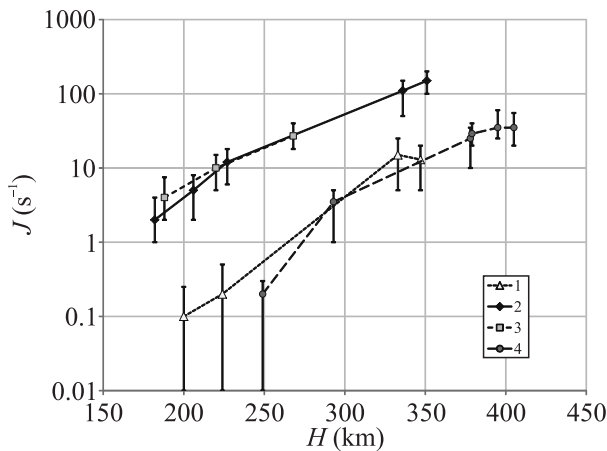


Рис. 2. Высотные зависимости скорости счета суб-релятивистских электронов в районе ЮАА. Номера зависимостей соответствуют обозначениям областей, отмеченных на рис. 1

Величины ошибок, отложенные на рис. 2, определялись эмпирическим путем, по минимальным и максимальным значениям скоростей счета, измерявшимся при прохождении исследуемой области. Этот разброс значений превышает чисто статистический и может быть вызван наличием неоднородностей с учетом вращения спутника.

На рисунке 3 изображены высотные зависимости скорости счета суб-релятивистских электронов отдельно для каждой из областей в районе ЮАА, отмеченных на рис. 1, совместно с зависимостями, предсказываемыми моделью распределения всенаправленных потоков захваченных электронов АЕ9 [1].

5. Обсуждение и выводы. Как было отмечено выше, экспериментальные зависимости скоростей счета суб-релятивистских электронов сравнивались с результатами теоретических моделей распределения электронов в ОКП. Для этого с использованием моделей АЕ9 были проведены расчеты ожидаемых потоков электронов с энергией более 500 кэВ в обла-

сти ЮАА для высот от 180 до 420 км в следующих точках (широта, долгота, высота):

- 1) –34 град. южной широты, долгота 8 град.;
- 2) 35 град. южной широты, долгота 313 град.;
- 3) 26 град. южной широты, долгота 300 град.;
- 4) –16 град. южной широты, долгота 290 град.

Как видно из рис. 3, во всех четырех областях в районе ЮАА, для которых были получены наблюдательные данные, измеренные значения скорости счета для высот менее ~ 230 км становятся существенно меньше предсказываемых моделью АЕ9. По-видимому, это связано с тем, что данная модель не учитывает конкретного состояния верхней атмосферы для заданного интервала времени наблюдений. Высотный ход интенсивности электронов обусловлен в первую очередь их не адиабатическими потерями за счет взаимодействия с атомами остаточной атмосферы. Достаточно резкое падение интенсивности потоков суб-релятивистских электронов, начиная с высот менее 250 км, может свидетельствовать о расширении остаточной атмосферы, которое может быть связано с повышением уровня солнечной активности, подъем которой начался с очередным 11-летним циклом как раз в конце 2020 г. Следует отметить, что модели АЕ8 и АЕ9 солнечную активность не учитывают. Другим возможным объяснением расхождения измеренной высотной зависимости с предсказанием теоретической модели АЕ9 может быть связано с тем, что она не вполне корректно учитывает вековую вариацию магнитного поля Земли, которая влияет на жесткость геомагнитного обреза в области малых высот.

В результате измерений потоков электронов с энергиями > 0.3 МэВ на заключительных участках траектории полета спутника “СириусСат-1” были получены данные о величинах потоков в диапазоне высот от ~ 400 до 180 км (сами данные находятся на сайте Центра данных мониторинга космической погоды НИИЯФ МГУ по адресу <https://swx.sinp.msu.ru/tools/davisat.php>). Было показано, что в области ЮАА измеренные потоки значимо меньше предсказываемых теоретическим моделями типа АЕ8, АЕ9. Указанные расхождения с известными теоретическими моделями, рассматривающими распределение потоков захваченных электронов в ОКП (АЕ8, АЕ9) свидетельствуют о необходимости их доработки с учетом реального состояния атмосферы в зависимости от уровня солнечной активности. Также требуется дополнительное изучение возможных механизмов заброса частиц в области, в которых стабильные потоки захваченных частиц существовать не могут.

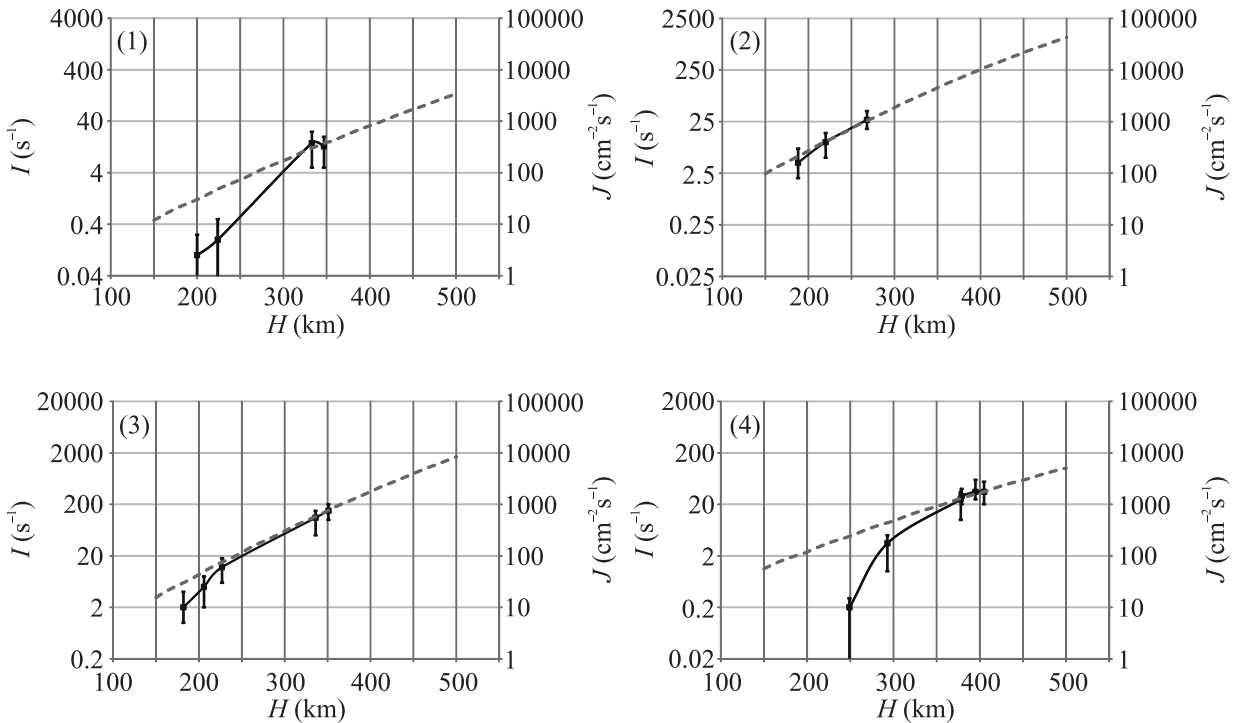


Рис. 3. Высотные зависимости скорости счета суб-релятивистских электронов для областей, отмеченных на рис. 1 (φ , λ – географическая широта и долгота): 1 – $\varphi = -16^\circ$, $\lambda = 290^\circ$; 2 – $\varphi = -26^\circ$, $\lambda = 300^\circ$; 3 – $\varphi = -35^\circ$, $\lambda = 313^\circ$; 4 – $\varphi = -34^\circ$, $\lambda = 8^\circ$. Пунктирные линии показывают высотные зависимости для указанных областей, построенные на основе модели AE9 [1]. Левая шкала – экспериментальные данные, правая шкала – результаты расчетов

6. Финансирование работы. Данная работа в части анализа данных космического эксперимента “СириусСат-1” выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект # 23-42-10005 и Белорусского фонда фундаментальных исследований, проект # F23-RSF-074. В части расчета траектории спутника и сопоставления с данными теоретических моделей (Сазонов В.В., Свертилов С.И. и Оседло В.И.) поддержка работы осуществлялась Научно-образовательной школой Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова “Фундаментальные и прикладные исследования космоса”, проект # 23А-Ш01-02 “Созвездие 270”.

7. Конфликт интересов. Авторы объявили, что у них нет никаких конфликтов интересов.

1. G. P. Ginet, T. P. O’Brien, S. L. Huston, W. R. Johnston, T. B. Guild, R. Friedel, C. D. Lindstrom, C. J. Roth, P. Whelan, R. A. Quinn, D. Madden, S. Morley, and Y.-J. Su, *Space Sci. Rev.* **179**, 579 (2013).

2. J. I. Vette, *The AE-8 trapped electron environment*. (NSSDC/WDC-A-R&S 91-24, 1991).

3. И. В. Гецелев, А. Н. Гусев, Л. А. Дарчиева, Н. А. Кабашова, Т. И. Морозова, А. В. Павлов, М. И. Панасюк, Г. И. Пугачева, С. Я. Рейзман, О. И. Савун, Э. Н. Сосновец, Л. В. Тверская, Г. А. Тимофеев, Б. Ю. Юшков, *Модель пространственно-энергетического распределения потоков захваченных частиц (протонов и электронов) в радиационных поясах Земли*, изд. МГУ, препринт НИИЯФ МГУ-91-37/241, М. (1991).

4. О. О. Царева, Л. М. Зелёный, Х. В. Малова, М. В. Подзолко, Е. П. Попова, В. Ю. Попов, *Успехи физических наук* **188**, 207 (2018)

5. D. Heynderickx, J. Lemaire, and E. J. Daly, *Radiat. Meas.* **26**, 325 (1996).

6. В. В. Богомолов, А. В. Богомолов, Ю. Н. Дементьев, В. Е. Еремеев, Р. Н. Жарких, А. Ф. Июдин, И. А. Максимов, В. И. Оседло, М. И. Прохоров, С. И. Свертилов, *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия* **6**, 125 (2020).

7. <https://sputnix.ru/ru/sputniki/na-orbite/siriussat-1>.

8. *Модель космоса*, под ред. проф. М. И. Панасюка, Книжный дом – университет, М. (2007), т. 1.

9. <https://sputnix.ru/ru/o-nas/novosti/poluchenyi-pervyye-nauchnyie-dannyye-so-sputnikov-siriussat-12>.

10. В. В. Сазонов, *Математическое моделирование* **32**(10), 77 (2020).

11. ГОСТ Р 25645.166-2004, АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ ВЕРХНЯЯ. Модель плотности для баллистического обеспечения полетов искусственных спутников Земли.
12. D. Vallado and P. Crawford, SGP4 Orbit Determination, AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit (2008); DOI:10.2514/6.2008-6770.