

Динамика радиационных поясов Земли

Л. В. Тверская

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скobelцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: tverskaya@taspd.sinp.msu.ru

Статья поступила 30.11.2009, подписана в печать 21.12.2009

Представлен краткий обзор современного состояния исследований радиационных поясов Земли. Основное внимание уделено вариациям энергичных частиц во время магнитных бурь. Обсуждаются механизмы ускорения электронов и протонов в магнитосфере Земли. Анализируется возможность предсказания различных факторов космической погоды по данным о релятивистских электронах внешнего радиационного пояса.

Ключевые слова: радиационные пояса, магнитные бури, космическая погода.

УДК: 550.385. PACS: 94.30.Xу.

Введение

Минуло 50 лет с того времени, когда мировое научное сообщество узнало, что околоземное космическое пространство «радиоактивно»: в 1958 г. были открыты внутренний (Ван Алленом) и внешний (С. Н. Верновым с сотрудниками) радиационные пояса Земли.

Итоги первого десятилетия исследований радиационных поясов были подведены на Международном симпозиуме по физике магнитосферы (Вашингтон, 1968 г.) в обзорных докладах Ван Аллена [1], С. Н. Вернова [2] и Б. А. Тверского [3]. Систематическое изложение результатов экспериментальных и теоретических исследований радиационных поясов за этот период представлено в монографии [4], переведенной на английский язык [5] и переизданной [6] к 250-летию Московского университета.

Радиационные пояса формируются в результате установления динамического равновесия между процессами инжекции, диффузии и потерь. Источниками протонов с энергиями более 30 МэВ является распад нейтронов альбедо космических лучей.

При усиливении солнечного ветра часть дрейфовых орбит частиц, обычно замкнутых, входит в контакт с межпланетной средой. По мере ослабления ветра до начального уровня орбиты вновь замыкаются. Частицы, не успевшие продрейфовать через магнитосферу за время восстановления, оказываются захваченными. Этот источник функционирует и в спокойных условиях. На начальной стадии магнитного возмущения силовые линии в области внешнего пояса вытягиваются в плазменный слой хвоста магнитосферы, а на фазе восстановления возвращаются в область захваченной радиации. Магнитное поле в вершине силовой линии при «втягивании» возрастает в десятки, сотни раз. Соответственно возрастает по бетатронному закону и энергия находящихся на этих линиях электронов (для протонов условия адиабатичности нарушаются, и ускорение менее эффективно). Прямой захват протонов может происходить до энергий, равных приблизительно 1 МэВ. Описанный процесс, напоминающий стрельбу из «рогатки», является основным механизмом инжекции частиц в район границы области захваченной радиации во время магнитных бурь.

Заполнение более глубоких магнитных *L*-оболочек (*L* — параметр Мак-Илвайна) обусловлено радиальной диффузией под действием нестационарных электрических полей. Наибольшее развитие получила теория диффузии, обусловленной индукционными полями, возникающими при внезапных импульсах геомагнитного поля («магнитная» диффузия).

Для протонов и других ионов радиационных поясов основными являются ионизационные потери. Основным механизмом потерь электронов является циклотронная неустойчивость. Зазор между внутренним и внешним электронными поясами соответствует области минимального поглощения волн, раскачиваемых электронами с энергиями в десятки—сотни кэВ.

В конце 1980-х — начале 1990-х гг. были обнаружены радиационные пояса, формирующиеся в результате проникновения в магнитосферу аномальной компоненты космических лучей [7] и в результате взаимодействия энергичных протонов радиационного пояса с атомами кислорода остаточной атмосферы [8].

В последние десятилетия интерес к исследованию радиационных поясов резко возрос. Во многом это связано с осознанием их роли как наиболее важного фактора космической погоды, воздействующего на бортовые системы спутников. Особенно пристальное внимание уделяется вариациям релятивистских электронов внешнего радиационного пояса, называемых в мировой литературе «космическими киллерами». Настоящая статья содержит краткий обзор современных представлений о формировании радиационных поясов Земли.

1. Ионный радиационный пояс

1.1. Стационарный пояс

В 1963–1965 гг. Б. А. Тверским была разработана количественная теория формирования стационарного протонного радиационного пояса Земли при диффузии под действием внезапных импульсов с учетом ионизационных потерь [3–6]. Теоретические расчеты показали хорошее согласие с экспериментом. Максимум интенсивности протонов разных энергий определяется соотношением $L_{\max}(p) \propto E^{-3/16}$.

Для ионов с другим атомным номером A и зарядом Z теория предсказывала:

$$L_{\max}(i) = (A^{1/2} \cdot Z^2) L_{\max}(p). \quad (1)$$

Предсказанная соотношением (1) структура пояса α -частиц полностью совпала с полученными позднее экспериментальными данными [9]. Исследования с привлечением большого числа данных по тяжелым ионам подтвердили основную роль магнитной диффузии в формировании пространственно-энергетического распределения этих частиц [10]. На рис. 1, заимствованном из работы [11], приведена зависимость положения максимумов поясов протонов, ионов Не, С и О от энергии по данным измерений на ИСЗ «Электрон»-1-4, «Explorer-45», «Молния»-1, 2, «ISEE-1» и модели AP-8. Прямые линии — расчет по теории Тверского. Для протонов с энергией больше 30 МэВ, как уже отмечалось, источником является распад нейтронов альбено космических лучей. Протоны с энергиями менее 200 кэВ относятся к кольцевому току и здесь не рассматриваются.

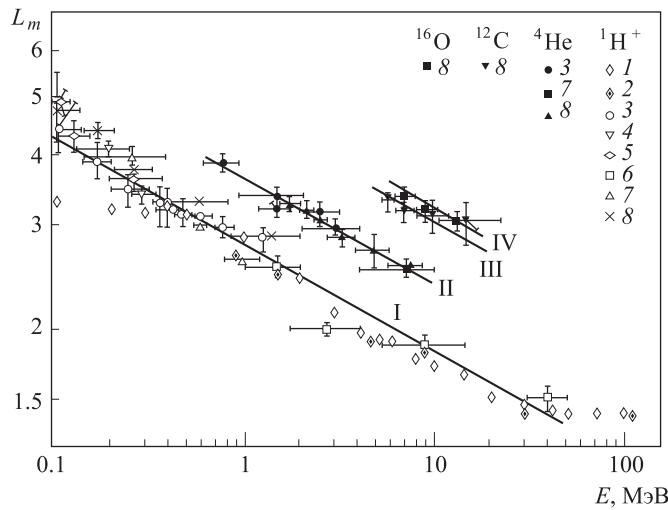


Рис. 1. Зависимость положения максимума радиационных поясов протонов (I), ионов Не (II), С (III) и О (IV) от энергии: 1 — модель AP-8; 2 — «Электрон 1-4»; 3 — «Explorer-45»; 4 — «Молния-1» (1970); 5 — «Молния-1» (1974); 6 — «Молния-2» (1974); 7 — «Молния-2» (1975); 8 — «ISEE-1»; прямые линии — расчет по теории Тверского

Как видно из рис. 1, данные ИСЗ «Электрон»-1-4 охватывают практически весь диапазон энергий протонного пояса. Эксперимент был осуществлен под руководством С. Н. Вернова в 1964 г. Орбиты ИСЗ «Электрон» пересекали разные высоты и дали полную картину распределения частиц в радиационных поясах. Эти данные послужили основой для первой отечественной модели радиации в околосолнечном пространстве. Первый выпуск книги «Модель космоса» под редакцией С. Н. Вернова вышел в 1964 г. К 250-летию МГУ выпущено уже 8-е издание этой книги [11].

Детальное сопоставление теоретических расчетов с данными ИСЗ «Электрон» позволило Тверскому сделать предсказание о распределении плотности холодной плазмы в плоскости экватора: она должна составлять

$N \sim 10^3$ см⁻³ и быть постоянной в пределах факто-ра 2-3 на L -оболочках 1.5–3.5.

Это предсказание подтвердилось сравнительно недавно, когда были обобщены данные длительных измерений распределения плотности холодной плазмы в плоскости экватора на ИСЗ CRRES [12]. В расчетах структуры поясов другие авторы использовали распределение $N \propto L^{-4}$.

1.2. Вариации во время магнитных бурь

Протоны радиационных поясов испытывают адиабатические вариации во время магнитных бурь, коррелирующие с D_{st} -вариацией. Во время сильных магнитных бурь наблюдаются неадиабатические вариации протонов с энергиями в десятки МэВ [13, 14]. Этот эффект был объяснен в рамках теории неадиабатичности движения протонов в геомагнитной ловушке. Граница захвата протонов перемещается во время магнитной бури на меньшие L^* [14]:

$$L^* = \frac{6.95}{E^{0.25}} \left(1 - \frac{3.64 \cdot 10^{-2} D_{st}^{0.5}}{E^{0.375}} \right). \quad (2)$$

Формула (2) действительна вблизи экваториальной плоскости. Данные измерений протонов на ИСЗ «Электрон» и «Молния» позволили провести такой анализ практически для всей области захваченной радиации при энергиях $1 \leq E_p \leq 110$ МэВ [15].

В области $2.5 > L > 2$ в 1960-е гг. наблюдалась дополнительный максимум протонов с энергиями 20–70 МэВ. Было высказано предположение [4–6], что дополнительный максимум нестационарен и является диффузионной волной, возникшей в годы максимума солнечной активности вследствие захвата у границы поясов протонов с энергиями в сотни кэВ. В течение 1963–1965 гг. второй максимум смещался к Земле со скоростью, близкой к теоретической.

Впервые процесс быстрого формирования «нового» пояса протонов и электронов с энергиями в десятки МэВ наблюдался на ИСЗ «CRRES» 24 марта 1991 г. [16]. В момент гигантского (с амплитудой ~ 200 нТл) внезапного начала (SSC) сильной магнитной бури за 1 мин сформировался на $L \sim 2.5$ пояс, почти эквивалентный по интенсивности стабильному поясу высокозергичных протонов. Этот эффект был объяснен в рамках теории дрейфа частиц в электрическом и магнитном полях внезапного импульса [4–6] в предположении биполярной структуры импульса: положительного длительностью ~ 10 с и отрицательного длительностью ~ 1 мин [17].

В целом ряде бурь был зарегистрирован захват солнечных протонов, α -частиц и тяжелых ионов в отсутствие специфических биполярных внезапных импульсов [18, 19]. Детально процесс формирования пояса захваченных солнечных протонов с энергией ~ 1 МэВ был прослежен по данным полярного ИСЗ «Коронас-Ф» во время сильных магнитных бурь в октябре 2003 г. [20]. На рис. 2 представлено пространственное распределение протонов с $E_p = 1-5$ МэВ и $E_p = 50-90$ МэВ для двух пролетов ИСЗ на фазе восстановления сильной магнитной бури 30 октября 2003 г. ($|D_{st}|_{\max} = 383$ нТл). Видно, как при отступлении границ проникновения протонов к высоким широтам остался «новый» пояс за-

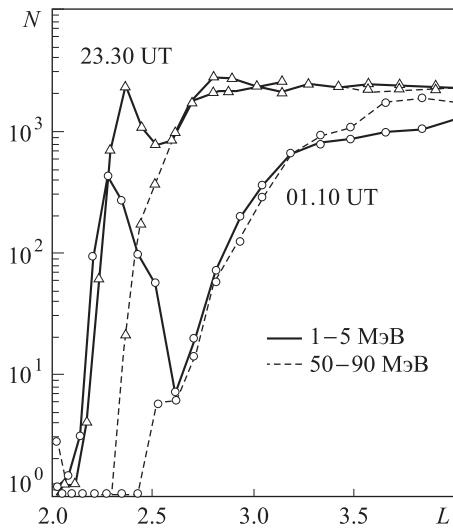


Рис. 2. Пространственное распределение протонов с $E_p = 1-5$ МэВ и $E_p = 50-90$ МэВ, для двух пролетов ИСЗ на фазе восстановления сильной магнитной бури 30 октября 2003 г. ($|D_{st}|_{\max} = 383$ нТл)

хваченных солнечных протонов с $E_p \sim 1$ МэВ. Авторы интерпретируют эффект в рамках ранее разработанного механизма захвата протонов при изменении конфигурации магнитосферы в процессе диполизации [3–6, 21]. В некоторых случаях поток протонов в «новом» поясе существенно превышает наблюдаемый вне магнитосфера, т. е. происходит ускорение солнечных протонов в магнитосфере. При этом максимум пояса инжектированных протонов совпадает с максимумом пояса инжектированных релятивистских электронов [19, 21].

2. Электронные радиационные пояса

2.1. Внутренний пояс

Внутренний пояс для электронов с энергиями в сотни кэВ и выше является стабильным образованием. Скорее всего, потоки электронов соответствуют границе устойчивости [4–6]. О пополнении этого пояса в процессе быстрой диффузии во время сильных магнитных бурь будет сказано ниже.

2.2. Внешний пояс

Внешний пояс электронов является весьма нестационарным образованием и испытывает большие вариации. Исследованию этих вариаций и механизмов ускорения электронов посвящено огромное и все возрастающее количество работ. Мы вынуждены делать ссылки в основном на обзорные работы.

2.2.1. Вариации на периферии внешнего пояса

Наиболее детальные многолетние измерения энергичных электронов проведены на геосинхронных ИСЗ, имеющих круговую орбиту на высоте 36 000 км [22–24]. Спектры электронов, измеренные на этой орбите, используются в качестве начальных условий при моделировании процессов переноса и ускорения частиц во внешнем поясе.

Важным результатом явилось установление высокой корреляции интенсивности релятивистских электронов на орбите со скоростью солнечного ветра. Потоки

этих электронов появляются, как правило, на фазе восстановления магнитных бурь, но их интенсивность не зависит от мощности бури. Примерно в половине числа случаев вообще не наблюдается возрастаний электронов. Отмечена высокая корреляция потоков с Рс-5-пульсациями на фазе восстановления бури. Для появления экстремальных потоков электронов с $E_e > 2$ МэВ необходима наряду с высокой скоростью солнечного ветра высокая суббуровая активность на фазе восстановления.

2.2.2. Диффузионные волны и долговременные вариации релятивистских электронов

Сформировавшийся на удаленных L -оболочках во время магнитных бурь пояс релятивистских электронов под действием диффузии смещается вглубь магнитосферы. Если после бури долго сохраняется невысокая геомагнитная активность, наблюдаются диффузионные волны электронов [1–6, 26]. Во всех наблюдавшихся случаях скорость смещения фронтов волн V_f соответствовала диффузии под действием внезапных импульсов.

Наиболее благоприятные условия для распространения диффузионных волн электронов существуют в минимуме солнечной активности после рекуррентных магнитных бурь, которые формируют 27-дневную периодичность в потоках энергичных электронов внешнего пояса [25, 26].

Сезонные вариации внешнего пояса были обнаружены по данным ИСЗ «ГЛОНАСС»: интенсивность электронов с энергией порядка 1 МэВ летом и зимой значительно меньше, чем весной и осенью [26]. Эти вариации, скорее всего, обусловлены сезонной зависимостью геомагнитных возмущений.

По данным измерений, в 19-м цикле солнечной активности максимум внешнего пояса L_{\max} и зазор между поясами отодвигались к большим L при переходе от максимума цикла к минимуму [2]. Эта особенность подтвердилась в 20-м и 21-м циклах по измерениям на ИСЗ «Молния» и «Метеор» [27]. Как оказалось, корреляции L_{\max} с циклом солнечной активности нет. Основное влияние на L_{\max} оказывают магнитные бури, коэффициент корреляции L_{\max} со среднемесячным D_{st} составил 0.7.

2.2.3. Вариации внешнего пояса во время сильных магнитных бурь

Типичная картина вариаций внешнего пояса электронов во время бури такова: падение интенсивности на главной фазе бури и возрастание (если электроны инжектируются) с запаздыванием электронов больших энергий на фазе восстановления [28]. Инжектированные электроны с энергиями в десятки — первые сотни кэВ на фазе восстановления могут полностью заполнить зазор между поясами [29]. Положение максимума L_{\max} «нового» пояса электронов с $E_e > 1$ МэВ определяется мощностью бури [27, 29]. Быстрая диффузия электронов с $E_e \sim 1$ МэВ во внутренний пояс (до $L \sim 1.7$) впервые зарегистрирована на ИСЗ «Молния-1» [27]. Однако, как она развивалась, было неясно, так как измерения были редкими.

Магнитная буря 24 марта 1991 г. продемонстрировала разные возможности инжекций релятивистских

электронов в поясе. В момент гигантского SSC за 1 мин, как отмечалось выше, сформировался «ударный» пояс электронов с энергиями более 15 МэВ. Эволюцию пояса ультрарелятивистских электронов во время последовавшей сильной магнитной бури и инжекцию нового «буревого» пояса удалось проследить по данным полярного ИСЗ «Метеор» [31]. На рис. 3 представлена динамика радиального профиля пояса электронов с $E_e > 8$ МэВ, появившегося во время гигантского SSC. Моменты пролета ИСЗ и положение L_{\max} показаны на графике D_{st} -вариации. Сформировавшийся на $L \sim 2.8$ пояс к концу главной фазы бури сместился на $L \sim 2.3$. Это свидетельствует о быстрой электрической диффузии на главной фазе бури и не подтверждает сложившееся мнение о том, что на главной фазе бури происходит только падение интенсивности релятивистских электронов без переноса [32].

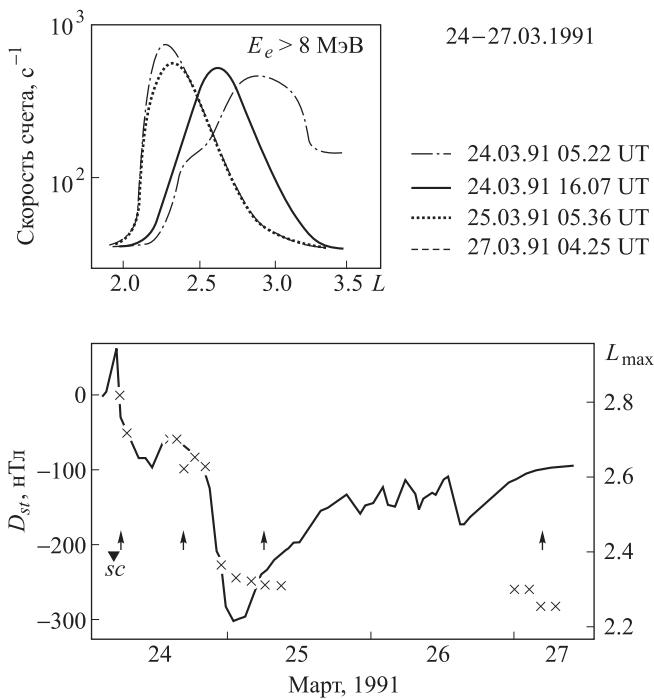


Рис. 3. Динамика радиального профиля пояса электронов с $E_e > 8$ МэВ, появившегося во время гигантского SSC. Моменты пролета ИСЗ и положение L_{\max} показаны на графике D_{st} -вариации

На рис. 4 представлено пространственное распределение интенсивности электронов разных энергий в диапазоне 0.17–8 МэВ для трех временных периодов: 24.03.91 (до SSC), 25.03.91 (в начале фазы восстановления бури) и 27.03.91 (через 2 дня после максимума бури). Перед бурей хорошо виден зазор между поясами на $L \sim 3$. На следующем пролете, 25.03.91, имеется пик инжектированных во время SSC электронов, и сформировался еще один новый пояс инжектированных во время бури электронов с $E_e > 0.7$ МэВ с максимумом на $L \sim 3$. Наблюдается запаздывание в появлении более высокоэнергичных электронов, максимум которых формируется там же.

Впервые быстрая (на масштабе суббури) «буревая» инжекция релятивистских электронов на $L \sim 3$ была зарегистрирована на ИСЗ «Молния-1» [21].

2.2.4. Зависимость положения максимума пояса инжектированных во время магнитных бурь электронов от мощности бури

В [30] была получена эмпирическая зависимость от амплитуды бури $|D_{st}|_{\max}$ положения максимума нового «буревого» пояса релятивистских электронов L_{\max}

$$|D_{st}|_{\max} = \frac{2.75 \cdot 10^4}{L_{\max}^4}. \quad (3)$$

За последние два десятилетия зависимость (3) получила многочисленные подтверждения по данным измерений как на больших, так и на малых высотах. На рис. 5 приведена эта зависимость, построенная во всем диапазоне известных амплитуд магнитных бурь, включая самую сильную бурю за весь период космических исследований — 13–14 марта 1989 г. [24]. Немногочисленные пока данные об инжектируемых с ускорением солнечных протонах тоже соответствуют этой зависимости [19, 21]. В соответствии с современными теоретическими представлениями [33–35] и экспериментальными данными [21, 24] формула (3) может определять (с точностью до $\sim 0.2L$), до каких L -оболочек смещаются в максимуме бури многие магнитосферные плазменные структуры: граница области захваченной радиации, центр западной электроструи, экваториальная ночная граница дискретных форм полярных сияний, максимум давления плазмы кольцевого тока, граница полярного плато солнечных протонов с энергией ~ 1 МэВ. Зависимость положения плазмо-

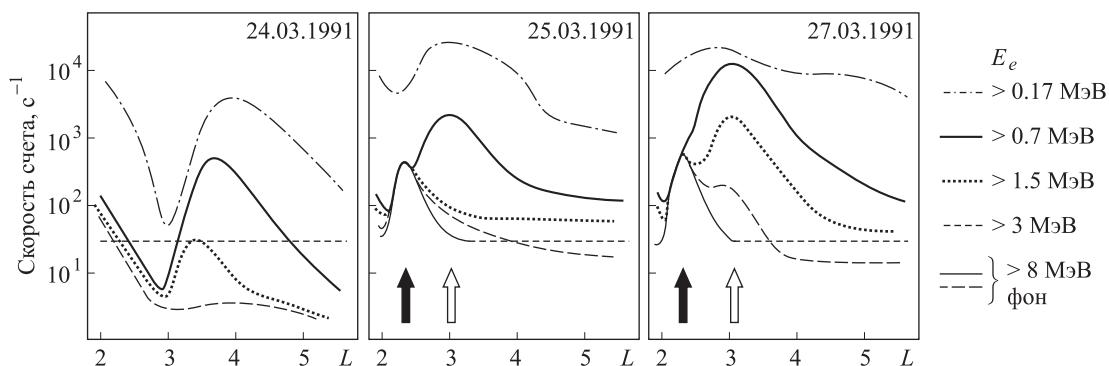


Рис. 4. Пространственное распределение интенсивности электронов разных энергий в диапазоне 0.17–8 МэВ для трех временных периодов: 24.03.91 (до SSC), 25.03.91 (в начале фазы восстановления бури) и 27.03.91 (через 2 дня после максимума бури)

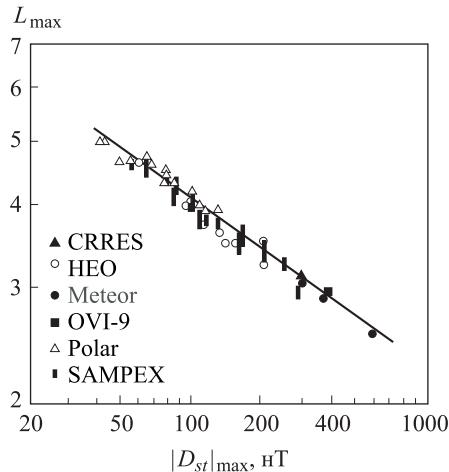


Рис. 5. Зависимость (3), построенная во всем диапазоне известных амплитуд магнитных бурь, включая самую сильную бурю за весь период космических исследований — 13–14 марта 1989 г. [24]

паузы L_{pp} с коэффициентом 1.3 совпадает с закономерностью (3) [23]. Поэтому рассматриваемая закономерность может быть эффективно использована для предсказания космической погоды.

2.2.5. Механизмы ускорения электронов внешнего пояса

Электроны с энергиями в десятки — первые сотни кэВ («seed»-электроны) ускоряются нестационарными электрическими полями суббури [36]. До энергий более 1 МэВ электроны могут быть ускорены бетатронно в процессе втягивания силовых линий геомагнитного хвоста в область захваченной радиации [3]. Источником служат электроны плазменного слоя хвоста магнитосферы с энергиями в десятки — сотни кэВ. Инжектированные электроны испытывают еще дополнительное адиабатическое ускорение на фазе восстановления магнитной бури при распаде кольцевого тока.

В первой работе по локальному ускорению релятивистских электронов [37] предполагалось, что оно может происходить при взаимодействии электронов с пульсациями магнитного поля P_i . В активную фазу суббури развивается сильное электрическое поле азимутального направления, способное локально, в ночном секторе, ускорить электроны до релятивистских энергий за время периода дрейфа электронов с энергиями в сотни кэВ. За последнее десятилетие появилось много работ, моделирующих стохастическое ускорение электронов при диффузии в импульсном пространстве, обусловленное взаимодействием волна–частица (главным образом в области «хоровых» волн) с учетом потерь за счет питч-углового рассеяния на разных типах волн [38]. Некоторые общие свойства временной динамики потоков релятивистских электронов и их спектров на фазе восстановления магнитных бурь в зависимости от темпов стохастического ускорения были исследованы в [39] на основе аналитических решений нестационарного уравнения для функции распределения электронов.

Заключение

В исследованиях радиационных поясов Земли достигнут значительный прогресс. Разработана количе-

ственная теория стационарного ионного пояса, выяснены основные источники частиц, предложены механизмы ускорения и потерь, решена проблема «ударной» инжекции частиц. Однако остается еще много нерешенных вопросов. Неясно, каково соотношение между различными источниками быстрых потерь релятивистских электронов во время главной фазы магнитной бури: быстрым переносом, уменьшением размеров области замкнутых дрейфовых оболочек, высыванием при взаимодействии с разными типами волн. Вопрос о механизме ускорения релятивистских электронов остается открытым. Пока невозможно предсказать, во время каких бурь происходит инжекция электронов и протонов во внутренние области магнитосферы. Существующие эксперименты не позволяют сделать однозначного выбора в пользу ускорения электронов каким-либо типом волн.

Дальнейшему решению проблем динамики радиационных поясов могут способствовать эксперименты по одновременным измерениям частиц, электрических и магнитных полей в радиационных поясах, в плазменном слое хвоста магнитосферы и в межпланетной среде. Перспективной с точки зрения космической погоды является закономерность (3), которая позволяет предсказать в зависимости от амплитуды бури, $|D_{st}|_{\max}$, минимальные широты, до которых приближаются к Земле различные «опасные» плазменные структуры в магнитосфере.

Автор выражает сердечную признательность профессорам М. И. Панасюку и А. Б. Кропоткину, старшим научным сотрудникам М. Ф. Бахаревой и А. С. Ковтюху за ценные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (грант НШ-1255.2008.2).

Список литературы

1. Van Allen J.A. // Rev.Geophys. 1969. **7**, N 1, 2. P. 283.
2. Vernov S.N., Gorchakov E.V., Kuznetsov S.N. et al. // Rev. Geophys. 1969. **7**, N 1, 2. P. 257.
3. Tverskoy B.A. // Rev. Geophys. 1969. **7**, N 1, 2. P. 219.
4. Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли. М., 1968.
5. Tverskoy B.A. Dynamics of the radiation belts of the Earth. W. NASA TT F-635. 1971.
6. Тверской Б.А. Основы теоретической космофизики. Избранные труды. М., 2004.
7. Grigorov N.L., Kondrat'eva M.I., Panasyuk M.I. et al. // Geophys. Res. Lett. 1991. **18**. P. 1969.
8. Вандас М., Дворжакова М., Кузнецов С.Н., Фишер С. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1988. **52**, № 12. С. 821.
9. Fritz T.A. and Speldvik W.N. // Planet. Space Sci. 1981. **29**, N 11. P. 1169.
10. Panasyuk M.I. // Effect of Space Weather on Technology Infrastructure / Ed. by I. A. Daglis. Dordrecht, 2004. P. 65.
11. Кузнецов С.Н., Тверская Л.В. Модель космоса. М., 2007. С. 528.
12. Sheeley B.W., Moldwin M.B., Rassoul H.K., Anderson R.R. // J. Geophys. Res. 2001. **106**, N A11. P. 25631.
13. McIlwain C.E. // Space Res. 1965. **5**. P. 374.
14. Ильин В.Д., Кузнецов С.Н. // VII Ленинградский международный семинар. 1975. С. 269.
15. Ильин В.Д., Кузнецов С.Н., Панасюк М.И., Сосновец Э.Н. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1984. **48**, № 11. С. 2200.

16. Blake J.B., Kolasinski W.A., Fillius R.W., Mullen E.G. // Geophys. Res. Lett. 1992. **19**. P. 821.
17. Павлов Н.Н., Тверская Л.В., Тверской Б.А., Чучков Е.А. // Геомагн. и аэрон. 1993. **33**, № 6. С. 41.
18. Van Allen J.A., Randall D.A. // J. Geophys. Res. 1971. **76**, N 7. P. 1830.
19. Lorentzen K.R., Mazur J.E., Looper M.D. et al. // J. Geophys. Res. 2002. **107**, N A9. P. 1231.
20. Лазутин Л.А., Кузнецов С.Н., Подорольский А.Н. // Геомагн. и аэрон. 2002. **47**, № 2. С. 187.
21. Тверская Л.В. // Геомагн. и аэрон. 1998. **38**, № 5. С. 22.
22. Friedel R.H.W., Reeves G.D., Obara T. // A Review. Solar-Terrestrial Phys. 2002. **64**. P. 265.
23. O'Brien T.P., Lorentzen K.E., Mann I.R. et al. // J. Geophys. Res. 2003. **108** (A8). P. 1329.
24. Tverskaya L.V., Ivanova T.A., Pavlov N.N. et al. // Adv. Space Res. 2005. **36**. P. 2392.
25. Williams D.J. // J. Geophys. Res. 1966. **71**. P. 1815.
26. Иванова Т.А., Павлов Н.Н., Рейзман С.Я. и др. // Геомагн. и аэрон. 2000. **40**, № 1. С. 10.
27. Tverskaya L.V. // Geophysical Monograph 97. AGU. 1996. P. 183.
28. Williams D.J., Arens I.F., Lanzerotti L.T. // J. Geophys. Res. 1968. **73**. P. 5673.
29. Вернов С.Н., Иванова Т.А., Сосновец Э.Н. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1969. **34**, № 11. С. 2270.
30. Тверская Л.В. // Геомагн. и аэрон. 1986. **26**. С. 864.
31. Tverskaya L.V., Ginzburg E.A., Pavlov N.N., Svidsky P.M. // Adv. Space Res. 2003. **31**, N 4. P. 1033.
32. Shprits Yu.Y., Elkington S.R., Meredith N.P., Subbotin D.A. // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2008. **70** (14). P. 1679.
33. Tverskoy B.A. // Solar Terr. Phys. / Ed. by R. Dyer. 1972. P. 297.
34. Тверской Б.А. // Геомагн. и аэрон. 1982. **22**. С. 991.
35. Тверской Б.А. // Геомагн. и аэрон. 1997. **37**, № 5. С. 29.
36. Бондарева Т.Б., Тверская Л.В. // Геомагн. и аэрон. 1973. **47**, № 2. С. 187.
37. Kropotkin A.P. // Radiat. Meas. 1996. **2b**. P. 343.
38. Shprits Yu.Y., Subbotin D.A., Meredith N.P., Elkington S.R. // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2008. **70** (14). P. 1694.
39. Бахарева М.Ф. // Геомагн. и аэрон. 2005. **45**, № 5. С. 585.

Dynamics of the Earth's radiation belts

L. V. Tverskaya

*D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University,
Moscow 119991, Russia.
E-mail: tverskaya@taspd.sinp.msu.ru.*

Current state of the studies on the Earth radiation belts is briefly reviewed with special emphasis on variations of energetic particles during geomagnetic storms. Discussed are the mechanisms of acceleration of electrons and protons in the Earth magnetosphere, as well as an ability to predict various space weather effects from the spacecraft data on relativistic electrons of the outer radiation belt.

Keywords: radiation belts, magnetic storms, space weather.

PACS: 94.30.Xy

Received 30 November 2009.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2010).

Сведения об авторе

Тверская Людмила Васильевна — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.; тел.: (495) 939-50-66, e-mail: tverskaya@taspd.sinp.msu.ru.