

УДК 629.786.2:614.876

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ЗА ТОНКИМИ ЗАЩИТАМИ В РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСАХ ЗЕМЛИ

© 2025 г. В. Г. Митрикас

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Государственный научный центр
Российской Федерации — Институт медико-биологических проблем Российской академии наук, Москва, Россия

e-mail: vg_mit@imbp.ru

Поступила в редакцию 04.12.2024 г.

После доработки 28.01.2025 г.

Принята к публикации 29.01.2025 г.

В настоящей работе показана и проанализирована корреляция доз электронов радиационных поясов Земли на низкой околоземной орбите за малой защитой со средними показателями состояния магнитосферы планеты в периоды геомагнитных возмущений. Рассмотрены результаты экспериментов “Expose-R2” на *Международной космической станции* и “ДЭПРОН” на космическом аппарате “*Ломоносов*” (НИИЯФ МГУ). В эксперименте “Expose-R2” на МКС каждые 10 с измерялась поглощенная доза за защитой 0.6 гсм⁻². В эксперименте “ДЭПРОН” каждую секунду измерялась поглощенная доза за защитой 0.45 и 0.81 гсм⁻². В связи с большим количеством пропусков в эксперименте “ДЭПРОН” предложена процедура восстановления экспериментальных данных. На основе полученных данных рассмотрены корреляционные связи среднесуточной мощности поглощенной дозы с различными космофизическими индексами в фиксированных диапазонах изменений *L*-координаты (параметр Мак-Илвайна, на геомагнитном экваторе равен расстоянию до центра Земли в радиусах планеты). Показано, что после геомагнитных возмущений коэффициенты линейной регрессии между мощностью поглощенной дозы и рассмотренными геофизическими индексами имеют однотипную зависимость от *L*-координаты. Для магнитных бурь с *Dst* < 100 нТл зависимость коэффициентов линейной регрессии от *L*-координаты хорошо аппроксимируется нормальным распределением до *L* = 4.7. Среднее значение положения максимума $L_{cp} = 4.10 \pm 0.15$, стандартное отклонение $\sigma = 0.40 \pm 0.07$. Для магнитных бурь с *Dst* > 100 нТл максимум распределения смещается до $L_{cp} = 3.0$ и $\sigma = 0.22$.

DOI: 10.31857/S0023420625040025, EDN: QNNSHV

1. ВВЕДЕНИЕ

При выполнении внекорабельной деятельности (ВКД) на МКС космонавты подвергаются существенно большему радиационному воздействию от электронов радиационных поясов Земли (РПЗ), чем при пребывании внутри космического аппарата, поскольку толщина защиты скафандров намного меньше толщины защиты космического корабля или космической станции. Во время ВКД космонавты до 10 % времени могут находиться в области внешнего РПЗ, где потоки электронов существенно больше, чем в области внутреннего РПЗ.

Одной из задач службы радиационной безопасности (СРБ) пилотируемых космических

полетов является предварительная оценка дополнительной (по отношению к дозе, получаемой космонавтами при их нахождении внутри станции) поглощенной дозы за время выполнения ВКД. Как отмечено в работе [1] “*в настоящее время не существует единой аналитической модели для описания поведения электронов внешнего радиационного пояса Земли, поэтому для конкретного события на основе предлагаемых механизмов ускорения и транспортировки невозможно предсказать ожидаемую динамику потоков электронов*”. Другими словами можно сказать, что поведение электронов и соответственно поглощенная доза после магнитной бури непредсказуемы. В связи с этим особое значение приобретают результаты экспериментов по определению динамики

поглощенной дозы в РПЗ за малыми толщинами защиты при возмущениях магнитосферы.

Во время выполнения внекорабельной деятельности 22.X.2014 космонавты М.В. Сураев и А.М. Самокутяев установили на внешней поверхности служебного модуля *МКС* аппаратуру эксперимента “Expose-R2”, в составе которой находился прибор Ц. Дачева (Болгария) R3DR2 для измерения динамики поглощенной дозы. Толщина защиты по нормали к поверхности кремниевого детектора оценена в $0.6 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$. Измерения проводились каждые 10 с. Средняя высота орбиты *МКС* составляла в период проведения эксперимента $\sim 411 \text{ км}$, наклонение орбиты 51.6° . Результаты эксперимента представлены на сервере Европейского космического агентства (<http://esa-pro.space.bas.bg/node/23>).

С космодрома Восточный 28.IV.2016 был произведен запуск искусственного спутника Земли “Ломоносов”, на котором был установлен прибор ДЭПРОН (НИИЯФ МГУ) с двумя полупроводниковыми детекторами за защитой 0.45 и $0.81 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, измеряющими поглощенную дозу от протонов, электронов и нейтронов. Измерения проводились каждую секунду. Средняя высота орбиты искусственного спутника Земли (ИСЗ) составляла в период проведения эксперимента

$\sim 500 \text{ км}$, наклонение орбиты 98° . Результаты эксперимента представлены на сервере НИИЯФ МГУ (<https://ftp.sinp.msu.ru/>).

Оба эксперимента проводились в эпоху максимума солнечной активности (СА), когда наблюдалась высокая геомагнитная активность. По результатам эксперимента можно попытаться установить связи среднесуточной мощности поглощенной дозы с параметрами геомагнитной активности.

Сравним функции экранированности (вероятности встретить в любом направлении из рассматриваемой точки толщину защиты в интервале от X до $X+dX$) прибора R3DR2, хрусталика глаза и кожи космонавта, стоящего за пультом управления грузовой стрелой при выполнении ВКД. Моделирование эксперимента “Expose-R2” и космонавта в скафандре “Орлан” проводилось аналогично [2]. На рис. 1 представлены результаты расчетов. Из анализа рисунка видно, что функции экранированности достаточно близки друг к другу.

Близость функций экранированности позволяет оценивать, какую дополнительную поглощенную дозу могли бы получить космонавты за ВКД длительностью 6 ч в спокойных геомагнитных условиях. На рис. 2 представлена

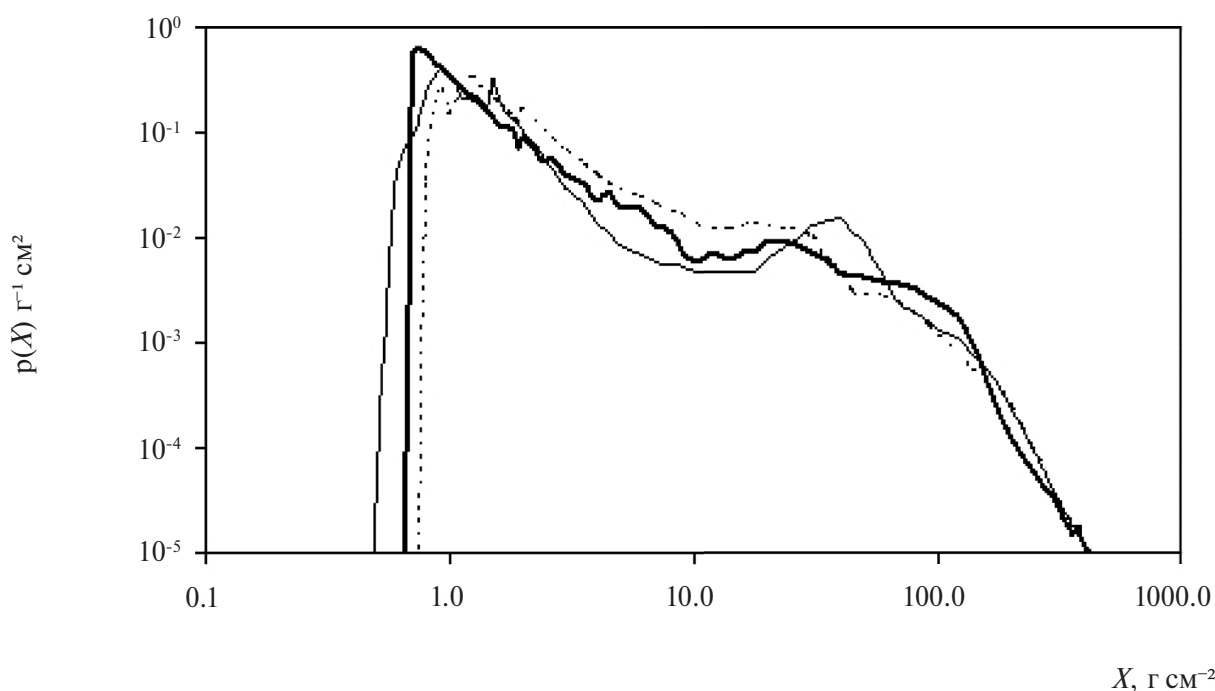


Рис. 1. Функции экранированности детектора прибора R3DR2 (жирная кривая), кожи космонавта (тонкая кривая) и хрусталика глаза космонавта (тонкая пунктирная кривая) от излучений радиационных поясов Земли

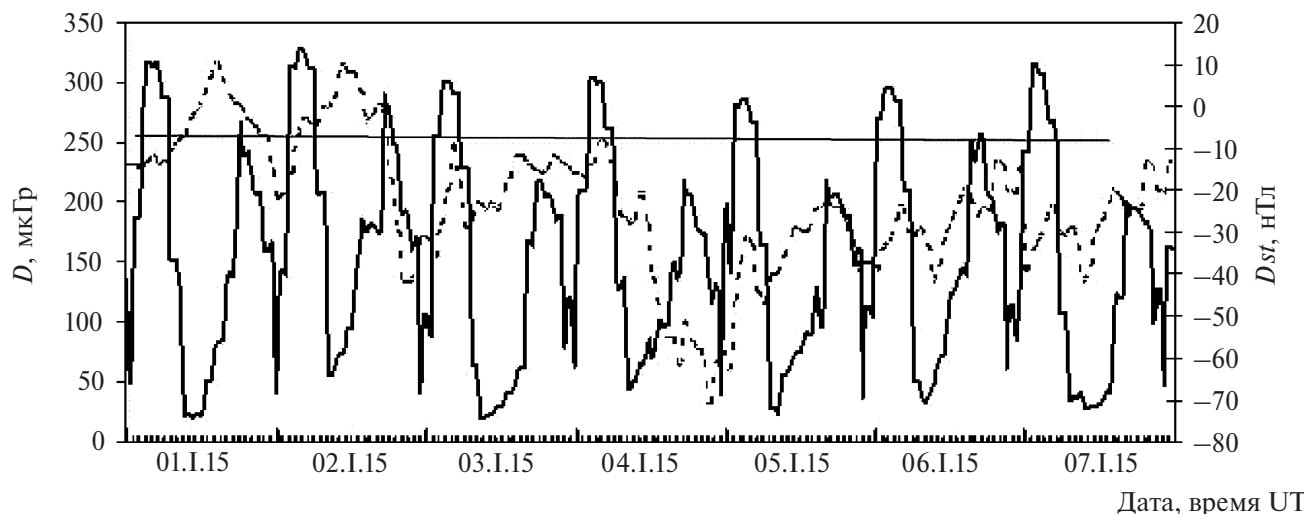


Рис. 2. Зависимость дополнительной поглощенной дозы за ВКД длительностью 6 ч от времени начала ВКД (открытие выходного люка), начало января 2015 г.

зависимость дополнительной поглощенной дозы от времени за ВКД длительностью 6 ч в начале января 2015 г. Там же представлена динамика Dst -вариации. На рис. 2 первый суточный пик возникает при пролете $МКС$ Южно-Атлантической (ЮАА) аномалии и основной вклад в поглощенную дозу дают протоны внутреннего радиационного пояса Земли (РПЗ). Второй пик связан с попаданием $МКС$ в область внешнего РПЗ и основной вклад в поглощенную дозу дают электроны.

Из анализа рис. 2 следует, что даже в период возникновения умеренной магнитной бури (4.I.2015 амплитуда часовых значений Dst -вариации достигала 71 нТл) величина дополнительной поглощенной дозы не превышает 330 мкГр. Дополнительная поглощенная доза сопоставима с величиной среднесуточной дозы, получаемой космонавтами на $МКС$ в 200–450 мкГр, в зависимости от высоты орбиты и фазы цикла СА. Орбита $МКС$ в периоды проведения ВКД российскими космонавтами, как правило, проходит через ЮАА. Это связано с возможностью прямого наземного контроля полета $МКС$ с территории РФ. При этом даже за самый короткий сеанс ВКД длительностью 3.7 ч дозиметром Пилле зарегистрирована доза в 613 мкГр, что почти в два раза больше, чем по приведенным оценкам.

Если по экспериментальным значениям оценить, какую дополнительную поглощенную дозу могли бы получить космонавты за ВКД длительностью 6 ч после сильной магнитной бури 18.III.2015, то получим результаты,

представленные на рис. 3, там же представлена динамика Dst -вариации в нанотеслах.

На рис. 3 первый суточный пик поглощенной дозы возникает при пролете $МКС$ через области внешнего РПЗ, а второй — через ЮАА. Из анализа рисунка следует, что до магнитной бури дополнительные поглощенные дозы были порядка 100–200 мкГр. После сильной магнитной бури необходимо очень аккуратно подходить к выбору периода проведения ВКД для исключения получения космонавтами больших значений дополнительной поглощенной дозы в 2000–2500 мкГр. Такой выбор можно было бы проводить на основе методики учета влияния геомагнитных возмущений на поглощенную дозу за малой защитой от электронов РПЗ. Необходимость разработки такой методики повышается перед планируемым запуском *Российской орбитальной станции (РОС)* на орбиту с наклонением 97.0° . На такой орбите до 40 % времени станция будет находиться во внешнем радиационном поясе Земли. В настоящее время такой методики нет.

Заметим, что 10.VIII.2015 проводился очередной сеанс ВКД. За время нахождения космонавтов вне $МКС$ термолюминесцентным дозиметром Пилле [3] за защитой $\sim 1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ измерена поглощенная доза в 576 мкГр. За это же время прибор R3DR2 за защитой $0.6 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ зарегистрировал поглощенную дозу в 312 мкГр. Доза за защитой $1.0 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ составляет 0.825 от дозы за защитой $0.6 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$. Прибор R3DR2 должен был бы показать 698 мкГр, т.е. в 2.2 раза больше. Таким образом, есть основания считать оценку

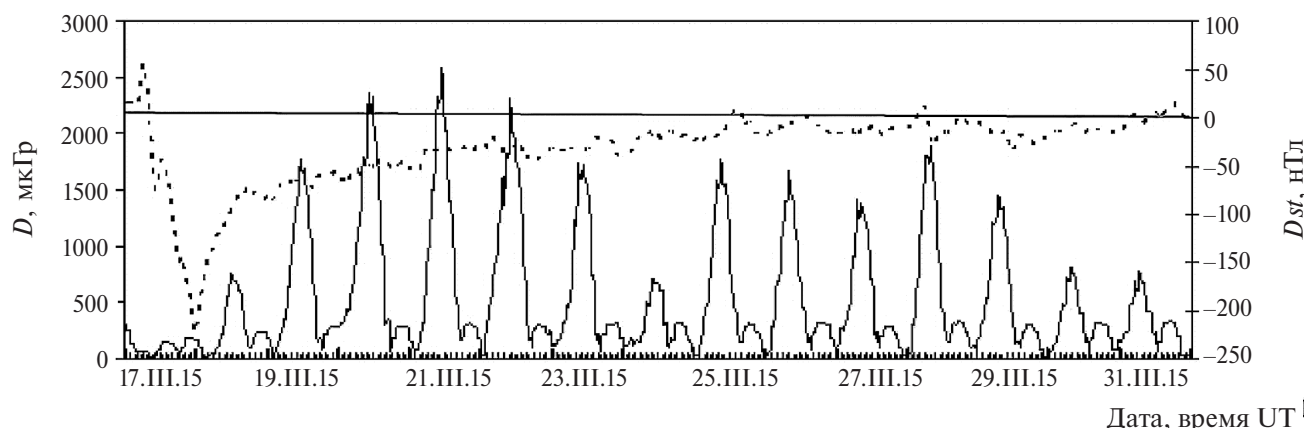


Рис. 3. Зависимость дополнительной поглощенной дозы за ВКД длительностью 6 ч от времени начала ВКД (открытие выходного люка)

дополнительной поглощенной дозы по показаниям прибора R3DR2 заниженной.

2. МЕТОДИКА

Если в эксперименте “Expose-R2” исследование зависимости динамики поглощенной дозы от геофизических параметров можно проводить непосредственно, то в эксперименте НИИЯФ МГУ зафиксировано достаточно большое количество пропусков. В частности, не было ни одного дня, когда бы экспериментальные данные охватывали бы 100 % временной шкалы. Всего измерения проводились 194 дня. На рис. 4 представлена зависимость количества суток в

эксперименте от полноты экспозиционного времени по отношению к суткам.

При обработке информации с прибора ДЭПРОН в работе [4] “исключили из дальнейшего рассмотрения дни с неполной информацией: менее 80 % экспозиционного времени в сутки, и выключения прибора более чем на 30 мин. Оставшиеся данные были откорректированы, чтобы уменьшить влияние на результаты пропадания отдельных участков измерений. Для этого значения суточных доз, полученных для каждой из рассматриваемых зон, делились на долю времени нахождения ИСЗ в зоне, в течение которой данные измерений поступали”.

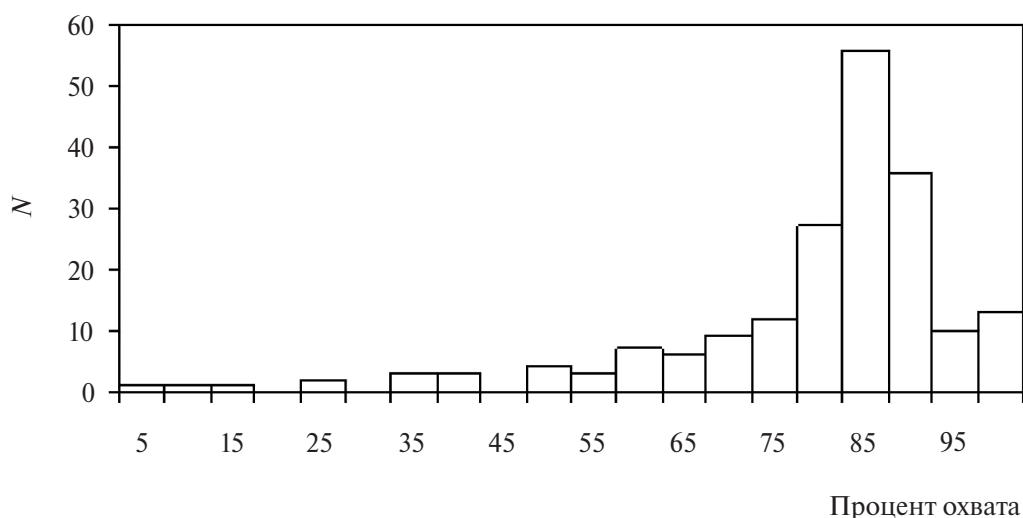


Рис. 4. Зависимость количества суток в эксперименте НИИЯФ МГУ от полноты охвата суточного интервала

Такой подход приводит к потере части информации. Для ее восстановления была проведена следующая процедура. Экспериментальные данные были пересчитаны на значения мощностей поглощенных доз в единицах $\text{мкГр}\cdot\text{ч}^{-1}$ за каждый день. Потом была построена зависимость мощности поглощенной дозы от параметра L (параметр Мак-Илвайна, на геомагнитном экваторе равен расстоянию до центра Земли в радиусах Земли). Шкала значений параметра L принималась в виде:

1. $L < 1.12$;
2. $1.12 < L < 1.13$;
3. $\Delta L = 0.02$ ($1.13 < L < 1.27$);
4. $\Delta L = 0.04$ ($1.27 < L < 1.55$);
5. $\Delta L = 0.1$ ($1.55 < L < 3.05$);
6. $\Delta L = 0.3$ ($3.05 < L < 6.65$);
7. $\Delta L = 0.7$ ($6.65 < L < 10.85$);
8. $\Delta L = 1.3$ ($10.85 < L < 13.45$);
9. $L > 13.45$.

Для каждого интервала ΔL вычислялась средняя мощность поглощенной дозы в интервале значений ΔB с шагом 0.01 Гс. Зависимость средней мощности поглощенной дозы от B

аппроксимировалась экспонентой. В области внутреннего РПЗ аппроксимация экспонентой не выходила за пределы $B = 0.25$ Гс. При этом в зависимости от характера экспериментальных данных, вычислялась либо одна экспонента, либо две. При $B > 0.25$ вычислялось среднее значение мощности поглощенной дозы. В области внешнего РПЗ аппроксимация экспонентой проводилась на всем интервале измерений. На рис. 5 показаны примеры аппроксимаций.

Результаты аппроксимаций вставлялись в массивы экспериментальных данных на места пропусков. Собственные экспериментальные данные сохранялись.

В итоге были определены средние значения мощности поглощенной дозы в каждом интервале ΔL . Сумма ежесекундных значений, деленная на 3600, давала полную поглощенную дозу. На рис. 6 представлены результаты восстановления.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам двух экспериментов анализировалась связь среднесуточной мощности поглощенной дозы D со следующими среднесуточными индексами:

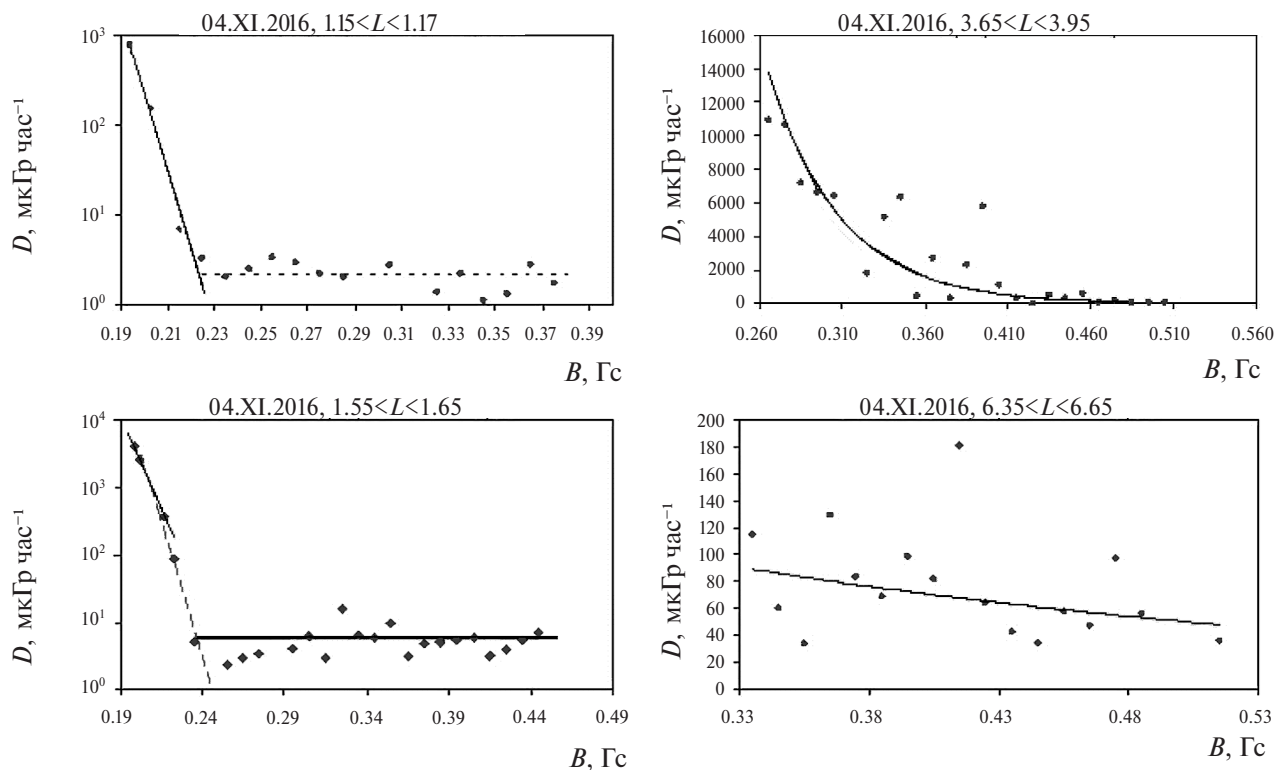


Рис. 5. Аппроксимация усредненных экспериментальных данных: одной экспонентой и константой (1-я сверху слева панель); двумя экспонентами и константой (2-я сверху слева панель); одной экспонентой (1-я сверху справа панель); одной экспонентой при больших значениях L (2-я сверху справа панель)

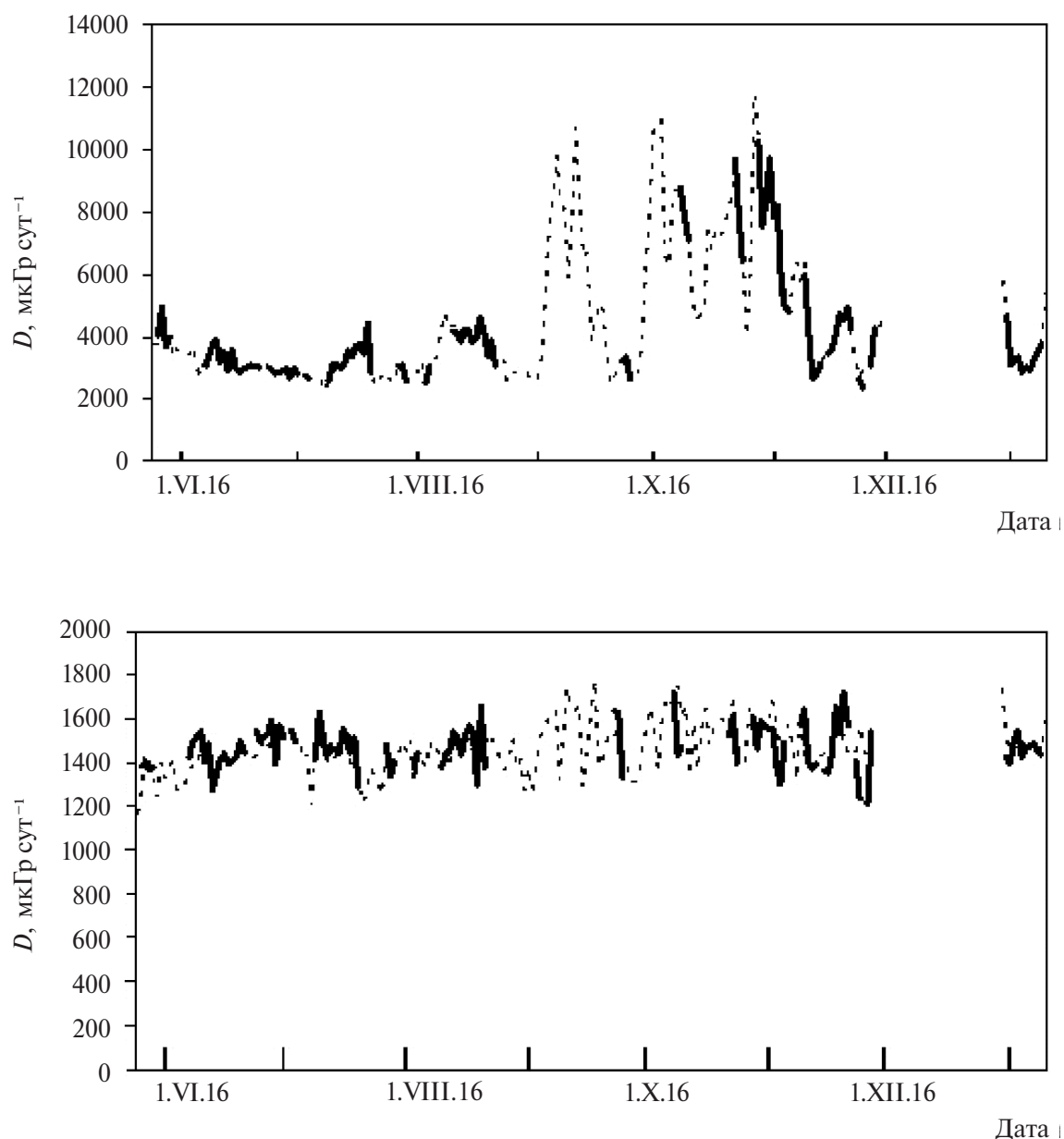


Рис. 6. Динамика поглощенной дозы за защитой $0.45 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ (вверху), за защитой $0.81 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ (внизу). Жирные кривые — результаты НИИЯФ МГУ, пунктирные кривые — результаты настоящей работы

A_p — планетарный геомагнитный индекс, среднесуточная амплитуда возмущения магнитного поля Земли, нТл;

W — число Вольфа;

$F_{10.7}$ — поток радиоизлучения Солнца как звезды на длине волны 10.7 см в единицах $10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$;

Dst — амплитуда горизонтальной составляющей магнитного поля кольцевого тока в нанотеслах;

N_{CB} — плотность протонов солнечного ветра см^{-3} ;

$J_{e>2}$ — плотность потока электронов на геостационарной орбите с энергией больше 2 МэВ, $\text{эл.} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$;

$J_{p>100}$ — плотность потока протонов на геостационарной орбите с энергией больше 100 МэВ, $\text{пр} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$;

$R1$ — расстояние до подсолнечной точки в радиусах Земли.

Численные значения индексов брались из баз данных NOAA (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/dayind/>) и Kyoto Dst Index Service (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>).

Величины коэффициентов корреляции космофизических индексов со среднесуточной мощностью поглощенной дозы представлены в таблице.

Поскольку основным критерием применимости моделей РПЗ является условие $A_p < 15$ [5, 6], рассмотрим корреляционную функцию $R(D, A_p, t)$, где значениями функции являются коэффициенты корреляции. На рис. 7 представлены результаты расчетов. Для $\delta = 0.45 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ максимум корреляции достигается при запаздывании на четверо суток и $\rho(DA_p(-4)) = 0.532$, для $\delta = 0.60 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ максимум корреляции достигается при запаздывании на трое суток и $\rho(DA_p(-3)) = 0.436$ и для $\delta = 0.81 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ максимум корреляции достигается при запаздывании на пять суток и $\rho(DA_p(-5)) = 0.284$. Во всех

случаях коэффициент корреляции больше, чем в таблице.

После возмущения магнитосферы (магнитной бури) потоки электронов в течение нескольких суток восстанавливаются к состоянию, существовавшему до возмущения. В связи с этим определенный интерес представляет рассмотрение зависимости D от средней мощности индекса $A_{p/N}$, где N — период усреднения. На рис. 8 представлена зависимость корреляционной функции $R(D, A_{p/N})$ от N для трех вариантов эксперимента.

Из анализа рис. 8 следует, что максимум корреляции наблюдается при усреднении индекса A_p за разное количество суток. При этом значение коэффициента корреляции для $\delta = 0.45 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ равен $\rho(DA_{p/13}) = 0.77$, для $\delta = 0.60 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ $\rho(DA_{p/12}) = 0.64$ и для $\delta = 0.81 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ $\rho(DA_{p/21}) = 0.43$, что заметно больше данных таблицы.

Построение аналогичной зависимости для Dst -вариации приводит к результатам, представленным на рис. 9.

Таблица. Коэффициенты корреляции ρ космофизических индексов со среднесуточной мощностью поглощенной дозы в различных экспериментах

$\delta \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$	A_p	W	$F_{10.7}$	Dst	N_{CB}	$J_{e>2}$	$J_{p>100}$	$R1$
0.60	0.204	−0.213	−0.272	−0.283	0.047	0.456	0.064	−0.113
0.45	0.046	−0.340	0.035	0.124	0.178	0.603	0.013	−0.102
0.81	−0.162	−0.033	0.016	−0.012	0.305	0.278	−0.011	−0.128

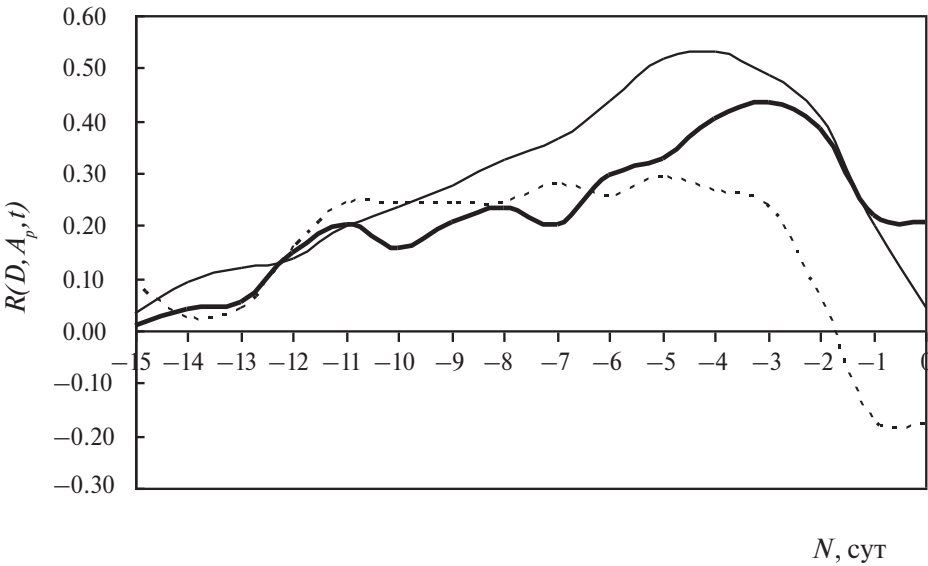


Рис. 7. Корреляционные функции $R(D, A_p, t)$. Тонкая кривая для $\delta = 0.45 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, жирная для $\delta = 0.60 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, пунктирная для $\delta = 0.81 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$

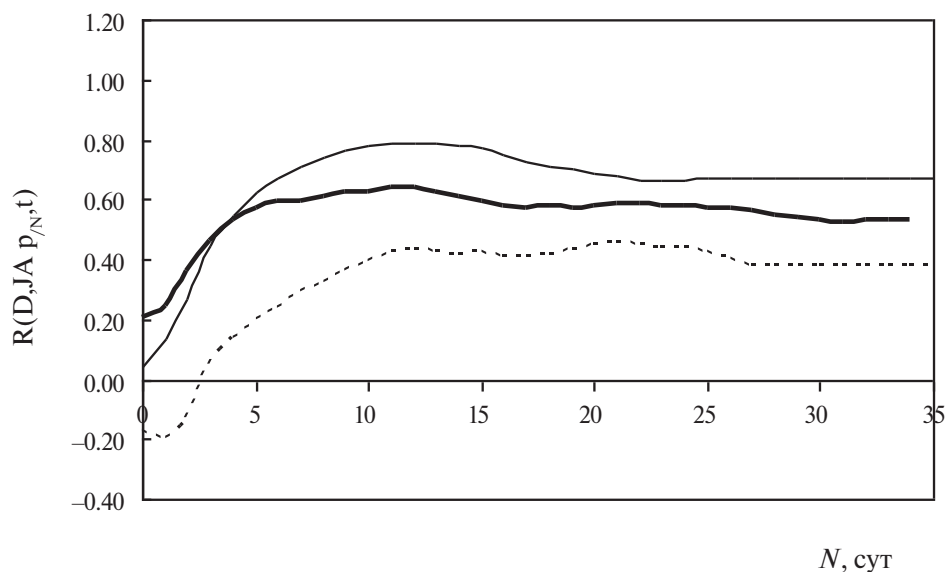


Рис. 8. Корреляционная функция $R(D, A_{p/N}, t)$. Тонкая кривая для $\delta = 0.45 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, жирная для $\delta = 0.60 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, пунктирная для $\delta = 0.81 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$

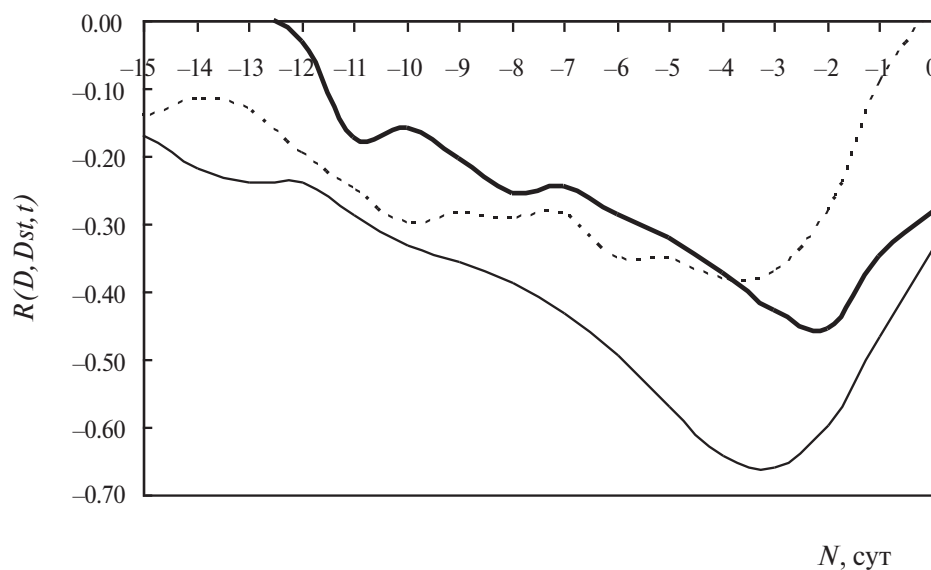


Рис. 9. Корреляционная функция $R(D, D_{st}, t)$. Тонкая кривая для $\delta = 0.45 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, жирная для $\delta = 0.60 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, пунктирная для $\delta = 0.81 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$

Для $\delta = 0.45 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ максимум корреляции достигается при запаздывании на трое суток и $\rho(DD_{st}(-3)) = -0.659$, для $\delta = 0.60 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ максимум корреляции достигается при запаздывании на двое суток и $\rho(DA_p(-2)) = -0.454$ и для $\delta = 0.81 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ максимум корреляции достигается при запаздывании на трое суток и $\rho(DD_{st}(-3)) =$

-0.378 . Во всех случаях коэффициент корреляции больше, чем в таблице.

Максимальная величина коэффициента корреляции по данным таблицы получена для $J_e > 2$ — плотности потока электронов на геостационарной орбите с энергией больше 2 МэВ, эл. $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$. Зависимость коэффициента

корреляции $\rho(DJ_e > 2)$ от времени представлена на рис. 10.

В данном случае максимальный коэффициент корреляции наблюдается либо при 0 сут, либо при 1. Для $\delta = 0.45 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ максимум корреляции достигается при запаздывании на одни сутки и $\rho(DJ_{e>2}(-1)) = 0.651$, для $\delta = 0.60 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ максимум корреляции достигается при запаздывании на 0–1 сут и $\rho(DJ_{e>2}(-1)) = 0.456$ и для $\delta = 0.81 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ максимум корреляции достигается при запаздывании на трое суток и $\rho(DJ_{e>2}(-1)) = 0.370$. Во всех случаях коэффициент корреляции больше, чем в таблице.

Эксперимент “Expose-R2” отличался от эксперимента ДЭПРОН тем, что в первом случае были зафиксированы три магнитные бури со среднесуточным значением $-D_{ST} > 100 \text{ нТл}$ (часовые значения достигали значений 223, 204 и 170 нТл). При этом наблюдаются возрастания среднесуточной мощности поглощенной дозы в области внутреннего РПЗ и в области щели. Во втором случае среднесуточные значения $-D_{ST}$ не превышали 50 нТл и возрастания дозы отмечены только в области внешнего РПЗ. После сильных магнитных бурь процесс восстановления мощности поглощенной дозы можно описать экспонентой с постоянной спада 12–14 сут. На рис. 11 представлены примеры динамики среднесуточной мощности поглощенной дозы.

Для рассмотренных индексов были определены коэффициенты корреляции между среднесуточной мощностью поглощенной дозы и каждым индексом в указанных диапазонах L -координаты. Хотя для разных экспериментов “Expose-R2” и ДЭПРОН длительность запаздывания индексов относительно мощности поглощенной дозы разная, были рассмотрены одинаковые условия: A_p — на трое суток, D_{ST} — на двое суток, J_e — на одни сутки, $A_{p/N}$ — для $N = 13$. Была выявлена нелинейная зависимость от L -координаты. Далее были найдены уравнения линейной регрессии для каждого диапазона L -координаты, для каждого индекса.

Были проверены различные условия обработки:

- исходные индексы со своим запаздыванием;
- при выполнении любого условия $A_p(-3) > 15$, $A_{p/13} > 10$, $Dst(-2) < -10$, $J_e(-1) > 5 \cdot 10^7$;
- при исключении дней с нарушением предыдущих условий;
- при сглаживании экспериментальных данных фильтром: $D_i = \frac{1}{9}(D_{i-2} + 2D_{i-1} + 3D_i + 2D_{i+1} + D_{i+2})$, где i — номер суток.

Во всех случаях характер зависимости коэффициентов линейной регрессии от L -координаты сохранялся, менялась лишь величина коэффициента. Обнаружено одно существенное различие между результатами обработки эксперимента

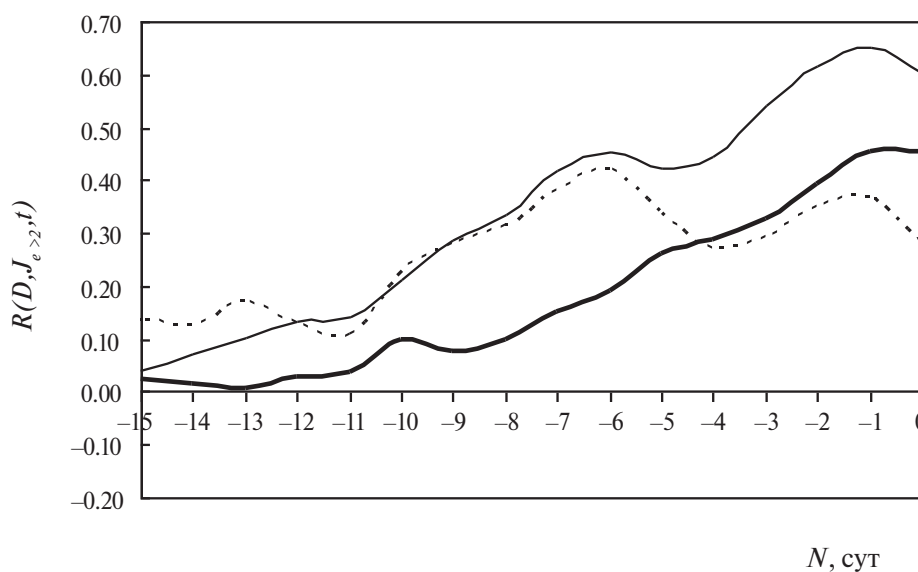


Рис. 10. Корреляционная функция $R(D, J_e > 2)$. Тонкая кривая для $\delta = 0.45 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, жирная для $\delta = 0.60 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, пунктирная для $\delta = 0.81 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$

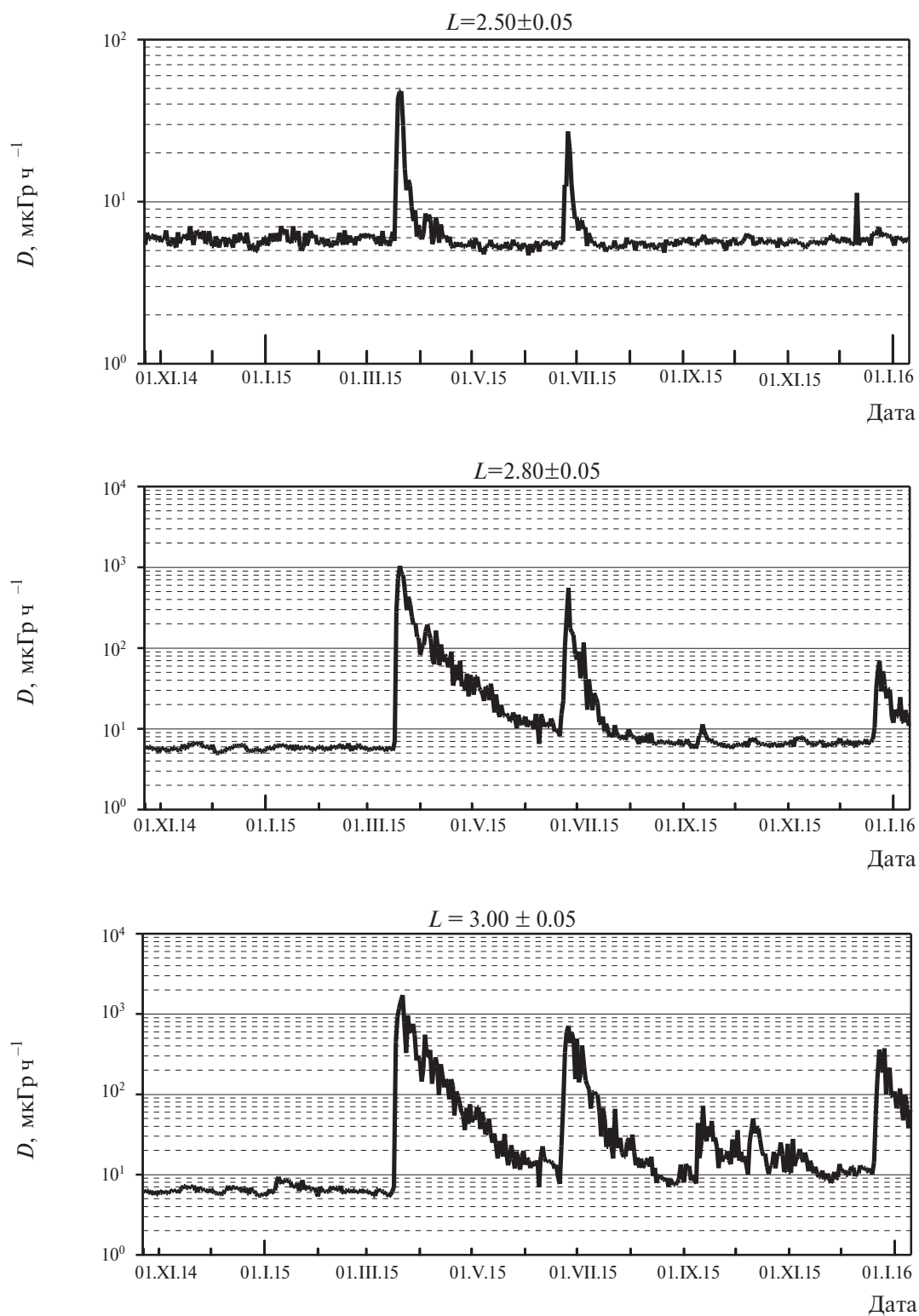


Рис. 11. Динамика среднесуточной мощности поглощенной дозы в различных диапазонах L -координаты

“Expose-R2” и эксперимента ДЭПРОН, а именно в первом случае из-за наличия мощных бурь в зависимостях коэффициентов регрессии от

L -координаты проявляется максимум при $L \approx 3$. Если из экспериментальных данных “Expose-R2” исключить дни (по 13 сут) после мощных бурь,

и заново определить коэффициенты регрессии, то получим такие же зависимости, как в эксперименте ДЭПРОН. На рис. 12 представлены зависимости коэффициентов линейной регрессии от L -координаты, при этом в эксперименте “Expose-R2” исключены дни после мощных магнитных бурь. Для удобства сравнений для индекса $J_e(-1)$ коэффициенты регрессии даны с множителем 10^8 .

Из анализа полученных данных следует, что максимумы кривых очень близки друг к другу. Зависимости коэффициентов линейной регрессии от L -координаты хорошо аппроксимируются нормальным распределением до $L = 4.7$. Среднее значение положения максимума $L_{cp} = 4.10 \pm 0.15$, стандартное отклонение $\sigma = 0.40 \pm 0.07$. При $L > 4.7$ зависимости становятся степенными. Для $\delta = 0.45 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ показатель степени равен -11 для всех рассмотренных индексов, для $\delta = 0.45 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ показатель степени равен -8 . Для $\delta = 0.60 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ показатель степени определить достаточно трудно, поскольку экспериментальные данные обрываются при $L > 6.0$. Если учитывать вклад мощных магнитных бурь, то добавляется нормальное распределение с

такими характеристиками: $L_{cp} = 3.0$ и $\sigma = 0.22$. В предположении, что если бы в период проведения эксперимента ДЭПРОН была бы мощная магнитная буря, то также было бы зафиксировано смещение максимумов кривых в область $L_{cp} = 3.0$. Для определения зависимости амплитуды дополнительного распределения от толщины защиты (от энергии электронов, проходящих через защиту с энергией, достаточной для регистрации в детекторе) была построена соответствующая кривая. Результаты восстановления представлены на рис. 13.

В 2024 г. отмечены два события 11.V.2024 и 11.X.2024, когда среднечасовые значения Dst -вариации достигали значений в 412 и 341 нТл. Как менялась после этого радиационная обстановка в областях РПЗ неизвестно. Приведет ли такая буря к дополнительному возрастанию потоков электронов или к смещению максимумов рассмотренных кривых в область меньших L ? Новая РОС на каждом витке будет дважды попадать в область внешнего РПЗ. Общее время нахождения станции в областях внешнего РПЗ достигнет 40 %. Хорошим способом контроля радиационной обстановки в период максимума солнечной

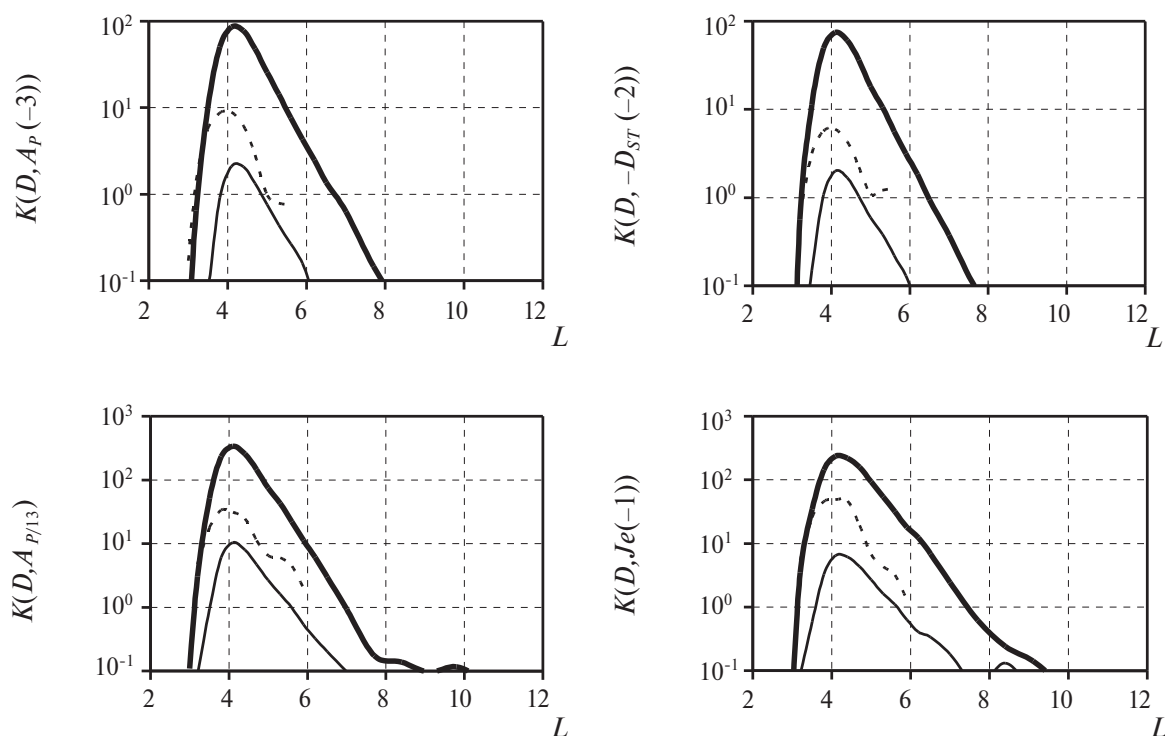


Рис. 12. Зависимости коэффициентов линейной регрессии от L -координаты для периодов без мощных магнитных бурь. Жирные кривые — эксперимент ДЭПРОН для $\delta = 0.45 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, пунктирные кривые — эксперимент “Expose-R2” для $\delta = 0.60 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, тонкие кривые — эксперимент ДЭПРОН для $\delta = 0.81 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$

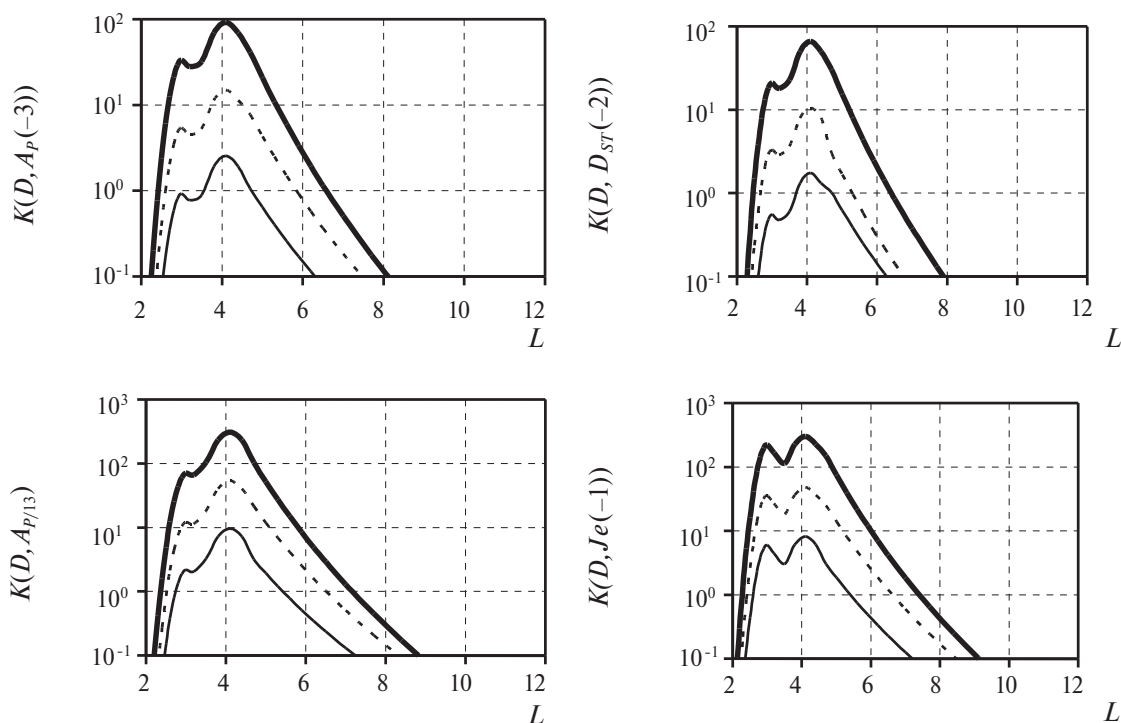


Рис. 13. Восстановленные зависимости коэффициентов линейной регрессии от L -координаты. Черные кривые — эксперимент ДЭПРОН для $\delta = 0.45 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, красные кривые — эксперимент “Expose-R2” для $\delta = 0.60 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, синие кривые — эксперимент ДЭПРОН для $\delta = 0.81 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$

активности перед проведением ВКД было бы размещение на внешней поверхности станции дозиметра типа ДЭПРОН с толщиной защиты детектора $\sim 0.6\text{--}0.7 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$. Такой дозиметр помог бы также в научном плане исследования динамики электронов при возмущениях геомагнитной обстановки.

Обнаруженные закономерности запаздывания дозы относительно геомагнитных индексов могут помочь в разработке методики учета влияния геомагнитных возмущений на поглощенную дозу за малой защитой от электронов РПЗ. Пока такой методики нет, при разработке полетных правил для РОС необходимо будет после сильных геомагнитных бурь откладывать проведение ВКД. Методика учета влияния геомагнитных возмущений на поглощенную дозу за малой защитой от электронов РПЗ должна помочь в определении срока, за который уровень поглощенных доз снизится до приемлемых значений. Будет этот срок 14 сут или больше — зависит от мощности бури. Также кажется необходимым учитывать вероятность повторных геомагнитных бурь в период восстановления РПЗ после первой бури.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках плана фундаментальных исследований ГНЦ РФ — ИМБП РАН по теме FMFR-2024-0036.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозова Е.И., Безродных И.П., Семенов В.Т. Радиационные факторы риска для космических аппаратов // Вопросы электромеханики. 2009. Т. 112. С. 35–40.
2. Митрикас В.Г. Модель защищенности обитаемых отсеков служебного модуля международной космической станции для оценки радиационной опасности // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2006. Т. 38. № 3. С. 41–47.
3. Deme S., Apathy I., Hejja I. et al. Extra dose due to extravehicular activity during the NASA-4 mission measured an on-board TLD system // Radiation Protection Dosimetry. 1999. V. 85(1–4). P. 121–124.
4. Золотарев И.А. Определение радиационной нагрузки в космическом аппарате при полете по высокоширотной орбите: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.03.03 / Золотарев Иван Анатольевич. М., 2022. 114 с.

5. ГОСТ 25645.138. Пояса Земли радиационные естественные. Модель пространственно-энергетического распределения плотности потока протонов. М.: Изд. стандартов, 1987. 50 с.
6. ГОСТ 25645.139. Пояса Земли радиационные естественные. Модель пространственно-энергетического распределения плотности потока электронов. М.: Изд. стандартов, 1987. 135 с.

SOME FEATURES OF THE FORMATION OF ABSORBED DOSE BEHIND THIN SHIELDINGS IN THE EARTH'S RADIATION BELTS

© 2025 V. G. Mitrikas

*Institute of Medical and Biological Problems of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

e-mail: vg_mit@imbp.ru

In this paper, the correlation of the Earth's Radiation Belts electron doses in low near-Earth orbit behind a small shield with the average indicators of the Earth's magnetosphere state during periods of geomagnetic disturbances is shown and analyzed. The results of the "Expose-R2" experiment on the ISS and "DEPRON" on the "Lomonosov" satellite (SINP MSU) are considered. In the "Expose-R2" experiment on the ISS, the absorbed dose behind the shield at 0.6 g cm^{-2} was measured every 10 seconds. In the "DEPRON" experiment, the absorbed dose behind the shield at 0.45 g cm^{-2} and 0.81 g cm^{-2} was measured every second. Due to a large number of measurement gaps in the "DEPRON" experiment, a procedure for restoring the experimental data is proposed. Based on the data obtained, correlations between the average daily absorbed dose rate and various cosmophysical indices in fixed ranges of L -coordinate variations (the McIlwain parameter, at the geomagnetic equator equal to the distance to the Earth's center in Earth radii) are considered. It is shown that after geomagnetic disturbances, the linear regression coefficients between the absorbed dose rate and the considered geophysical indices have a uniform dependence on the L -coordinate. For magnetic storms with $Dst < 100 \text{ nT}$, the dependences of the linear regression coefficients on the L -coordinate are well approximated by a normal distribution up to $L = 4.7$. The average value of the maximum position $L_{av} = 4.10 \pm 0.15$, standard deviation $\sigma = 0.40 \pm 0.07$. For magnetic storms with $Dst > 100 \text{ nT}$, the distribution maximum shifts to $L_{av} = 3.0$ and $\sigma = 0.22$.