

УДК 537.591.5

ДИНАМИКА РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ В СЕНТЯБРЕ–НОЯБРЕ 2020 ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ *МЕТЕОР-М* И *ЭЛЕКТРО-Л*

© 2021 г. И. Н. Мягкова¹*, А. В. Богомолов¹, В. Е. Еремеев¹, А. О. Ширяев^{1,2}, Е. А. Гинзбург³

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

³Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова, Москва, Россия

*irina@sdr.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 01.03.2021 г.

После доработки 12.05.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

Представлены результаты сравнительного анализа данных российских спутников по радиационной обстановке в околоземном пространстве в течение сентября–ноября 2020 г. Источником вариаций потоков и спектров электронов внешнего радиационного пояса Земли в это период являлись высокоскоростные потоки солнечного ветра из корональной дыры. Обсуждаются различия реакции внешнего радиационного пояса Земли на рекуррентные геомагнитные возмущения на каждом из оборотов Солнца.

DOI: 10.31857/S0023420621060078

ВВЕДЕНИЕ

Основное влияние на динамику радиационных условий в околоземном космическом пространстве (ОКП) в периоды минимума солнечной активности (СА) оказывают частицы внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ) – захваченные магнитным полем Земли электроны релятивистских и субрелятивистских энергий. Это обусловлено тем, что основной источник другой популяции, представляющей радиационную опасность в ОКП – солнечных космических лучей – связан с солнечными вспышками, которые в минимуме солнечной активности отсутствуют. Поэтому в периоды минимумов СА потоки электронов ВРПЗ определяют радиационные условия в ОКП, в т. ч. на геостационарных орбитах. Релятивистские электроны могут негативно влиять на работу спутников, поскольку высокие уровни потоков релятивистских электронов с большой вероятностью повреждают чувствительные электронные компоненты спутников [1–4]. Причем в условиях дальнейшей миниатюризации электроники на КА негативное влияние РЭ будет только возрастать. Оперативный мониторинг радиационных условий и прогнозирование радиационного состояния ОКП позволяют предупредить опасные последствия изменений в радиационной обстановке [5]. Следовательно, новые экспериментальные данные о динамике радиаци-

онных условий на разных орбитах представляют не только научный, но и практический интерес.

Как известно, потоки электронов ВРПЗ чувствительны к геомагнитным возмущениям вне зависимости от их природы. Источниками возмущений могут быть как корональные выбросы массы (КВМ), связанные с солнечными вспышками, так и высокоскоростные потоки солнечного ветра (ВСП СВ) [6]. В период минимума СА более актуальными становятся магнитные бури, вызванные ВСП СВ из корональных дыр (КД). Из многочисленных экспериментов известно, что в большинстве случаев на главной фазе магнитной бури происходит резкое падение потоков релятивистских электронов ВРПЗ, вплоть до полного исчезновения [7]. Затем примерно в половине случаев бурь потоки возрастают до уровня выше добуревого, иногда на несколько порядков, примерно в одной четверти случаев восстанавливаются до добуревого уровня, в оставшейся четверти случаев – восстанавливаются не полностью, оставшаяся на уровне ниже добуревого [8–10].

Целью данной работы является сравнительный анализ данных российских КА, находящихся на геостационарной и круговых полярных орбитах, полученных во второй половине 2020 г. Исследовались вариации потоков электронов ВРПЗ, происходившие с сентября по ноябрь 2020 г. в результате рекуррентных геомагнитных возмуще-

Таблица 1. Состав измерений потоков заряженных частиц, пороговые энергии или диапазоны энергий, космические аппараты

	Зарядовые составляющие	Энергии, МэВ		Спутник
		электроны	протоны	
1	Электроны + протоны	>0.15	>5	<i>Метеор-М № 2</i> , <i>Метеор-М № 2-2</i>
2		>0.7	>15	
3		>1.7	>25	
4	Электроны + протоны	>0.1	0.8–1	<i>Метеор-М № 2</i>
5	Электроны	>0.3	–	
6	Электроны	>2	–	
7	Электроны + протоны	>0.6	>1.6	<i>Электро-Л № 2</i>
8	Электроны	>2	–	<i>GOES16</i>

ний, вызванных, в свою очередь, воздействием высокоскоростного потока солнечного ветра из северной корональной дыры в течение трех оборотов Солнца. Также рассматривалась способность российской группировки КА, имеющих разные орбиты, обеспечивать надежный мониторинг радиационной обстановки в ОКП.

ИСТОЧНИКИ И СОСТАВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В настоящей работе использовались данные о потоках электронов с низкоорбитальных метеорологических спутников РФ *Метеор-М № 2* (запущен 8.VII.2014) и *Метеор-М № 2-2* (запущен 5.VII.2019), а также геостационарных спутников *GOES16* (США, запущен 19.XI.2016) и *Электро-Л № 2* (РФ, запущен 11.XII.2015).

Орбиты спутников *Метеор-М № 2* и *Метеор-М № 2-2* солнечно-синхронные, высота в восходящем узле $h = 832$ км, наклонение $i \sim 98.8^\circ$, период обращения $T = 101.3$ мин, орбита *Электро-Л № 2* — точка стояния 76° в.д., с сентября 2020 — 14.5° з.д., высота орбиты — 36000 км, наклонение — не более 0.5° .

Электроны релятивистских и субрелятивистских электронов регистрировались с помощью гейгеровских счетчиков (пороговые энергии 0.7 и 1.7 МэВ), и телескопической сборки из полупроводниковых и сцинтилляционного детекторов (пороговые энергии 100, 300 и 700 кэВ). На спутниках *Метеор-М № 2* было установлено два набора телескопов с углами обзора в 30° — по вектору скорости спутника (ось X спутника) и в перпендикулярном направлении в сторону открытого космоса (ось Z). На средних широтах, близких к положению широты максимума внешнего пояса, направление осей телескопов занимают промежуточное положение между направлением вдоль силовой линии и нормалью к ней. Тем не менее, направление оси X ближе к направлению нормали к силовой линии, чем направление оси Z . Поэтому, с учетом относительно узкого угла обзора, телескоп вдоль оси X регистрирует захва-

ченные частицы. Поэтому в данной работе мы использовали показания телескопа, смотрящего по оси X .

Основные измерительные характеристики использованных приборов приведены в табл. 1.

ИСТОЧНИКИ ВОЗМУЩЕНИЙ И УСЛОВИЯ В ОКОЛОЗЕМНОМ МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Как уже было сказано выше, процессы, происходящие в ОКП магнитосфере Земли, тесно связаны между собою, что делает необходимым рассмотрение условий, в которых осуществлялись наблюдения, а также источников вариаций потоков электронов ВРПЗ.

На рис. 1 приведены временные зависимости наиболее существенных параметров, влияющих на вариации потоков электронов внешнего радиационного пояса (ВРПЗ) — модуль B и B_z -компоненты вектора магнитной индукции межпланетного магнитного поля (ММП), а также плотности и скорости солнечного ветра в период с сентября по ноябрь 2020. Как можно заметить, в указанный период времени трижды регистрировались высокоскоростные потоки солнечного ветра (ВСП СВ). Источником этих возрастаний стала квазистационарная северная корональная дыра, наблюдавшаяся на Солнце с августа по декабрь 2020. Также из рис. 1 видно, что скорость ВСП СВ во всех трех возрастаниях не превышает 700 км/с, а отрицательное значение B_z держится не слишком долго, что заставляет ожидать небольшую амплитуду рекуррентных геомагнитных возмущений. Заштрихованные области — это рассматриваемые нами интервалы возмущений.

На верхней панели рис. 2 приведены временные зависимости геомагнитных индексов K_p и Dst , характеризующие рекуррентные возмущения, вызванных приходом к Земле ВСП СВ. Видно, что геомагнитное возмущение с максимальной амплитудой наблюдалось после сентябрьского возрастания скорости потока СВ, когда максимальная амплитуда Dst -вариации рав-

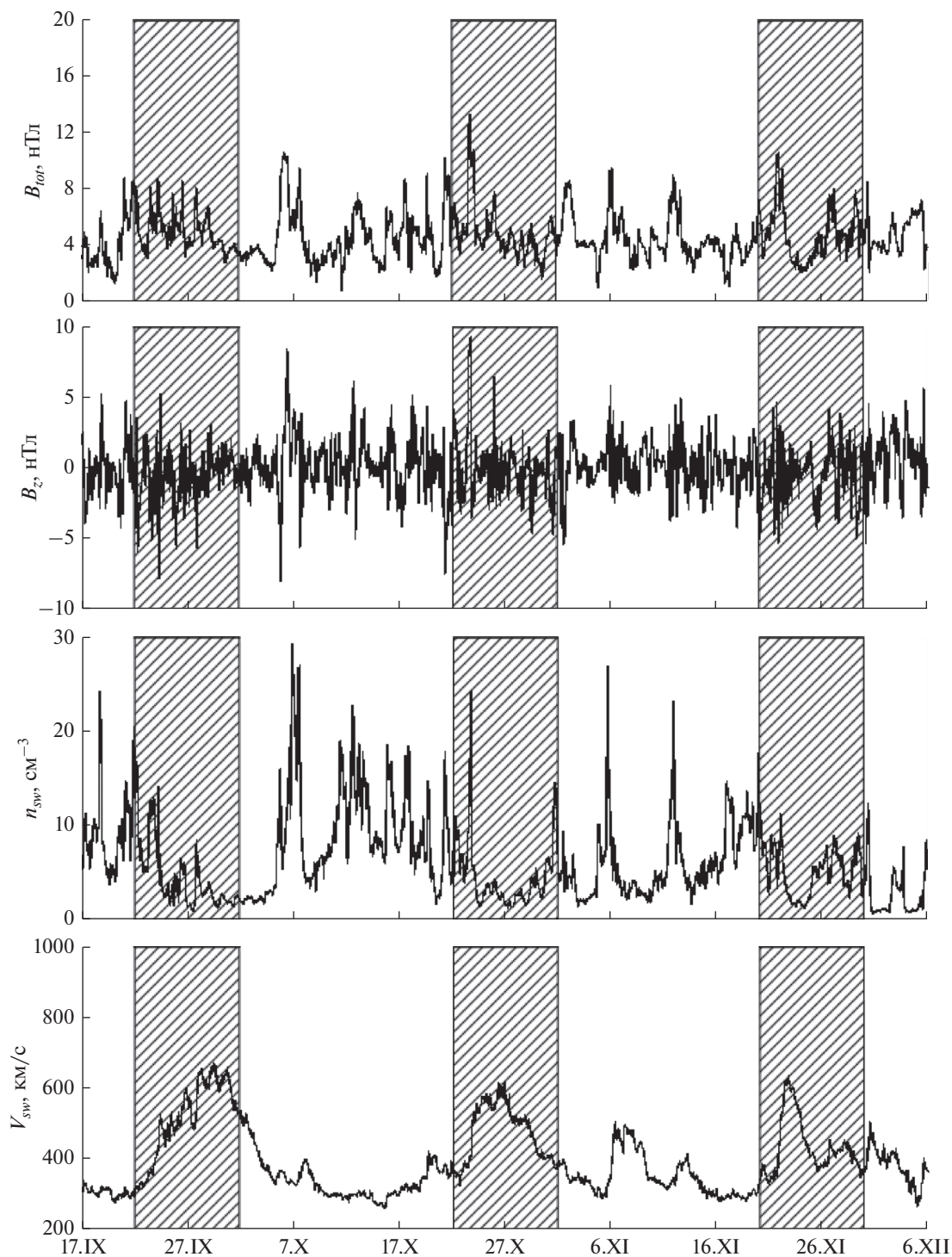


Рис. 1

нялась -57 нТ, а Kp -индекс = 6-. Также видно, что во всех трех случаях, геомагнитные возмущения не имели единственной, четко выраженной главной фазы бури, а состояли из нескольких активаций. Мы предполагаем, что такой характер возмущений может быть связан со сложной про-

странственной структурой корональной дыры, являвшейся источником всех трех ВСП СВ.

Мы ограничились демонстрацией вариаций Dst и Kp -индекса, поскольку анализ буревых вариаций потоков электронов внешнего РПЗ выполнен на довольно грубой временной шкале —

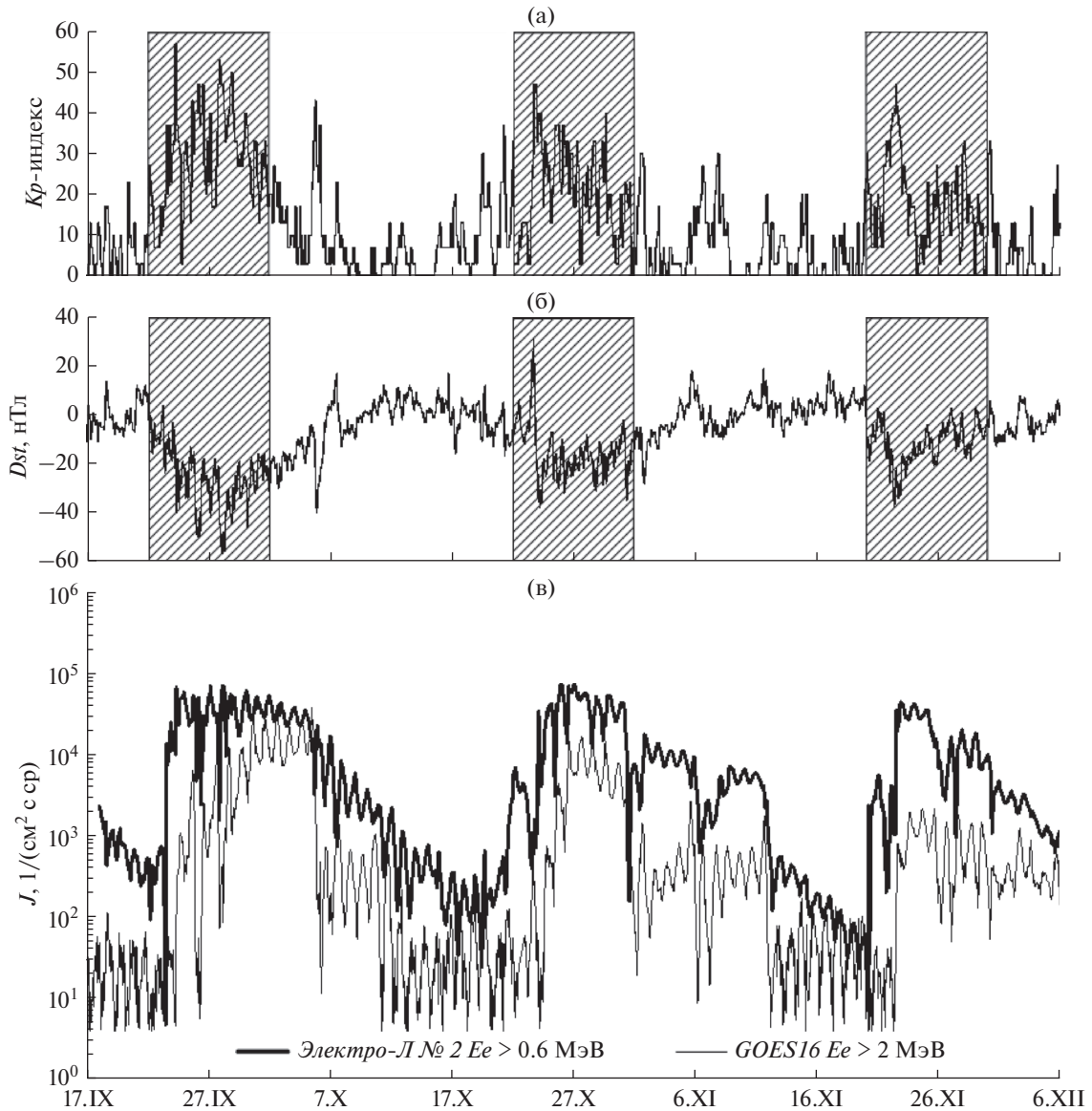


Рис. 2

несколько дней для каждого из трех событий. На этой временной шкале вариации Kp и авроральных индексов $AE-AL$ носят сходный характер. Авроральные индексы может дать существенные результаты только при исследованиях мелко-масштабных вариаций потоков частиц (например, высыпаний) в областях близких ко внешней границе внешнего пояса, что планируется нами сделать в последующих работах.

На нижней панели рис. 2 представлен временной ход релятивистских и субрелятивистских электронов на геостационарной орбите по данным *GOES16* (>2 МэВ) и *Электро-Л № 2* — >600 кэВ.

На нижней панели рис. 2 хорошо видны три последовательных возрастания потоков электронов ВРПЗ. Также заметны их отличия — напри-

мер, что первое возрастание, вызванное более сильной магнитной бурей, привело к более интенсивному возрастанию потоков релятивистских электронов (>2 МэВ). Также видно, что возрастания потоков электронов субрелятивистских энергий (>600 кэВ) начинаются раньше, чем релятивистских, что отмечалось и в ранних работах [7, 11].

Потоки электронов субрелятивистских (>100 кэВ) и релятивистских (>2 МэВ) ВРПЗ, регистрировавшиеся в эксперименте на ИСЗ *Метеор-М № 2*, имевшим круговую полярную орбиту и за счет этого пересекавшие разные L -оболочки, представлены на рис. 3.

Рис. 3 отражает вариации не только интенсивности, которая показана цветом в полутонной

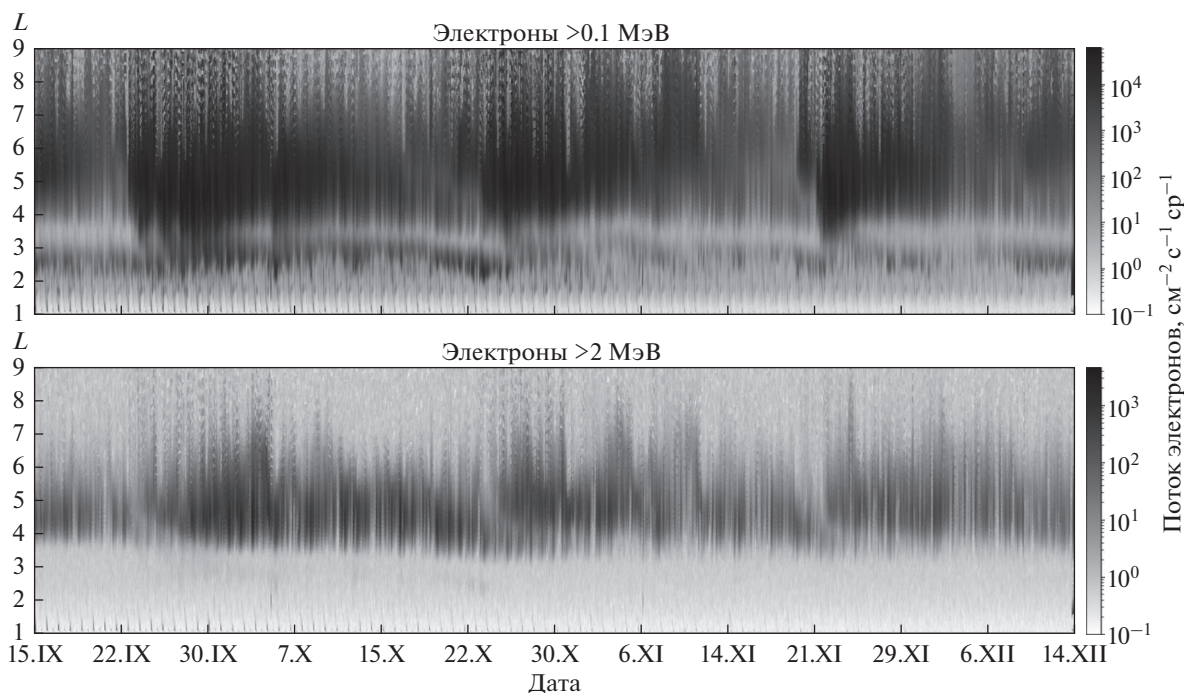


Рис. 3. Вариации потоков электронов субрелятивистских (>100 кэВ) и релятивистских (>2 МэВ) энергий ВРПЗ по данным ИСЗ *Meteo-p-M № 2* с 15.IX по 14.XII.

шкале, но и пространственного распределения частиц ВРПЗ разных энергий. Мы видим, что отмеченные выше для геостационарной орбиты более интенсивные и более длительные возрастания потоков электронов релятивистских энергий наблюдаются и на малых высотах.

Рассмотрим более подробно каждый из трех периодов геомагнитных возмущений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ВРПЗ НА МАЛЫХ ВЫСОТАХ

Как уже было сказано выше, из трех рассмотренных событий, сентябрьское было наиболее интенсивным. Поток высокоскоростного СВ вызвал умеренную геомагнитную бурю, которая в свою очередь привела к вариациям потоков электронов ВРПЗ. На верхней панели показаны вариации потоков релятивистских электронов (>2 МэВ) вдоль орбиты *Meteo-p-M № 2*. На рисунке хорошо видно, как на фазе восстановления бури поток электронов с энергией >2 МэВ постепенно возрастает на всех L -оболочках от 3 до 7, вплоть до 5.X, когда после небольшого возмущения ($Kp = 4$) происходит резкое падение потока электронов не только на геостационарной орбите (см. рис. 2), но и на малых высотах.

На нижней панели рис. 4, показывающей временной ход геомагнитных индексов Dst и Kp , стрелками отмечены моменты времени, для которых далее на рис. 5 приведены профили — зависи-

мости от L -оболочки величин потоков электронов разных энергий, полученные для вечерних значений локального времени.

При построении профилей потоков электронов разных энергий фоновым считался профиль за 19.IX (толстая сплошная линия). Из рис. 5 видно, что максимумы пояса для электронов >700 кэВ и >1.7 МэВ наблюдались на $L = 4.5$ и 4.3 , соответственно.

23.IX (тонкая сплошная линия) мы наблюдаем небольшое возрастание и сдвиг в область более высоких L пояса для электронов >150 кэВ, небольшое падение потока >700 кэВ-ных электронов и практически полное исчезновение пояса релятивистских электронов (>1.7 МэВ), аналогично тому, как это наблюдалось в других экспериментах [7]. Для профилей 24.IX (частые точки) наблюдается рост и расширение пояса 150 кэВ-ных электронов, дальнейшее падение потоков 700 кэВ-ных в области старого максимума и начало формироваться новый максимум на $L = 4.9$.

Далее 25.IX (пунктирная линия) профиль пояса электронов с энергией >150 кэВ изменился мало, рост потока частиц >700 кэВ продолжился, и их новый максимум на $L = 4.9$ расширился, у релятивистских электронов начал формироваться новый максимум также на $L = 4.9$. В данных по КА *Meteo-p-M № 2-2* имелся пропуск 26.IX, 27.IX и 28.IX, 29.IX.2020 (показано штрихпунктирной линией) мы наблюдаем существенное возраста-

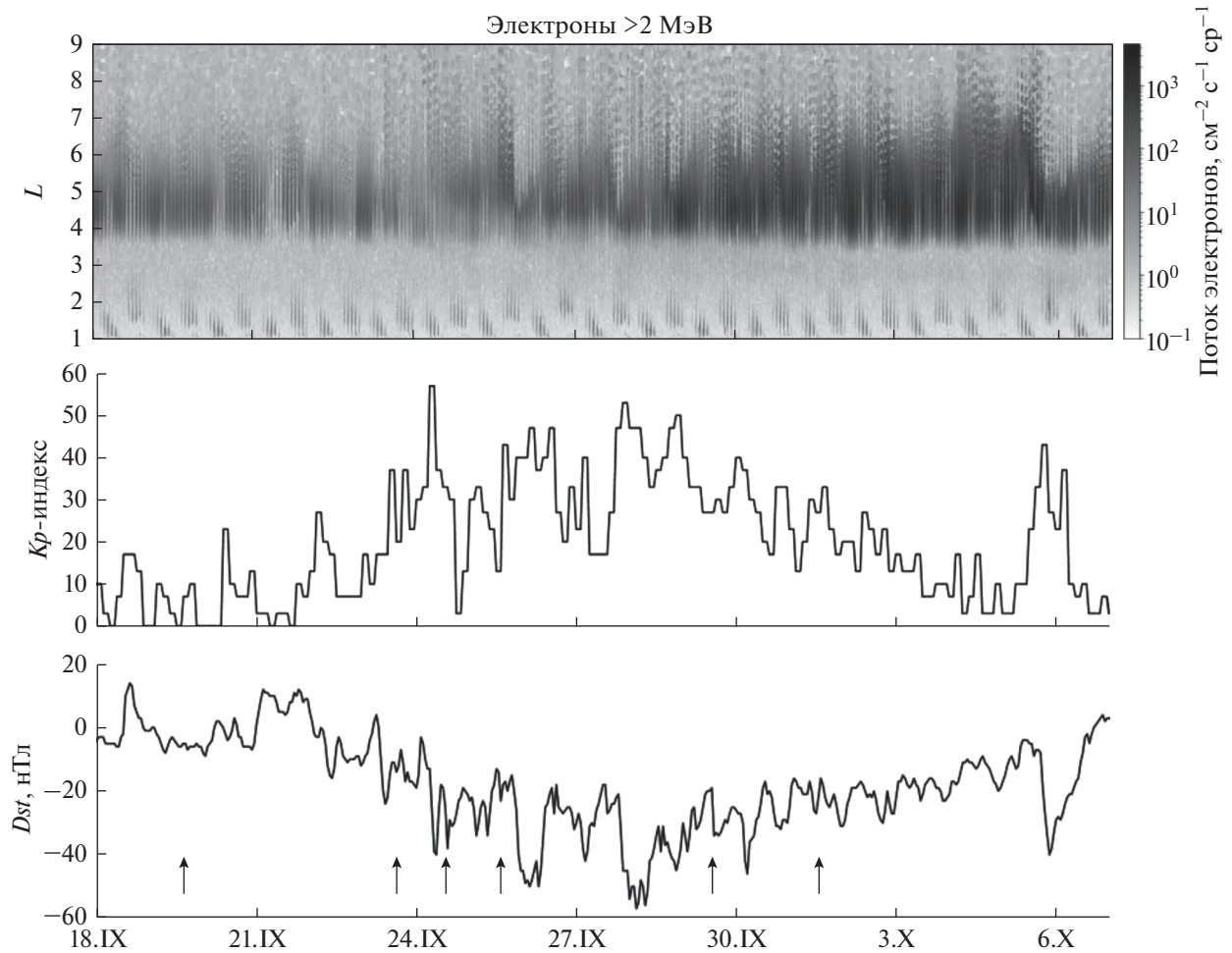


Рис. 4. Временные зависимости с 18.IX по 7.X потоков электронов релятивистских (>2 МэВ) энергий по данным ИСЗ Метеор-М № 2 (а), геомагнитных индексов K_p и Dst (б).

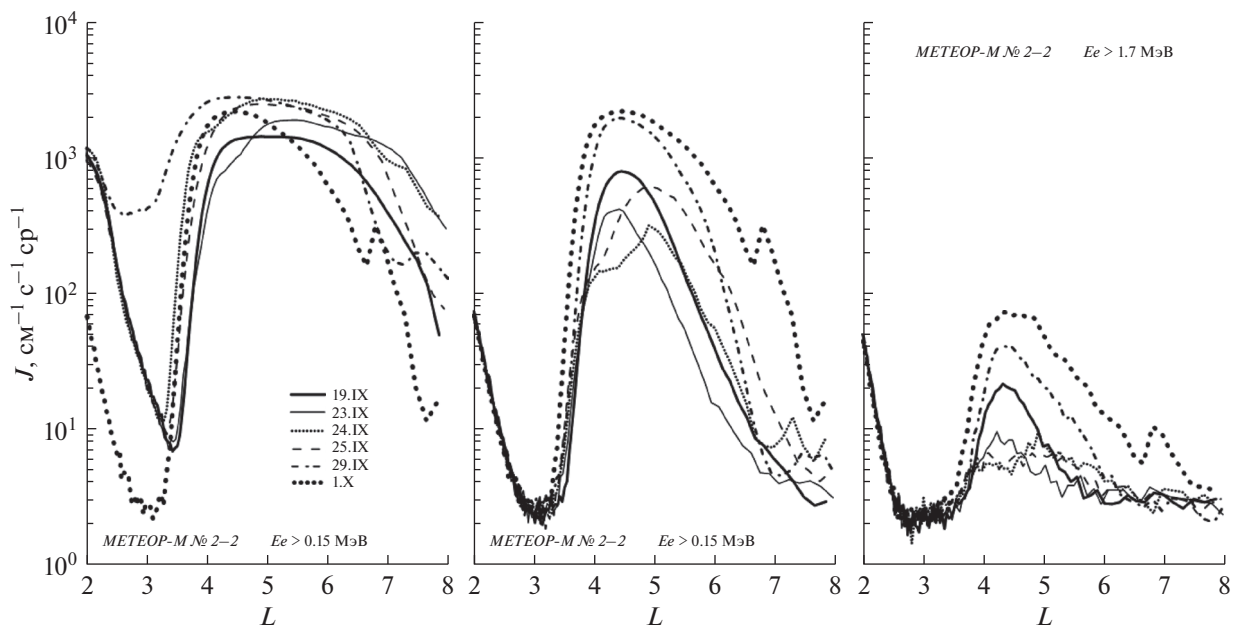


Рис. 5. Профили внешнего радиационного пояса для электронов >150 кэВ (а), >700 кэВ (б), >1.7 кэВ (в) во время геомагнитного возмущения 23–30.IX.

ние потоков >700 кэВ-ных и >1.7 МэВ-ных электронов, а также расширение области захваченной радиации по сравнению не только с состоянием 25.IX, но и с добуравым поясом. Интенсивность потока >150 кэВ-ных электронов также возросла по сравнению с добуравым состоянием, заполнился зазор между поясами, полярная граница сдвинулась на более высокие L -оболочки. Профиль, полученных 1.X (жирные точки) показывает продолжающуюся тенденцию роста потоков электронов с энергией >0.7 и >1.7 МэВ и расширения области ВРПЗ. Кроме того, для обоих энергетических диапазонов видно возникновение дополнительного максимума вблизи $L = 7$. Поток электронов с энергией >150 кэВ остается на уровне 29.IX. Поток электронов с энергией 1.7 МэВ остается высоким вплоть до 6.X, когда после краткого геомагнитного возмущения, вызванного скачком плотности СВ, он резко упал на геостационарной орбите на три порядка (см. нижнюю панель рис. 2), тогда как поток субрелятивистских электронов плавно снижался вплоть до прихода ВСП СВ на следующем обороте Солнца. Отдельно следует отметить дополнительное возрастание потоков электронов на $L = 7$, зафиксированное во всех трех энергетических диапазонах 1.X.

Последовательно рассмотреть вариации на отдельных L -оболочках можно на рис. 6. На нем показаны данные с КА *Meteo-M № 2* (2014 г.). Детекторы – гейгеровский счетчик с пороговой энергией по электронам $E_e > 0.7$ МэВ и телескоп ДАС4 с пороговой энергией $E_e > 0.1$ МэВ, смотрящий по вектору скорости КА.

Точки на этом рисунке представляют собой скользящие средние значения потоков за один оборот спутника вокруг Земли, т.е. за 4 последовательных пересечения внешнего пояса – по два пересечения в северном и южном полушариях. Таким образом, каждая точка – это как бы усредненный по всем долготам поток частиц на заданной L -оболочке, отнесенный к моменту времени между вторым и третьим пересечениями внешнего пояса. Следовательно, получившееся значение потока, очевидно, меньше, чем максимальный поток в этот же момент времени на той же L -оболочке на долготах Бразильской аномалии.

При сравнении верхней и нижней панели хорошо видно, что резкое возрастание потока частиц меньших энергий происходит раньше, чем более энергичных, потоки частиц меньших энергий во время рассматриваемого возмущения изменялись сильнее, а также амплитуда вариаций потока частиц больше для более высоких L -оболочек.

Следующий раз поток высокоскоростного СВ из той же самой корональной дыры пришел к орбите Земли 23.X и вызвал слабое геомагнитное возмущение – максимальная амплитуда Dst -ва-

риации составила всего -38 нТ. Тем не менее, данное возмущение, как и на предыдущем обороте Солнца, вызвало заметные вариации потоков электронов ВРПЗ и их пространственного распределения. На верхней панели рис. 7 представлены вариации потоков релятивистских электронов ВРПЗ по данным ИСЗ *Meteo-M № 2*.

На рис. 7 видно, что характер вариаций в этом событии существенно отличается от первого – после падения интенсивности формируется дополнительный максимум на большем расстоянии от Земли. На нижней панели рис. 7 на временной зависимости геомагнитных индексов, как и для сентябрьского события, стрелками отмечены моменты времени, для которых далее приведены профили потоков электронов в зависимости от L на рис. 8.

Фоновым в данном случае был выбран профиль, полученный 22.X (толстая сплошная линия). На профиле, полученном 24.X (тонкая сплошная линия) видно, что поток частиц в районе старого максимума для всех трех энергетических каналов упал, как это и должно происходить на главной фазе бури, но у 150 кэВ-ных электронов начал образовываться новый максимум в районе $L = 5.5$

Профиль 25.X (частые точки) демонстрирует для 150 кэВ-ных электронов падение потока в старом максимуме на $L = 3.7$ и сдвиг нового максимума к $L = 5$. У потоков 700 кэВ-ных электронов также возникает второй максимум на $L = 5$, при этом интенсивность в обоих максимумах чуть ниже предыдущего дня, а поток 1.7 МэВ-ных электронов продолжает падать. 27.X (пунктирная линия) профиль пояса 150 кэВ-ных электронов еще немного упал на $L < 5$, а на $L > 5$ вырос, новый на $L = 5$ пояс 700 кэВ-ных вырос и расширился, а старый еще уменьшился, потоки релятивистских электронов в области старого максимума не изменились, но на $L = 5-5.5$ начал образовываться новый максимум.

Профили, полученные 30.X (штрихпунктирные кривые) показывают дальнейшее расширение пояса 150 кэВ-ных электронов, при этом пояс 700 кэВ-ных, наоборот, немного сузился, по сравнению с 27.X, а у пояса релятивистских (>1.7 МэВ) электронов стали четко видны два максимума – на $L = 3.7$ и $L = 5$. Профили за 31.X (жирные точки) помимо сужения – падения потоков на $L > 5$ для всех трех энергетических каналов, мало изменились по сравнению с 30.X. Отметим, что положение и глубина зазора между поясами во время данного события оставалась неизменной.

Вариации на отдельных L -оболочках с 22.X по 31.X показаны на рис. 9. Мы видим, что возрастание потока частиц меньших энергий также, как и в сентябрьском событии происходит раньше, чем

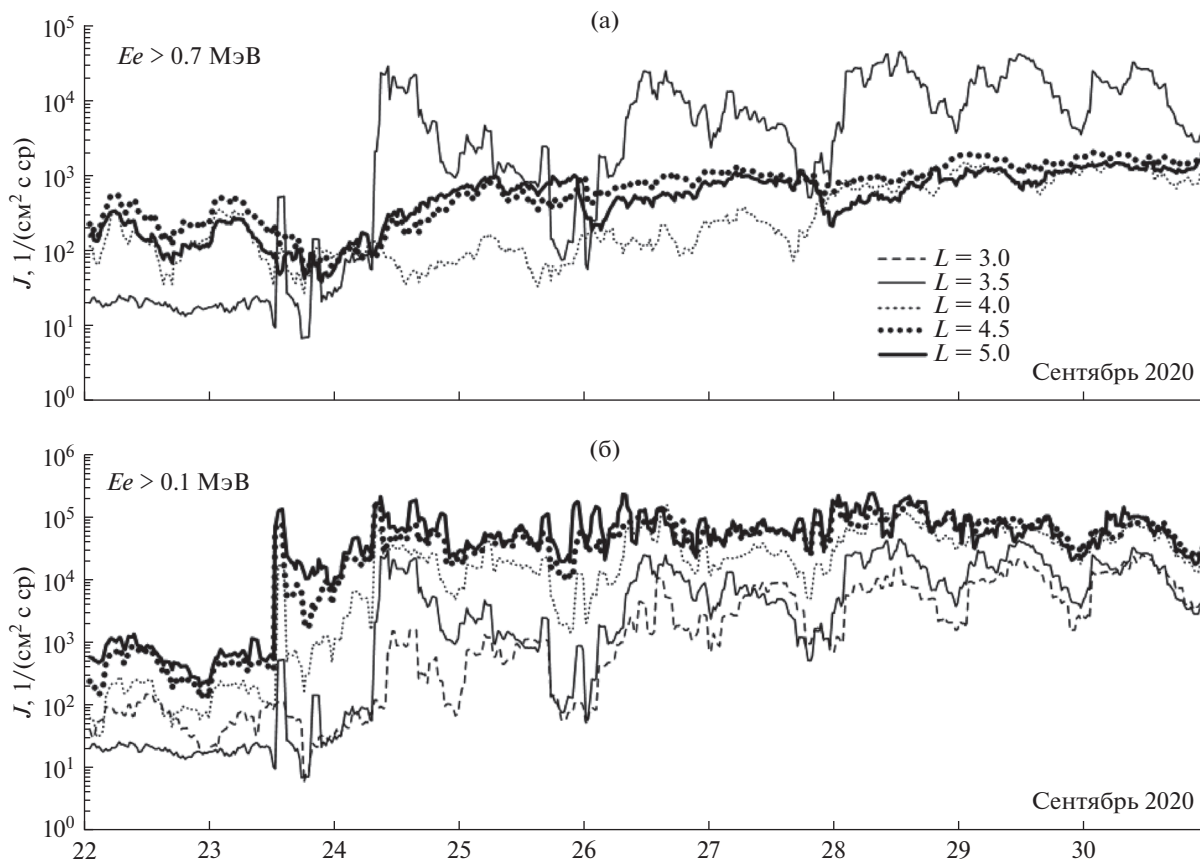


Рис. 6. Вариации потоков электронов ВРПЗ с энергиями $>700 \text{ кэВ}$ (а), $>100 \text{ кэВ}$ (б) на отдельных L -оболочках по данным КА *Метеор-М* № 2 с 22.IX по 1.X.

у более энергичных. Вариации потоков электронов во время рассматриваемого возмущения, как и в сентябре тем больше, чем выше номер L -оболочки и меньше энергия частиц. В отличие от сентябрьского события в октябрьском событии возрастание даже 100 кэВ -ных электронов на $L = 3$ практически отсутствует.

На следующем обороте Солнца ВСП СВ из этой же корональной дыры пришел к Земле 21.XI. Он вызвал слабое геомагнитное возмущение — максимальная амплитуда Dst -вариации также, как и в октябре составила -38 нТ . Данные слабые возмущения также стали причиной вариаций потоков электронов ВРПЗ. Представленные на верхней панели рис. 10 вариации потоков релятивистских ($>2 \text{ МэВ}$) электронов ВРПЗ по данным ИСЗ *Метеор-М* № 2 демонстрируют характерные вариации — падение интенсивности, а затем восстановление потоков электронов. На нижней панели рис. 10 на временной зависимости геомагнитных индексов, как и для сентябрьского и октябрьского событий, отмечены моменты времени, для которых далее приведены профили потоков электронов в зависимости от L на рис. 11.

В качестве фонового в ноябрьском событии взят профиль, полученный 19.XI (толстая сплош-

ная линия). Следующий набор профилей, полученный 21.XI (тонкая сплошная линия) показывает, что потоки электронов $>700 \text{ кэВ}$ и $>1.7 \text{ МэВ}$ падают, и их максимумы немного смещаются ближе к Земле — для $>700 \text{ кэВ}$ с $L = 4.2$ на $L = 4$ и для $>1.7 \text{ МэВ}$ с $L = 4$ на $L = 3.9$. Поток электронов $>150 \text{ кэВ}$ также упал, и помимо старого максимума, также сдвинувшегося с 4.2 на 4.1 , образовался новый на $L = 6.2$. Профиль 22.XI (частые точки) демонстрирует возрастание интенсивности $>150 \text{ кэВ}$ -ных электронов выше добуревого уровня, а также дальнейшее падение потоков $>700 \text{ кэВ}$ -ных и $>1.7 \text{ МэВ}$ -ных электронов в старых максимумах и образование новых максимумов на $L = 5$.

Поток 23.XI (пунктирная линия) $>150 \text{ кэВ}$ -ных электронов не изменился для $L < 6.5$ и вырос на более высоких L , поток $>700 \text{ кэВ}$ -ных и 1.7 МэВ -ных в новых максимумах, которые сдвинулись ближе к Земле — на $L = 4.8$ и $L = 4.7$, соответственно, существенно вырос. Рост потока в новом максимуме для электронов этих энергий продолжился и 25.XI (штрихпунктирная линия). Поток электронов с энергией $>150 \text{ кэВ}$ остался тем же для $L < 6.4$, а на более высоких L существенно упал, на $L = 7$ — на порядок по сравнению с предыдущим днем. Профили, полученные 29.XI

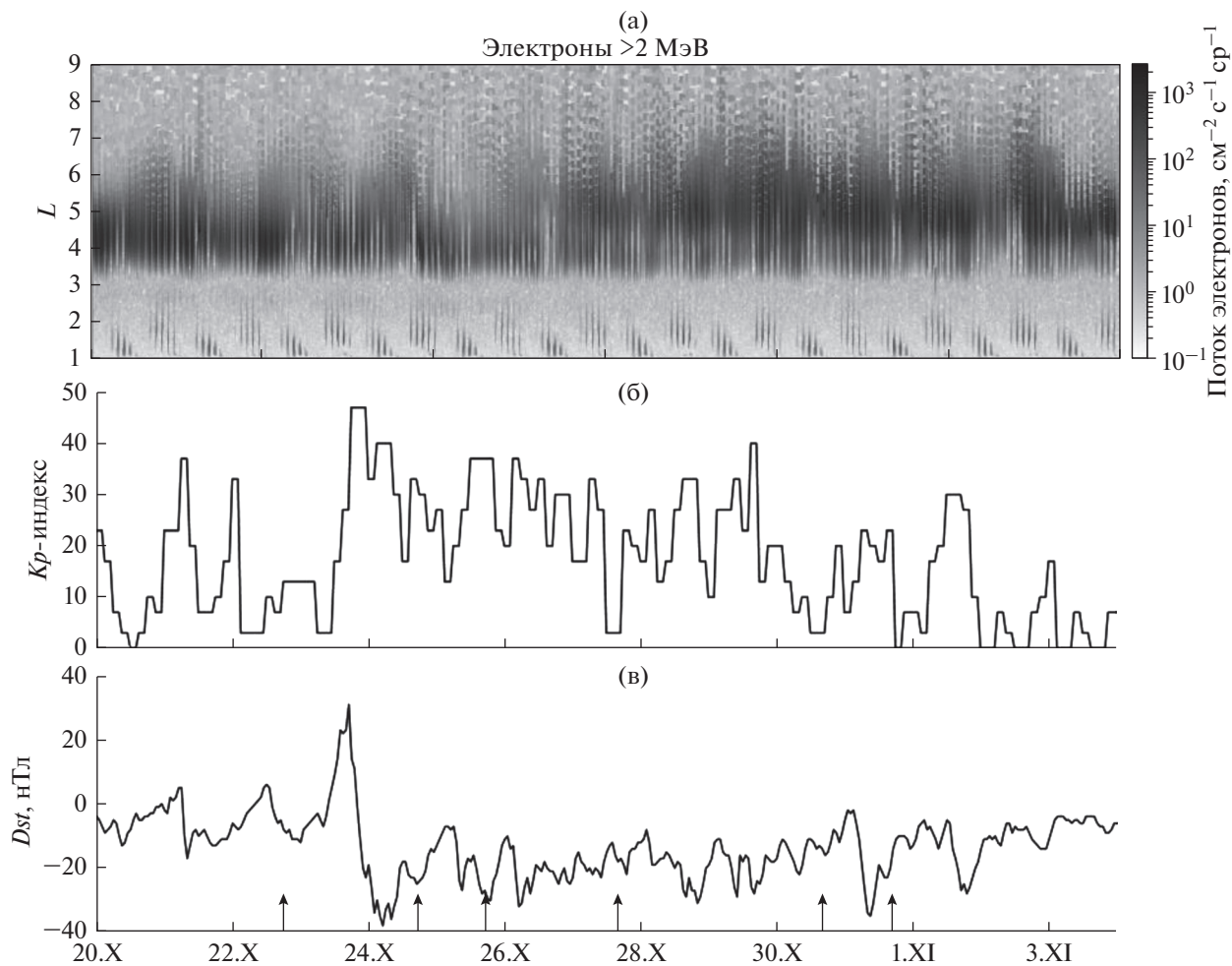


Рис. 7. То же, что на рис. 4 для интервала времени с 20.X по 30.X.

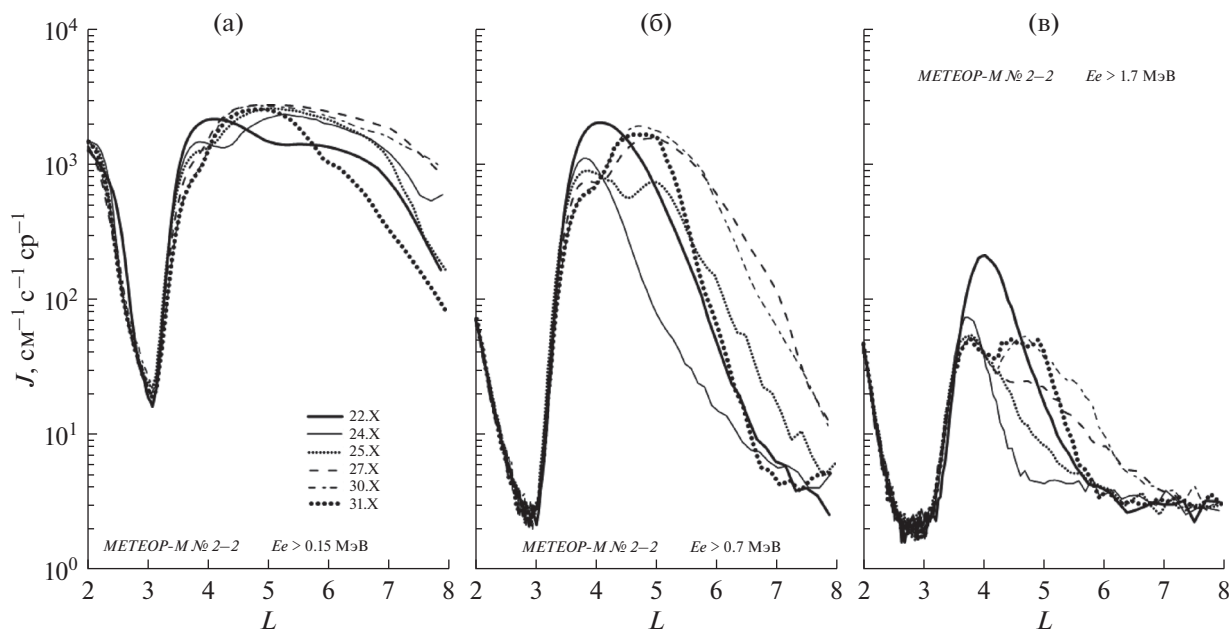


Рис. 8. То же, что на рис. 5 во время геомагнитного возмущения 23–30.IX.

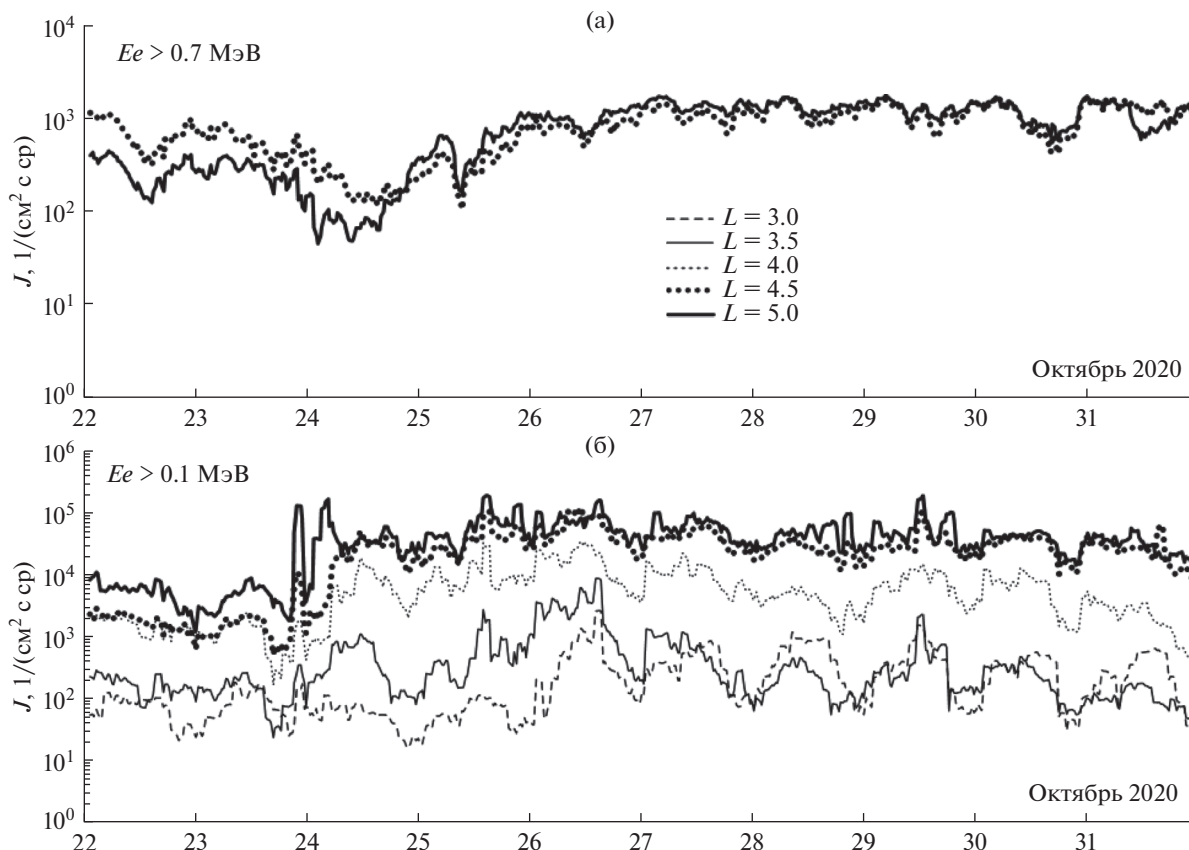


Рис. 9. То же, что на рис. 6 для интервала времени с 22.X по 31.X.

(жирные точки) для каналов >150 и >700 кэВ изменились не существенно по сравнению с 25.XI, за исключением падения интенсивности на $L > 7$, а у релятивистских электронов зазор между старым и новым поясом заполнился, и общая интенсивность еще подросла, но все равно не достигла добуревого уровня.

Таким образом, можно заключить, что в результате геомагнитного возмущения, начавшегося ($Kp = 5-$, $Dst = -38$ нТ) произошла инжекция электронов на $L = 4.3$ по всем энергетическим каналам и началось смещение к Земле старого максимума. 23.XI сформировался новый максимум потоков на $L = 4.7$, а остатки “старого” пояса сместились на более низкие L -оболочки. Положение и глубина зазора между поясами во время данного события оставалась неизменной для всех трех энергетических каналов, как и во время октябрьского события.

На рис. 12 показаны вариации на отдельных L -оболочках с 20.XI по 29.XI. На нижней панели рис. 12 хорошо видно, что время момент возрастания потока электронов с энергией >150 кэВ тем больше, чем больше выбранный номер L -оболочки. Рисунок на верхней панели показывает, что возрастание потоков электронов с энергией >700 кэВ

на $L = 5$ и 4.5 происходило одновременно. Также мы видим, что отмеченная для двух предыдущих событий закономерность — амплитуда вариаций потока частиц возрастает на более высоких L -оболочках — сохраняется и для третьего события.

ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выполненный анализ динамики внешнего радиационного пояса Земли в период слабых геомагнитных возмущений в сентябре—ноябре 2002 г. показывает, что большая амплитуда геомагнитных возмущений не является необходимым условием значимых вариаций потоков электронов ВРПЗ, возникающих в результате ускорения и рассеяния частиц в магнитосфере. Приход на орбиту Земли ВСП СВ оказывается достаточным для изменения пространственных и спектральных характеристик ВРПЗ, причем скорость СВ в данном случае не превышала 650 км/с.

Вызванные этим небольшие геомагнитные возмущения, как было показано, приводят к возрастанию потоков субрелятивистских электронов ВРПЗ, а также опустошению пояса релятивистских электронов, с последующим его восстановлением на уровень выше добуревого, как это было

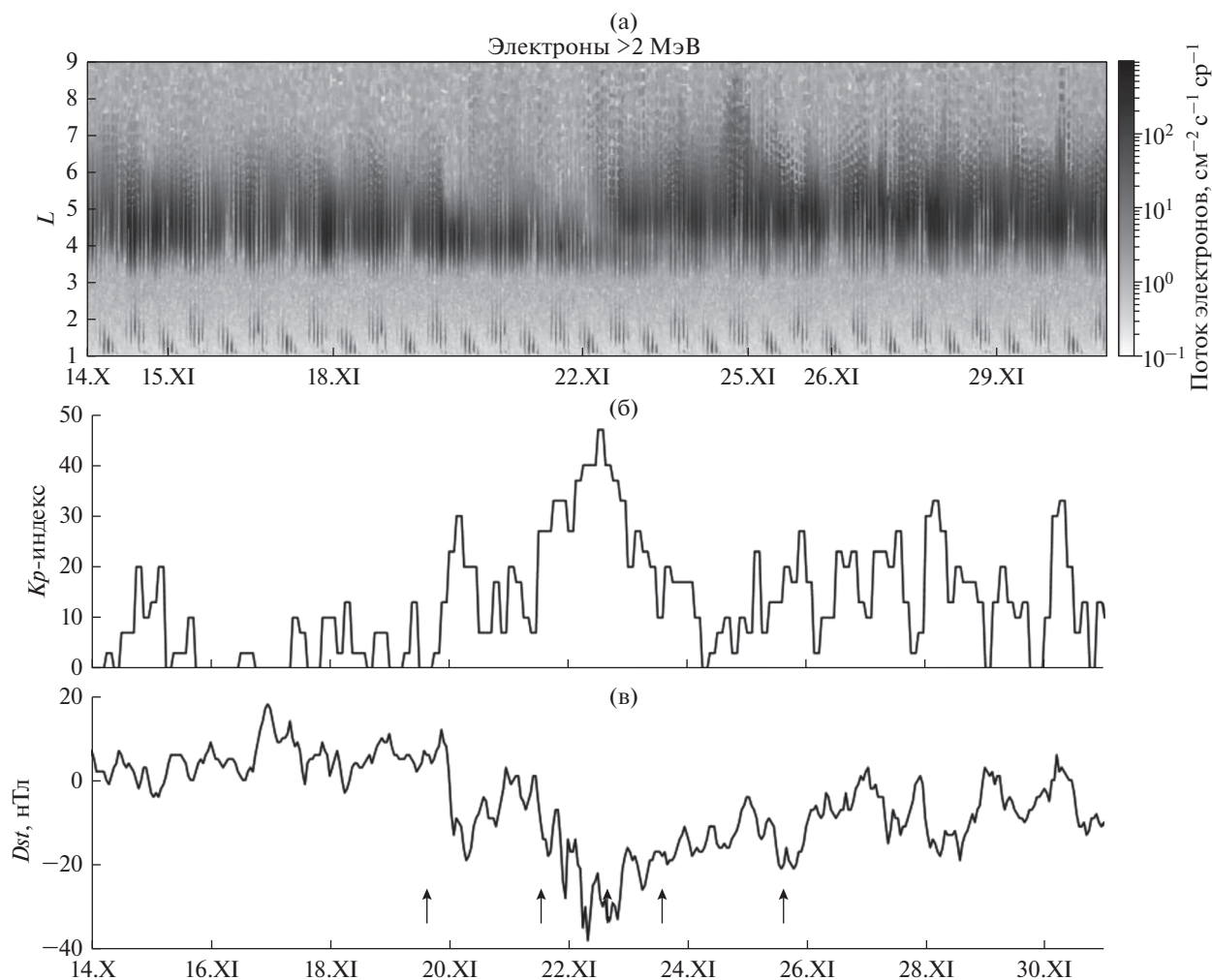


Рис. 10. То же, что на рис. 4 для интервала времени с 14.XI по 1.XII.

во время геомагнитного возмущения, начавшегося 23.IX. Данные результаты не противоречат результатам, полученным в предыдущих экспериментах, в частности на ИСЗ серии *КОРОНАС – КОРОНАС-Ф* [7] и *КОРОНАС-Фотон* [11–13] – резкому снижению интенсивности релятивистских электронов во внешнем РПЗ на главной фазе геомагнитной бури. В нашем случае о полноценных бурях с главной фазой говорить трудно, но мы видим, что для опустошения пояса релятивистских электронов не требуется выраженной главной фазы бури. При этом следует отметить, что после при сравнении трех исследованных событий было получено, что возрастание потоков релятивистских электронов (>1.7 и >2 МэВ) выше добуревого уровня наблюдалось только для более сильного возмущения, наблюдавшегося в сентябре 2020. Поток субрелятивистских электронов (>700 кэВ) также возрос выше добуревого уровня только после сентябрьского, а после октябрьского и ноябрьского возмущений лишь вернулся на добуревой уровень, но новый максимум пояса об-

разовался дальше от Земли – на более высоких L -оболочках.

Помимо того следует отметить, что для рассеяния частиц, оказывается достаточно минимального возмущения в солнечном ветре, как это наблюдалось 6.X и 31.IX, когда после минимального воздействия поток релятивистских электронов упал более, чем на порядок на геостационарной орбите (см. рис. 2). Следует отметить, что данные российского КА *Электро-Л*, находящегося на геостационарной орбите позволяют верифицировать данные о потоке релятивистских электронов с КА *GOES16*. Вариации потоков релятивистских электронов во ВРПЗ экспериментально изучались как в России, так и за рубежом различными научными коллективами с момента их открытия до наших дней, например, [8–10, 14–16] и ссылки там. Корреляция между вариациями потоков электронов ВРПЗ и параметрами солнечного ветра, в частности со скоростью СВ, хорошо известна и была показана во многих из этих работ, а также детально была рассмотрена в работах [17, 18].

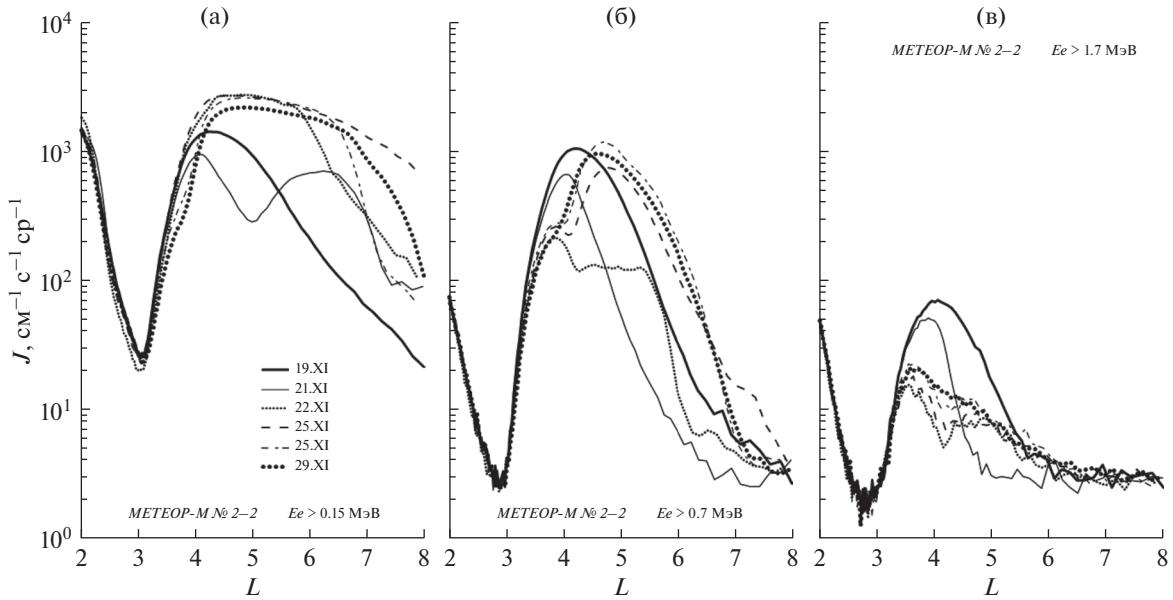


Рис. 11. То же, что на рис. 5 во время геомагнитного возмущения 20–29.XI.

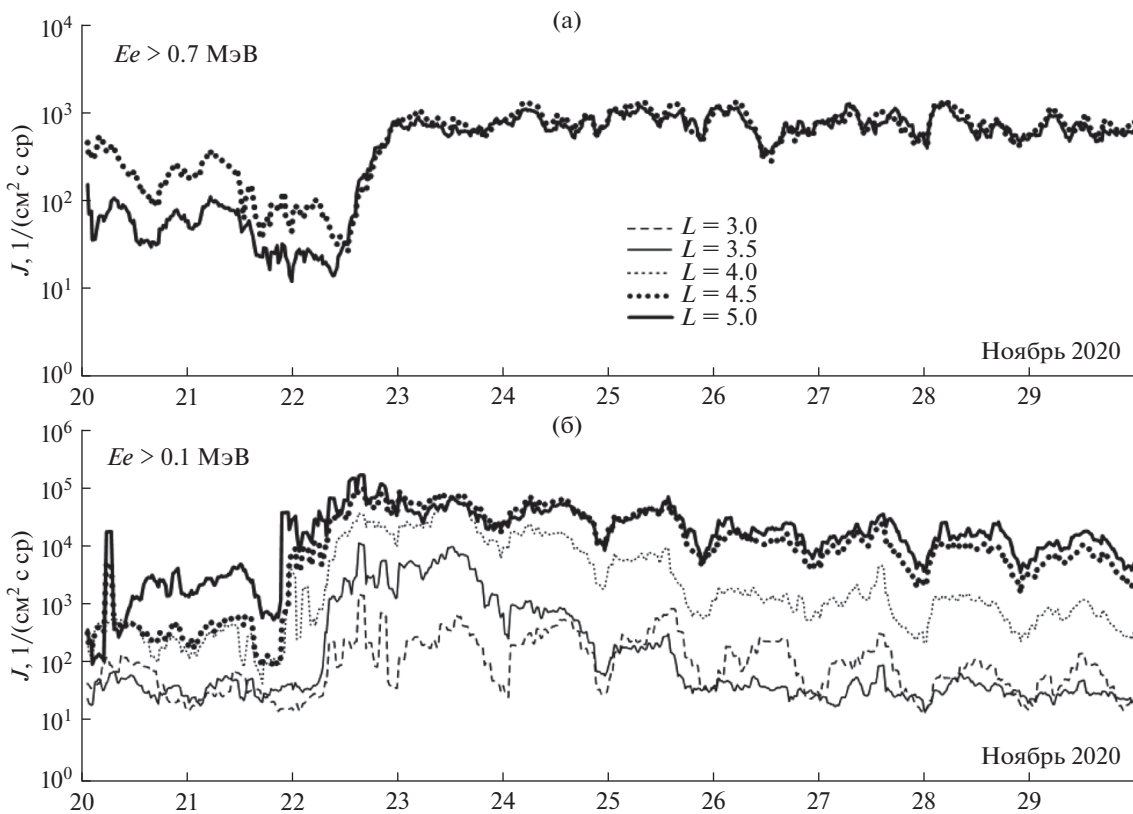


Рис. 12. То же, что на рис. 6 для интервала времени с 20.XI по 29.XI.

Представленные в настоящей работе экспериментальные данные не противоречат полученным ранее результатам, и ранее известный факт, что высокая скорость солнечного ветра можно рассматривать как основной индикатор вариаций ВРПЗ и в случае не только сильных, но и слабых

геомагнитных возмущений. При этом сам по себе солнечный ветер не может ускорить электроны ВРПЗ. В настоящее время, существует статистически подтвержденная гипотеза, что ВСП СВ сопровождаются пульсациями Pc5 (2–7 МГц) [3, 18], и ускорение и рассеяние электронов могут быть

результатом взаимодействия “волна-частица”. Предположительно, основным агентом, вызывающим возбуждение этих полярных пульсаций, является проникновение флуктуаций плазмы СВ на переднем фронте магнитного облака. Однако, попытки точного теоретического объяснения причин резкого возрастания потоков РЭ во внешнем радиационном поясе Земли сталкиваются с трудностями из-за существования целого ряда разнообразных физических факторов, играющих сравнимую между собой важную роль. Это приводит к большой неопределенности в параметрах пространственной, пич-угловой и энергетической диффузии при различных типах волновой активности. Поэтому новые экспериментальные данные, полученные в различных физических условиях и их систематизация остаются актуальной задачей в данной области исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным российских КА серии *Электро-Л* и *Метеор-М* была изучена радиационная обстановка в ОКП в сентябре–ноябре 2020. На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

С сентября по ноябрь 2020 радиационная обстановка в ОКП определялась вариациями потоков электронов во внешнем РПЗ, вызванными рекуррентными потоками высокоскоростного солнечного ветра, истекавшими из северной корональной дыры, существовавшей в течение нескольких оборотов Солнца.

При анализе вариаций потоков электронов различных энергий видно, что вариации потоков 100 кэВ-ных электронов существенно сильнее, чем релятивистских. Также видно, что чем выше энергия электронов, тем слабее вариации потоков частиц на малых L .

На сегодняшний день информация, поступающая с российских КА позволяет оперативно оценивать радиационную обстановку в ОКП.

Данные о потоках электронов геостационарной орбите, измеряемые на КА *GOES16*, предоставлены Space Weather Prediction Center, Boulder, CO, National Oceanic and Atmospheric Administration, US Dept. of Commerce.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cole D.G.* Space weather: Its effects and predictability // *Space Sci. Rev.* 2003. V. 107. P. 295–302.
2. *Белов А.В., Виллорези Дж., Дорман Л.И. и др.* Влияние космической среды на функционирование искусственных спутников Земли // *Геоматизм и аэронавигация.* 2004. Т. 44. № 4. С. 502–510.
3. *Romanova N., Pilipenko V.* ULF wave indices to characterize the solar wind – magnetosphere interaction and relativistic electron dynamics // *Acta Geophys.* 2008. V. 57. № 1. P. 158–170.
4. *Iucci N., Levitin A.E., Belov A.V. et al.* Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits // *Space Weather.* 2005. V. 3. № 1. P. S01001. <https://doi.org/10.1029/2003SW000056>
5. *Kudela K.* Space weather near Earth and energetic particles: selected results // *J. Physics: Conf. Series.* 2013. V. 409. Is. 1. Article id. 012017.
6. *Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю.* Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: Аспекты космической погоды // *Геофизические процессы и биосфера.* 2009. Т. 8. № 1. С. 5–35.
7. *Кузнецов С.Н., Мягкова И.Н., Юшков Б.Ю. и др.* Динамика радиационных поясов Земли во время сильных магнитных бурь по данным ИСЗ *КОРОНАС-Ф* // *Астрономический вестник. Исследования солнечной системы.* 2007. Т. 41. № 4. С. 350–359.
8. *Friedel R.H., Reeves W.G.P., Obara T.* Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere – A review // *J. Atmos. Solar. Terr. Phys.* 2002. V. 64. P. 265–283.
9. *Reeves G.D., Morley S.K., Friedel R.H.W. et al.* On the relationship between relativistic electron flux and solar wind velocity: Paulikas and Blake revisited // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. A02213.
10. *Turner D.L., Shprits Y., Hartinger M., Angelopoulos V.* Explaining sudden losses of outer radiation belt electrons during geomagnetic storms // *Natural Physics.* 2012. V. 8. P. 208–212.
11. *Баринова В.О., Богомолов А.В., Калегаяев В.В. и др.* Динамика внешнего радиационного пояса Земли в ноябре 2009 года по данным экспериментов, проводившихся на ИСЗ *КОРОНАС-ФОТОН* и *Метеор-М № 1* // *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия.* 2011. № 4. С. 121–126.
12. *Myagkova I.N., Panasyuk M.I., Denisov Yu.I. et al.* Correlation between the earth’s outer radiation belt dynamics and solar wind parameters at the solar minimum according to emp instrument data onboard the coronas-photon satellite // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2011. V. 51. № 7. P. 897–901.
13. *Denisov Y.I., Kalegaev V.V., Myagkova I.N. et al.* Experiment on the measurement of charged particle flows with ELECTRON-M-PESCA onboard the CORONAS-PHOTON solar research satellite // *Sol. Syst. Res.* 2011. Т. 45. P. 206–211.
14. *Williams D.J., Arens J.F., Lanzerotti L.J.* Observations of trapped electrons at low and high altitudes // *J. Geophys. Res.* 1968. V. 73. P. 5673–5696.
15. *Vakulov P.V., Kovrygina L.M., Mineev Yu.V., Tverskaya L.V.* Variation in intensity and spectrum of energetic electrons in Earths radiation belts during strong magnetic disturbances // *Space Res.* 1976. V. 16. P. 523–527.
16. *Li X., Temerin M.A.* The electron radiation belt // *Space Sci. Rev.* 2001. V. 95. P. 569–580.
17. *Kataoka R., Miyoshi Y.* Average profiles of the solar wind and outer radiation belt during the extreme flux enhancement of relativistic electrons at geosynchronous orbit // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. P. 1335–1339.
18. *Мягкова И.Н., Шугай Ю.С., Веселовский И.С., Яковчук О.С.* Сравнительный анализ влияния рекуррентных высокоскоростных потоков солнечного ветра на радиационное состояние околоземного космического пространства в апреле–июле 2010 г. // *Астрономический вестник.* 2013. Т. 47. № 2. С. 141–155.