

Ю.Е. Беликов**СВЕЧЕНИЕ ВОКРУГ МЕТЕОРАКЕТ МР-12**

Исследуется свечение вокруг метеоракет МР-12 на нисходящем участке полета с помощью двух спектро радиометров, которые устанавливаются в головной части ракеты. Спектро радиометры, имеют угол поля зрения 3° , а их оптические оси направлены под углом 55° к оси вращения ракеты и вдоль этой оси соответственно. Проанализированы результаты 14 ракетных пусков со спектро радиометрами на борту. Показано, что область околоракетного свечения (ОРС) вытягивается вдоль траекторного следа ракеты по мере уменьшения высоты полета. Установлено, что дневное ОРС можно разделить на две составляющие: связанную с рассеянием света на аэрозольных частицах, окружающих ракету, и эмиссионную. Приведены спектральные характеристики указанных составляющих ОРС. Анализируются вариации ОРС в зависимости от времени суток и от условий полета ракеты.

Введение

Свечение вокруг космических кораблей и ракет рассматривается сейчас не только как помеха для измерений, но и как интересное явление, которое само по себе заслуживает пристального внимания и изучения. Околоракетное свечение (ОРС) было обнаружено в 1965 г. при исследовании ночных эмиссий атмосферы в видимой области спектра на нисходящем участке полета ракеты [1]. Авторами [1] был предложен один из возможных механизмов свечения как следствие взаимодействия молекул М остаточного газовыделения двигателя ракеты, в частности молекул окиси азота NO, с атомным кислородом атмосферы O:



При дальнейших исследованиях выяснилось, что явление ОРС вряд ли можно объяснить только с помощью одной этой реакции. В [3] сообщается о наблюдении ОРС в ночных условиях не только в видимой и инфракрасной областях спектра, но и в ультрафиолетовой области на длинах волн 275 и 320 нм. В то же время излучение континуума, вызванное процессом (1), начинается с 3875 Å [2]. В [4] представлены данные о сильном ОРС в ИК-области спектра при восходящем движении ракеты. Авторы [3] предполагают, что с ОРС связаны, по крайней мере, две реакции, ответственные за свечение в диапазоне длин волн 275–300 нм и в области более 550 нм соответственно.

ОРС регистрировалось в целом ряде экспериментов в различных областях спектра как на восходящем, так и на нисходящем участке полета ракеты. Обзор по свечениям вокруг космических аппаратов и ракет можно найти в [5].

Свечение вокруг метеоракет МР-12 было впервые обнаружено в 1976 г. в ночных условиях [6]. Для наблюдений использовалась наземная телевизионная аппаратура. Свечение регистрировалось при восходящем движении ракеты в области высот 83–130 км. Интенсивность свечения была максимальной в области высот 98–120 км, при этом свечение регистрировалось как звезда 5–6 величины.

В [7] показано, что важным механизмом свечения вокруг ракеты МР-12 в дневных условиях является рассеяние солнечного света на аэрозольных частицах, окружающих ракету. ОРС было зарегистрировано в целом ряде ракетных пусков на нисходящем участке полета ракеты. В отдельных случаях наблюдалось свечение на восходящем участке полета ракеты. В ночных и сумеречных условиях наблюдалось более слабое по сравнению с дневными значениями ОРС. Эти наблюдения показывают, что наряду с рассеянием солнечного света на аэрозольном окружении ракеты МР-12 существует эмиссионное излучение, являющееся, по-видимому, следствием взаимодействия выделяющихся из двигателя ракеты остаточных газов с естественными газовыми составляющими атмосферы.

Цель настоящей статьи — проанализировать аппаратные особенности регистрации ОРС с борта ракеты МР-12 на нисходящем участке полета, определить на основе этого анализа вклад в дневное ОРС эмиссионного излучения и рассеянного на аэрозолях солнечного света, а также исследовать спектральный состав и вариации ОРС.

Аппаратурные особенности регистрации ОРС с борта ракеты МР-12

Спектро радиометры СР-184 и СР-185 [8], устанавливаемые в головной части ракеты МР-12, предназначены для исследования рассеянного и эмиссионного излучения верхней атмосферы. Однако они оказались весьма эффективны при исследовании ОРС. Ракета поднимает аппаратуру до высоты примерно 150 км. Оптические оси спектро радиометров СР-184 и СР-185 направлены соответственно

под углом 55° и вдоль оси вращения ракеты. Угол поля зрения спектрорадиометров составляет 3° . Вследствие вращения ракеты оптическая ось спектрорадиометра СР-184 двигается по конусу с углом при вершине 110° . В спектрорадиометрах последовательно переключаются различные каналы пропускания излучения, имеются как интегральные каналы пропускания от 3 000 до 6 000 Å, так и узкие. В СР-184 максимумы пропускания узких каналов приходятся на следующие длины волн: 3690, 4570, 5300 и 5760 Å, а в спектрорадиометре СР-185 на 3914, 4278, 5300 и 5577 Å. Пропускание излучения в узких спектральных каналах осуществляется с помощью интерференционных светофильтров с шириной пропускания на половине максимума $\Delta\lambda = 30 - 200$ Å. Время регистрации излучения в данном спектральном канале составляет 0,5 с, а время между измерениями в одном и том же спектральном канале составляет 6 с.

На рис. 1, а сопоставляются интенсивности ОРС в относительных единицах, полученные с помощью спектрорадиометров СР-184 и СР-185 в ракетном пуске В-60, проведенном в дневных условиях (зенитный угол Солнца z_\odot составлял на момент старта $91,9^\circ$). Важным обстоятельством является небольшой конус нутации ракеты в этом пуске, угол при вершине которого равен 3° .

Интенсивность излучения, регистрируемая СР-185, в каждом спектральном канале осреднялась за время 0,5 с. Интенсивность ОРС определялась по СР-185 как разность интенсивностей, зарегистрированных на восходящем и нисходящем участке полета ракеты. По СР-184 определялись максимальные значения интенсивности ОРС, зарегистрированные за один оборот ракеты ($\sim 0,2$ с). Эти значения соответствуют такому положению оптической оси спектрорадиометра, при котором угол α между этой осью и вектором, противоположным вектору полной скорости ракеты, минимален.

Как видно из рис. 1, а, высотные профили интенсивности ОРС, полученные в одном ракетном пуске с помощью спектрорадиометров СР-184 и СР-185, существенно различаются. Максимум сигнала по СР-184 приходится на высоту ~ 85 км, тогда как по СР-185 свечение на этой высоте вообще не регистрируется. Максимум сигнала по СР-185 приходится на высоту ~ 95 км.

Отличие высотных профилей ОРС друг от друга является следствием различной ориентации оптических осей спектрорадиометров относительно области свечения, а также результатом пространственно-временных изменений ОРС.

На рис. 2 схематически показаны расположения областей свечения по отношению к ракете на различных высотах А, В и С. Эти высоты соответствуют трем моментам регистрации ОРС спектрорадиометром СР-185 (рис. 1, а): началу регистрации, когда свечение не сильно отличается от фонового (высота А), моменту достижения максимума интенсивности сигнала (высота В) и уменьшения сигнала до нуля вследствие выхода свечения из поля зрения прибора (высота С). Рис. 2 является результатом сопоставления высотных профилей ОРС по СР-184 и СР-185. Оптические оси спектрорадиометров направлены в верхнюю полусферу, поэтому данные об ОРС в нижней полусфере отсутствуют и область ОРС внизу на рис. 2 обрывается волнистой линией.

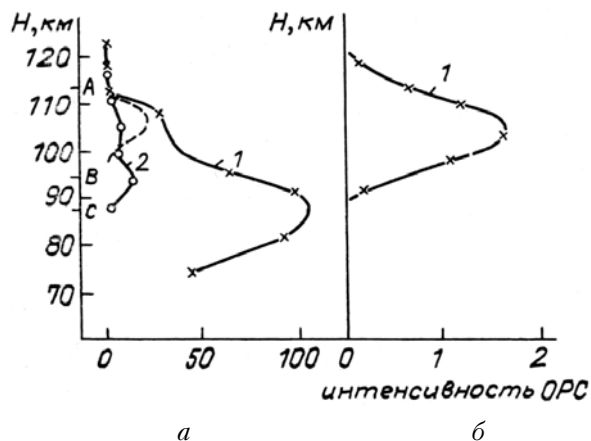


Рис. 1. Высотные профили интенсивности ОРС по интегральному каналу 0,3–0,6 мкм на нисходящем участке полета ракеты: а) в пуске В-60 в дневных условиях при $z_\odot = 91,9^\circ$: 1 – по СР-184; 2 – по СР-185; пунктиром выделена эмиссионная составляющая ОРС СР-184; б) в пуске 3-50 в ночных условиях при $z_\odot = 101,5^\circ$; А, В, С – высоты, соответствующие трем моментам времени регистрации ОРС по СР-185: началу, достижению максимума сигнала, уменьшению сигнала до нуля

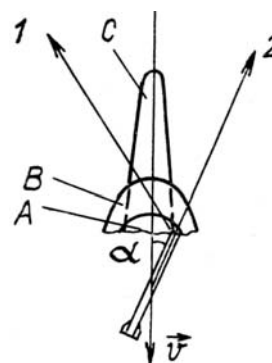


Рис. 2. Схематическое расположение областей свечения на нисходящем участке полета ракеты на трех высотах А, В и С соответствующих рис. 1, а. Показано направление визирования спектрорадиометров СР-184 (1) и СР-185 (2), направление полета ракеты v и угол α между направлением, противоположным направлению полета ракеты, и осью ее вращения

В [7] показано, что в целом ряде ракетных пусков МР-12 максимум ОРС, регистрируемый спектрорадиометром СР-185, приходится на такое положение ракеты при ее нутации, когда угол α мини-

мален (рис. 2), т.е. во многих случаях максимум в высотном профиле интенсивности ОРС определяется не физическими механизмами образования свечения, а геометрическим фактором.

В отличие от спектро радиометра СР-185 спектро радиометр СР-184 позволяет регистрировать свечение во всем высотном диапазоне на нисходящем участке полета ракеты до ее переворота на высоте 70–80 км, т.к. при этом свечение не выходит из поля зрения прибора вследствие его вытягивания вдоль траекторного следа ракеты (рис. 2). Очевидно, для того чтобы при большой вытянутости свечения вдоль траектории ракеты оно попадало в поле зрения прибора, необходимо, чтобы угол установки спектро радиометра к оси вращения ракеты был больше, чем угол между этой осью и траекторным следом ракеты. Учитывая, что угол наклона оси вращения ракеты к траекторному следу на высоте ~ 100 км при нисходящем движении составляет 13–35° (по выборке из 10 пусков без учета нутации ракеты), угол установки оптической оси спектро радиометра (СР-184) к оси вращения ракеты 55° удовлетворяет указанному условию.

Следствием отмеченных особенностей при регистрации ОРС является тот факт, что при нутации ракеты зависимость интенсивности ОРС от угла α для СР-184 не является столь существенной как для СР-185.

Таким образом, получение наиболее полных данных об ОРС во всем высотном диапазоне при нисходящем движении ракеты возможно при использовании фотометров, оптическая ось которых установлена под углом к оси вращения ракеты, большим чем наклон оси вращения ракеты к ее траекторному следу.

При дальнейшем анализе будут использованы в основном данные, полученные со спектро радиометра СР-184.

Две составляющие дневного ОРС и их высотная локализация

Дневное ОРС можно представить в виде двух составляющих: эмиссионного излучения и рассеянного на аэрозольном окружении ракеты солнечного света. Для того чтобы определить высотную локализацию эмиссионной составляющей ОРС и выявить роль процессов рассеяния, сопоставим высотные профили интенсивности свечения в дневных и ночных условиях.

На рис. 1, *а* и *б* представлены соответственно высотные профили интенсивности ОРС в пусках В-60 и З-50, полученные по интегральному каналу спектро радиометра СР-184. В пуске В-60 ракета освещена прямыми солнечными лучами, тогда как в пуске З-50 ракета летит в тени Земли ($z_{\odot} = 101,5^{\circ}$).

Как видно из рис. 1, в ночном пуске З-50 свечение, не связанное с рассеянием света, сосредоточено в области высот ~ 100–110 км, тогда как в пуске В-60, проведенном в дневных условиях, глобальный максимум ОРС приходится на высоту ~ 85 км. Кроме того, на высотах ~ 100–110 км существует локальный максимум. Естественно предположить, что максимум на высотах ~ 100–110 км связан с эмиссионной составляющей ОРС. На рис. 1 пунктиром показана эта составляющая, выделенная в пуске В-60 из ОРС.

Максимум ОРС на высотах ~ 100–110 км обнаружен в целом ряде ракетных пусков МР-12, причем этот максимум даже в тех случаях, когда нутация ракеты значительна (~ 10°), не связан с экстремальными значениями угла α . По всей вероятности, этот локальный максимум в высотном профиле интенсивности ОРС связан с физическим механизмом взаимодействия продуктов газовой выделенной ракеты с атомным кислородом атмосферы, максимальная концентрация которого приходится на высоту ~ 100 км.

Максимум ОРС на высотах ~ 85 км (см. рис. 1) связан с рассеянием солнечного света на аэрозольных частицах, которые взаимодействуют с набегающим потоком воздуха. Согласно [7] молекулы и частицы, окружающие ракету, являются, по всей вероятности, продуктами сгорания твердого топлива и выходят из сопла ракеты. В поле зрения оптических приборов на нисходящем участке полета ракеты они попадают под действие набегающего атмосферного потока воздуха. На основе данных, полученных в ряде ракетных пусков МР-12, в [7] подробно рассмотрен вопрос о деформации газо-пылевого облака на разных высотах и реакции частиц различных размеров на набегающий поток воздуха.

Максимумы ОРС, связанные с рассеянной радиацией, по данным СР-184 в ряде ракетных пусков лежат в области высот ~ 80–90 км.

Существование двух механизмов ОРС подтверждается спектральными исследованиями излучения и индикатрисным эффектом, которые будут рассмотрены ниже.

Спектральные характеристики ОРС

На рис. 3 представлены высотные профили интенсивности ОРС (в относительных единицах, пропорциональных напряжению эталонной батареи) в различных спектральных каналах спектро радиометра СР-184, полученные в трех ракетных пусках в дневных условиях. Рис. 3, *а* соответствует случаю преобладания рассеянного света в составе ОРС. На рис. 3, *б* представлен случай, когда вклады эмиссионного излучения и рассеянного света в ОРС сопоставимы друг с другом. Случай, когда эмиссионное излучение преобладает в составе ОРС, показан на рис. 3, *в*.

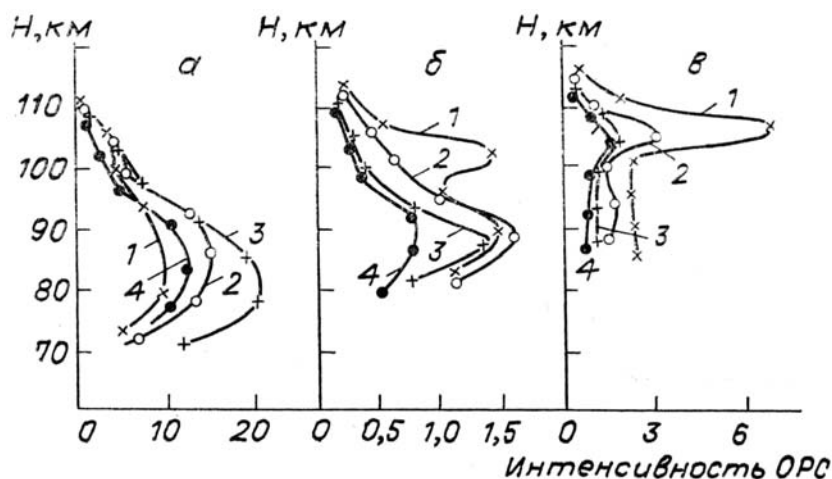


Рис. 3. Высотные профили интенсивности ОРС в спектральных каналах: 1—3690 Å; 2—4570 Å; 3—5300 Å; 4—5760 Å, в следующих ракетных пусках: а—В-60, б—В-53, в—З-44

Из рис. 3 видно, что ОРС можно представить в виде двух составляющих, каждая из которых имеет свой спектральный состав и свою высотную локализацию. Локальный максимум на высоте ~ 100—110 км, соответствующий эмиссионной составляющей ОРС, проявляется наиболее сильно на длине волны $\lambda = 3690 \text{ Å}$, тогда как на высотах ~ 80—90 км, где локализован в основном рассеянный свет, вклад УФ-области спектра в ОРС существенно меньше. Это означает, что спектральное различие двух составляющих проявляется прежде всего в УФ-области спектра.

В табл. 1 приводится спектральный состав эмиссионной составляющей ОРС, полученный в пуске З-44 (рис. 3, в) в дневных условиях по СР-184 и в пуске В-66 в ночных условиях ($z_{\odot} = 108^{\circ}$) по СР-185 на высоте — 102 км. Погрешность измерений составляет ~ 15—20%.

Таблица 1

Интенсивность эмиссионной составляющей ОРС в относительных энергетических единицах

№ пуска	$\lambda, \text{ Å}$						
	3690	3914	4278	4570	5300	5577	5760
В-66	—	7,1	4,1	—	1,0	1,1	—
З-44	6,6	—	—	3,3	1,0	—	1,9

Исследования спектральных характеристик ОРС в том высотном интервале и в тех случаях, когда эмиссионная составляющая невелика, показывает, что зависимость интенсивности свечения I от длины волны λ (с нормировкой на интенсивность солнечного излучения) подчиняется следующей зависимости: $I \sim 1/\lambda^{\gamma}$, где γ изменяется от 3÷4 до 0. Так, в пуске В-53 (рис. 3, б) на высоте 92 км $I \sim 1/\lambda^3$, а в пуске В-60 (рис. 3, а) на высоте 90 км $I \sim 1/\lambda^0$, т.е. интенсивность излучения не зависит от длины волны.

Известно [9], что показатель степени γ связан с размерами рассеивающих свет частиц. При изменении показателя степени от $\gamma = 4$ до $\gamma = 0$ размер частиц для исследуемого спектрального диапазона меняется от очень мелких ~ 0,01 мкм до крупных ~ 1 мкм и более, при этом сильно возрастает сечение рассеяния частиц.

Сравнивая спектральные характеристики ОРС на высоте ~ 90 км в ракетных пусках В-60 и В-53 можно заключить, что в пуске В-53 рассеяние солнечного света происходит на более мелких частицах, чем в пуске В-60, при этом интенсивность рассеянного излучения в пуске В-60 существенно больше, чем в пуске В-53.

Индикатрисный эффект

Если для мелких частиц интенсивность рассеянного излучения слабо увеличивается с уменьшением угла рассеяния θ по закону $I + \cos^2\theta$, то для крупных частиц эта зависимость существенно более сильная [9].

В [7] продемонстрирован эффект резкого нарастания, «всплеск» яркостного сигнала в пуске В-60 при малых углах рассеяния, когда газо-пылевое облако, в котором присутствуют крупные частицы, попадает в плоскость, проходящую через ось вращения ракеты и Солнце. Этот же эффект, который мы назвали индикатрисным, проявляется, по-видимому, в следующей закономерности. В тех случаях, когда ракета движется в солнечном направлении и газо-пылевое облако не находится между Солнцем и ракетой, вклад рассеянного излучения в ОРС сильно уменьшается, т. к. при этом углы рассеяния велики. Таким примером может служить пуск З-44 (рис. 3, в).

Индикатрисный эффект является подтверждением существования составляющей ОРС, связанной с рассеянием света на аэрозольном окружении ракеты.

Вариации ОРС

В табл. 2 приведены максимальные значения интенсивности ОРС в относительных единицах, полученные с помощью СР-184 в спектральном канале, центрированном на $\lambda = 3690 \text{ \AA}$ в ряде ракетных пусков. Все ракетные пуски кроме З-50 проведены в дневных условиях.

Таблица 2

Максимальная интенсивность ОРС на длине волны $\lambda = 3690 \text{ \AA}$
в относительных энергетических единицах

№ пуска	З-50	В-49	В-51	В-52	В-53	В-54	В-56
Интенсивность	0,4	7,7	0,9	1,4	1,4	1,0	1,7

№ пуска	В-60	З-40	З-41	З-42	З-44	З-45	З-59
Интенсивность	10,0	2,5	1,8	19,0	6,7	3,4	5,0

Отметим, что по некоторым оценкам разброс значений интенсивности в данной серии пусков вследствие изменения геометрического фактора не превышает $\sim 1,5-2$.

Из табл. 2 видно, что возможно усиление ОРС в дневных условиях по сравнению с ночными более чем на порядок величины, однако для более точной оценки суточных вариаций ОРС необходимо увеличить количество данных, полученных в ночных условиях. Оценить суточные вариации только эмиссионной составляющей ОРС более затруднительно, т.к. при этом необходимо разделение ОРС на составляющие, что не всегда возможно сделать достаточно точно.

Не вызывает сомнения, что усиление днем ОРС в некоторых ракетных пусках является следствием включения механизма рассеяния солнечного света на аэрозольном окружении ракеты. Так, наиболее сильные свечения, наблюдаемые в ракетных пусках З-42 и В-60, связаны главным образом с рассеянием света на аэрозольном окружении ракеты. Это подтверждается спектральным составом и высотной локализацией свечения, а также индикатрисными эффектами, наблюдаемыми в этих пусках. Во всех ракетных пусках присутствует эмиссионная составляющая свечения, в некоторых из них проявляется и механизм рассеяния, хотя не столь интенсивно, как в двух указанных пусках.

Одним из условий усиления механизма рассеяния, как уже отмечалось, является направление полета ракеты — движется ли она в солнечном или антисолнечном направлении. Так, в пусках В-60 и З-42 ракета движется в антисолнечном направлении, тогда как, например, в пусках З-44 и З-45 происходит движение ракеты к Солнцу. Преобладание эмиссионного излучения в пусках З-44 и З-45 подтверждается как высотной локализацией, так и спектральным составом излучения.

Заключение

Таким образом, на основании проведенных исследований свечения вокруг метеорокет МР-12 можно сделать вывод, что область ОРС вытягивается вдоль траекторного следа ракеты по мере уменьшения высоты полета. Вследствие этого регистрация ОРС на всем нисходящем участке полета ракеты (до ее переворота) возможна с помощью фотометров, устанавливаемых под углом к оси вращения ракеты большим, чем наклон этой оси к траекторному следу. В частности, указанному условию удовлетворяет спектро радиометр СР-184.

Установлено, что дневное ОРС можно разделить на две составляющие: связанную с рассеянием света на аэрозольных частицах, окружающих ракету, и эмиссионную. В зависимости от времени су-

ток, условий пуска ракеты, а также в зависимости от количества и размера частиц в окружении ракеты может преобладать та или иная составляющая.

В большинстве ракетных пусков по данным СР-184 максимум эмиссионного свечения приходится на область высот $\sim 100-110$ км, тогда как максимум ОРС, связанный с рассеянной радиацией, лежит в области высот $\sim 80-90$ км.

Получены спектральные характеристики эмиссионного и рассеянного излучений, составляющих ОРС. Показано, что эмиссионное свечение наиболее интенсивно в УФ-области спектра, максимальная интенсивность регистрируется по спектральному каналу 3690 Å. Зависимость интенсивности рассеянной радиации от длины волны (с нормировкой на интенсивность солнечного излучения) имеет вид $I \sim 1/\lambda^\gamma$, где γ в различных пусках изменяется от 3÷4 до 0.

Показано, что механизм рассеяния проявляется прежде всего в тех дневных пусках, где ракета летит от Солнца и аэрозольное облако попадает между Солнцем и ракетой. В дневных условиях по сравнению с ночными возможно усиление ОРС более чем на порядок величины, однако для более детального анализа требуется увеличить количество данных, полученных в ночных условиях.

1. Heppner J.P., Meredith L.N. // *J. Geophys. Res.* 1958. V. 63. № 1. P. 51–65.
2. Sharp W.E. // *Planet. Space Sci.* 1984. V. 32. P. 257.
3. Greer R.G.H., Murtagh D.P., Witt G., Stegman J. // *In Sixth ESA Symposium on European rocket and balloon programmes and Related Research Paris: European Space Agency.* 1983. P. 341–347.
4. Lopez-Moreno J.J., Rodrigo R., Vidal S.R. // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90. № A7. P. 6617–6621.
5. Лазарев А.И., Ковалёнок В.В., Авакян С.В. Исследование Земли с пилотируемых космических кораблей. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 400 с.
6. Ващенко В.Н., Ивченко В.Н., Пасошников Л.П. // *Космические исследования на Украине.* Киев: Наукова думка, 1979. Вып. 13. С. 49–52.
7. Беликов Ю.Е. // *Вопросы гелиогеофизики и контроля природной среды.* М.: Гидрометеоздат, 1986. С. 43–73.
8. Блинков Ю.Ш., Давыдов В.С., Микиров А.Е. и др. // *Труды ИПГ,* 1979. Вып. 36. С. 74–86.
9. Мак-Картни Э. *Оптика атмосферы.* М.: Мир, 1979. 424 с.

Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова
Госкомгидромета СССР, Москва

Поступила в редакцию
11 июля 1989 г.

Yu. E. Belikov. **The Glow in the Environment around MR-12 Meteorological Rockets.**

The glow in the environment around meteorological rockets MR-12 was studied on the descending trajectory by two spectroradiometers installed in the rocket payload. Spectroradiometers have the field-of-view angle of 3° , the optical axis being oriented at 55° to the rocket rotation axis and along it, respectively. The results of 14 rocket flights with spectroradiometers are considered. The region of near-rocket glow (NRG) is shown to be stretching along the rocket trajectory as the flight altitude decreases. It is found that the daytime NRG consists of two components: the scattered sunlight part produced by the rocket aerosol environment and emissive one. The spectral characteristics of both NRG components are given. Day-to-night changes of NRG characteristics and the ones induced by flight conditions are analyzed.