

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

537.591

МОЩНЫЕ ВСПЛЕСКИ КОСМИЧЕСКОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ**О. Ф. Прилуцкий, И. Л. Розенталь, В. В. Усов**

Недавно были проведены наблюдения и предложены теоретические модели всплесков космического гамма-излучения — одного из наиболее интересных открытий в астрофизике последних лет.

1. ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие астрофизики, наблюдающееся в последнее десятилетие, обладает двумя отличительными особенностями. Во-первых, современная астрофизика связана, в основном, с исследованием нестационарных, взрывных процессов. Тенденция к исследованию нестационарных процессов прослеживается во всех разделах астрономии, начиная от исследования физики Солнца и кончая изучением начальной стадии эволюции Вселенной. Временные, пространственные и энергетические масштабы нестационарных космических явлений существенно различны (табл. I),

Таблица I

Характеристики нестационарных космических явлений

Космические явления	Энерговыведение, эрг	Длительность, сек
Взрывы в ядрах активных галактик	$10^{51}—10^{54}$	10^7
Вспышки сверхновых	$10^{48}—10^{50}$	10^6
Вспышки новых	$10^{44}—10^{45}$	10^6
Солнечные вспышки	$10^{30}—10^{32}$	$10—10^3$
		(в зависимости от диа-пазона)
Всплески космического гамма-излучения	$10^{34}—10^{36}$ (если источники находятся в Галактике) $10^{48}—10^{53}$ (если источники находятся за пределами Галактики)	$1—10$

но все эти процессы объединяются общим свойством — важной ролью, которую в них играют частицы высоких энергий. Ускорение нетепловых частиц — это неотъемлемый атрибут нестационарных процессов в плазме. В космических условиях к быстрым частицам переходит заметная часть полной энергии взрывных процессов. Быстрые частицы, ускоренные в нестационарных космических процессах, генерируют нетепловое излучение в широком интервале длин волн — от радио- до гамма-диапазона.

Для детального изучения нестационарных космических явлений необходимо проведение наблюдений в максимально широком диапазоне электромагнитного спектра, в том числе и в диапазонах, недоступных для наземных наблюдений — инфракрасном, ультрафиолетовом, рентгеновском и гамма-диапазонах.

Это обстоятельство нашло свое отражение в другой особенности астрономических исследований последнего десятилетия — постоянно возрастающей доле внеатмосферных методов наблюдений. Внеатмосферная астрономия, в особенности рентгеновская и гамма-астрономия, внесла существенный вклад в исследование нестационарных космических явлений. Открытие галактических рентгеновских источников, связанных с компактными звездами (нейтронными звездами и «черными дырами»), исследование рентгеновского излучения солнечных вспышек являются примерами событий, оказавших решающее влияние на развитие современных астрофизических представлений.

Развитие ракетно-космической техники не только существенно расширило диапазон астрономических наблюдений, но и привело к появлению новых возможностей для проведения астрономических исследований, не реализуемых в традиционных областях наземной астрономии.

Так, например, одной из центральных проблем современной астрофизики стало исследование конечных стадий эволюции звезд и ядер галактик. Заключительная стадия эволюции таких объектов во многих случаях должна происходить очень бурно. Характерные времена коллапса звезд сравнимы с временем свободного падения вещества и могут достигать сотых и тысячных долей секунды. С другой стороны, ожидаемая частота таких явлений невелика (так, в нашей Галактике она не должна существенно превышать одного события в год).

В связи с этим поиск редких событий стал в последнее время одной из наиболее популярных задач в астрономии (в частности, сообщение о возможной регистрации гравитационных волн Вебером инициировало проведение наблюдений редких событий в радио- и оптическом диапазонах). Тем не менее наземные наблюдения редких явлений не принесли интересных положительных результатов.

Космические средства астрономических наблюдений представили исследователям, занимающимся поиском редких явлений, новую возможность — проведение коррелированных наблюдений вспыхивающих источников мягкого γ -излучения с помощью космических аппаратов, разнесенных на большие расстояния. Не так давно астрономы получили возможность использовать систему спутников «Вела», предназначенную для контроля за ядерными взрывами в космическом пространстве. Применение этой системы позволило надежно регистрировать всплески космического гамма-излучения, происходящие всего несколько раз в году.

Сообщение об открытии мощных всплесков космического гамма-излучения на спутниках системы «Вела»¹ вызвало широкий интерес и привело к резкому возрастанию активности как теоретиков, так и наблюдателей. Обнаружение γ -всплесков, интенсивность которых на несколько порядков величины превышала интенсивность обнаруженных ранее источников космического гамма-излучения, положило начало новой отрасли внеатмосферной астрономии — исследованию вспыхивающих источников жесткого электромагнитного излучения. Уже через три месяца после появления в печати первого сообщения о γ -всплесках¹ в Лос-Аламосе состоялась конференция, посвященная этому явлению². На лос-аламосской конференции было представлено 40 докладов, в которых затрагивались как наблюдательные, так и теоретические аспекты данной проблемы. Исследования космических γ -всплесков активно ведутся

и в Советском Союзе. Наблюдениями γ -всплесков занимаются в ИКИ АН СССР, НИИЯФ МГУ и ЛФТИ^{3,4}.

В настоящем обзоре рассматриваются вопросы, связанные с наблюдаемыми свойствами и теоретической интерпретацией мощных всплесков космического гамма-излучения. В разделе 2 приводятся данные наблюдений γ -всплесков; в разделе 3 обсуждаются теоретические модели, предлагаемые для объяснения природы γ -всплесков. Последний раздел посвящен обсуждению дальнейших перспектив исследования γ -всплесков.

2. НАБЛЮДЕНИЯ МОЩНЫХ ВСПЛЕСКОВ КОСМИЧЕСКОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

а) Открытие γ -всплесков и наблюдения на ИСЗ «Вела». Всплески мягкого космического гамма-излучения были обнаружены с помощью детекторов, установленных на искусственных спутниках Земли системы «Вела» (описание этой системы см. в работе⁵). Спутники «Вела» выводились на круговые орбиты с радиусом около 120 тысяч километров попарно, так, чтобы спутники одной пары находились на противоположных сторонах орбиты.

Начиная с 1965 г. на спутниках третьей серии («Вела-3А» и «Вела-3В») регистрировались кратковременные повышения скорости счета детекторов гамма-лучей⁶. Однако причина этих явлений в то время оставалась невыясненной — повышения скорости счета могли быть связаны с жестким излучением Солнца во время вспышек, с действием захваченной радиации или с аппаратными эффектами.

Данные, полученные со спутников четвертой серии, запущенных в 1967 г., позволили провести временную привязку показаний детекторов на нескольких спутниках системы. Это сузило круг возможных причин появления γ -всплесков. В 1967 г. на спутниках «Вела-4А» и «Вела-4В» был зарегистрирован γ -всплеск, не коррелировавший с солнечной активностью, но имеющиеся в то время данные не позволили достоверно определить космическую природу явления⁶.

Значительный прогресс в наблюдениях γ -всплесков был связан с запусками пятой (1969 г.) и шестой (1970 г.) серий спутников «Вела». Эти космические аппараты были оборудованы более совершенными детекторами гамма-излучения с высоким временным разрешением.

На каждом из спутников «Вела-5А», «Вела-6А» и «Вела-6В» было установлено по шесть сцинтилляционных счетчиков с кристаллами CsI размерами $\varnothing 19 \times 25$ мм, помещенных в экран из свинцовой фольги толщиной 0,25 мм. Экран задерживал электроны с энергией более 0,75 Мэв и протоны с энергией более 20 Мэв, а также экранировал счетчик от фотонов малых энергий. Счетчики регистрировали излучение в диапазонах 0,15—0,75 Мэв на спутниках «Вела-5» и 0,3—1,5 Мэв на спутниках «Вела-6». Расположенные на спутниках детекторы позволили обеспечить круговой обзор небесной сферы.

Логическая схема детекторов на спутниках пятой и шестой серий была предназначена для выделения кратковременных импульсов гамма-излучения. Триггер, включающий схему, срабатывал в том случае, когда счет в интервале 0,25 сек на шесть стандартных отклонений превышал фоновый счет, усредненный по предшествующему интервалу длительностью 16 сек. После включения схемы детектор регистрировал и запоминал счет во временных интервалах, возрастающих в геометрической прогрессии (4 интервала по 1/64 сек, 4 интервала по 1/32 сек и так далее до 128 сек). В запоминающее устройство вводилось также время начала отсчета, измеренное по бортовым часам.

Точная временная привязка моментов начала отсчета позволила не только выделить космические γ -всплески среди других фоновых событий, но и получить сведения о небесных координатах источников γ -всплесков по разности времен регистрации переднего фронта импульсов на различных спутниках системы «Вела» (аналогичная методика была предложена ранее Джааккони⁷). Этот метод основан на том, что временная задержка регистрации Δt связана с углом ϑ между вектором l , соединяющим два детектора, и направлением на источник соотношением

$$c\Delta t = l \cos \vartheta. \quad (1)$$

Регистрация γ -всплеска на двух разнесенных детекторах позволяет выделить на небесной сфере окружность, на которой должен располагаться источник γ -всплеска. При использовании трех детекторов возможная область локализации сокращается до двух точек, симметричных относительно плоскости расположения детекторов (рис. 1). Устранение оставшейся неопределенности может быть достигнуто при использовании четвертого детектора, расположенного вне плоскости, проходящей через первые три прибора. Плоскости орбит спутников системы «Вела» были близки, и поэтому показания четырех детекторов не позволили выбрать одно из двух возможных положений источника.

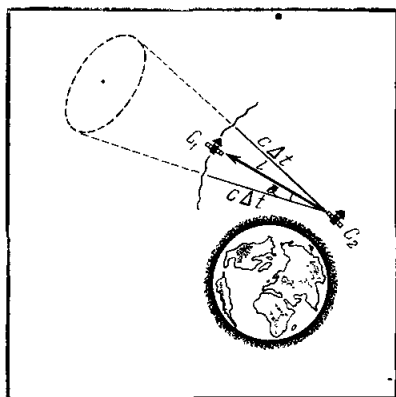


Рис. 1. Определение направления на источник гамма-всплесков.

Передний фронт гамма-всплеска регистрируется сначала первым спутником S_1 , а через некоторое время Δt — спутником S_2 . Зная расстояние l между спутниками, можно определить угол ϑ между направлением на источник гамма-всплеска и соединяющим спутники отрезком прямой. Угол ϑ задает на небесной сфере окружность, на которой находится источник всплеска.

С 1969 по 1973 г. на спутниках «Вела» был обнаружен 21 γ -всплеск, зарегистрированный по крайней мере на двух аппаратах. Предварительный каталог γ -всплесков, в котором приводятся данные о моменте всплесков, их положении на небесной сфере и полной энергии, регистрируемой в течение всплеска, опубликован в работе⁸ (табл. II).

Фотонная природа наблюдаемых γ -всплесков в настоящее время установлена вполне надежно. Детекторы заряженных частиц и нейтронов, помещенные на борту спутников «Вела», не показывали возрастания скорости счета во время γ -всплесков¹. Кроме того, γ -всплески регистрировались в одно и то же время на спутниках, расположенных как вне, так и внутри земной магнитосферы, и действия геомагнитного поля на распространение фронта всплесков замечено не было.

Исходя из данных о расположении источников γ -всплесков на небесной сфере, авторы сообщения¹ заключили, что γ -всплески не связаны с Солнцем, Землей, Луной и другими планетами.

Распределение гамма-всплесков по небесной сфере (в галактических координатах) показано на рис. 2⁹. Ярко выраженной анизотропии, связанной с дисковой структурой Галактики, не наблюдается. Поэтому источники гамма-всплесков должны быть расположены либо в ближайшей окрестности Солнца, на расстояниях, меньших толщины галактического диска, либо за пределами нашей Галактики. Полученные до сих пор данные наблюдений были недостаточны для того, чтобы сделать выбор между этими двумя возможностями.

Таблица II

Каталог γ -всплесков, обнаруженных на ИСЗ «Вела»

Номер всплеска	Время T (дата и сек)	Координаты всплесков					Поток, эрг/см ²
		Для трех спутников		Для двух спутников			
				Центр круга		Радиус, град	
		Экваториальные	Галактические	Экватор.	Галакт.		
67—1	2.7.67 51568						2·10 ⁻⁵
69—1	3.7.69 26233			191+20	294+83	29	2·10 ⁻⁴
69—2	7.10.69 26791			236+33	52+52	19	2·10 ⁻⁵
69—3	17.10.69 11927			27—27	215—77	86	4·10 ⁻⁵
69—4	17.10.69 78113			156+01	244+46	83	
70—1	14.6.70 18416		Солнечный				
70—5	10.7.70 19066						
70—2	22.8.70 60751	144+61 209—29	153+44 320+31				1·10 ⁻⁴
70—3	1.12.70 72059			91—29	235—22	76	4·10 ⁻⁵
70—4	30.12.70 25337	120+10 149—30	212+20 264+19				3·10 ⁻⁴
71—4	2.1.71 69056	216+60 225+03	103+54 1+50				1·10 ⁻⁴
71—6	27.2.71 62855						
71—2	15.3.71 40827			4—21	72—80	82	1·10 ⁻⁵
71—3	18.3.71 55685	69+12 115—71	185—22 283—22				1·10 ⁻⁴
71—4	21.4.71 11919			247+34	55+43	83	3·10 ⁻⁶
71—5	30.6.71 63059			27—30	228—77	52	5·10 ⁻⁵
72—1	17.1.72 63556	104+09 136—29	206+06 255+12				7·10 ⁻⁴
72—2	12.3.72 57195	277+01 298+35	31+05 71+04				5·10 ⁻⁴
72—3	28.3.72 49588			283+22	53+09	86	1·10 ⁻⁴
72—6	27.4.72 39512						
72—4	14.5.72 13591	176+78	127+39				2·10 ⁻⁴
72—5	1.11.72 68206	11+19 309—56	121—44 342—37				7·10 ⁻⁶
73—1	7.5.73 29072	342+56 254—33	107—03 351+06				6·10 ⁻⁵
73—2	10.6.73 75582			25—36	255—76	61	1·10 ⁻⁴

Тем не менее существуют некоторые аргументы, поддерживающие галактическую природу источников γ -всплесков. Во-первых, γ -всплески

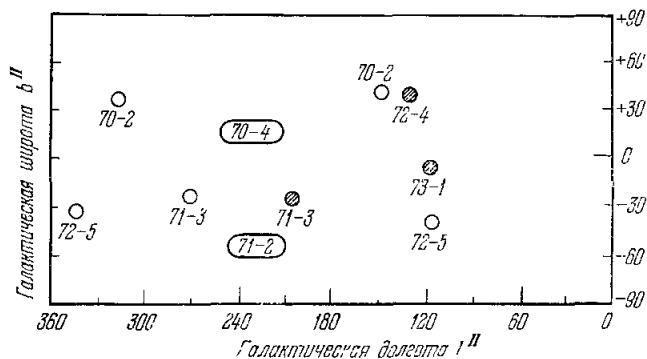


Рис. 2. Галактические координаты гамма-всплесков, наблюдавшихся по крайней мере тремя спутниками «Вела».

неравномерно распределены по галактической долготе ¹⁰⁻¹² (рис. 3 ¹⁰). Это обстоятельство может быть связано со спиральной структурой

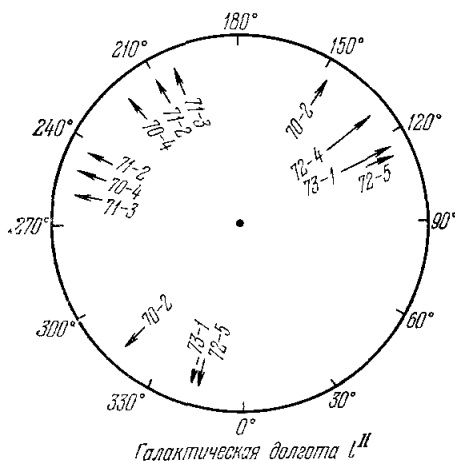


Рис. 3. Распределение гамма-всплесков по галактической долготе.

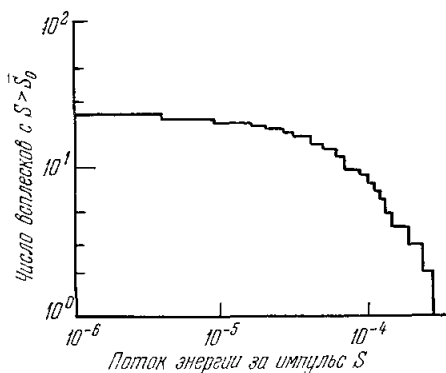


Рис. 4. Распределение гамма-всплесков по наблюдаемым потокам.

Галактики, поскольку Солнце расположено на внутренней стороне спирального рукава.

Во-вторых, слабые γ -всплески распределены анизотропно и группируются вблизи галактической плоскости ^{13,14}. Статистическая обеспеченность этих аргументов невелика и вопрос о локализации источников γ -всплесков пока остается открытым.

Исследование распределения γ -всплесков по потокам (рис. 4 ¹²) могло бы стать мощным средством изучения природы их источников (как это произошло, например, с внегалактическими радиоисточниками). Однако для этого необходимо увеличение статистического материала наблюдений.

Продолжительность γ -всплесков колеблется от десятых долей секунды до десятков секунд. Вариации интенсивности излучения во время всплеска весьма разнообразны — наблюдались и одиночные импульсы,

и последовательности импульсов длительностью в несколько секунд, разделенные интервалами в десятки секунд (рис. 5^{6,8}). Интенсивность

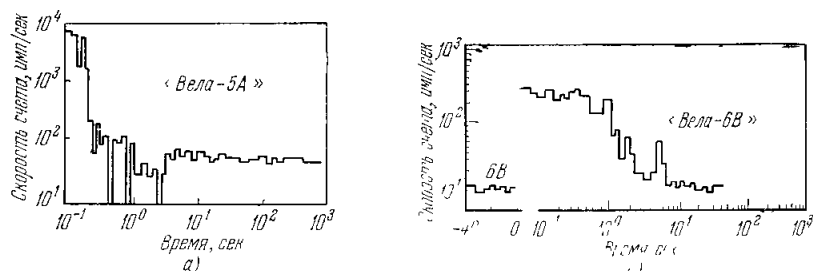


Рис. 5. Временное изменение интенсивности потока гамма-излучения всплесков, наблюдавшихся 17 октября 1969 г. (а) и 2 января 1971 г. (б).

излучения во время γ -всплесков меняется очень быстро; были обнаружены вариации с длительностью в $1/64$ сек, минимально разрешимой на детекторах спутников «Вела»¹⁵.

б) Наблюдения открытых на ИСЗ «Вела» γ -всплесков на других космических аппаратах. Приборы спутников «Вела» не позволяли исследовать спектральные характеристики γ -всплесков. Энергетические спектры γ -всплесков были впервые получены на мониторе гамма-лучей, установленном на ИСЗ IMP-6¹⁶⁻¹⁸. Этот спутник был выведен на сильно вытянутую орбиту с апогеем 200 тысяч километров в 1971 г. С помощью детекторов гамма-лучей, помещенных на его борту, были получены спектры шести γ -всплесков из восьми, зарегистрированных в этот период на спутниках «Вела». Детектор гамма-лучей представлял собой сцинтилляционный счетчик с кристаллом CsI диаметром 57 и длиной 38 мм, окруженный антисовпадательным пластическим сцинтиллятором. Прибор регистрировал фотоны с энергией от 50 до 1100 кэв; временное разрешение составляло 2—3 сек.

Спектры γ -всплесков, измеренные на приборе IMP-6, аппроксимировались экспоненциальной функцией

$$\frac{dn}{dE} = I_0 \exp \left(-\frac{E}{E_0} \right). \quad (2)$$

Численные значения I_0 и E_0 , выраженные в фотонах/см² кэв и в кэв соответственно, приведены в табл. III.

Таблица III

Характеристики спектра гамма-всплесков

Номер всплеска	Исследуемая часть всплеска	I_0 , фот/см ² кэв	E_0 , кэв
71—2	Максимум второго субимпульса	1,9	156
71—3	Спад первого субимпульса	1,8	74
71—5	Максимум первого субимпульса	0,7	276
71—5	Максимум второго субимпульса	5,5	142
71—5	Спад второго субимпульса	0,7	110
72—1	Спад первого субимпульса	0,1	138
72—1	Максимум второго субимпульса	0,35	184
72—1	Спад всплеска	0,11	170
72—3	Максимум второго субимпульса	0,50	238
72—4	Максимум первого субимпульса	0,8	166
72—4	Максимум второго субимпульса	0,8	152

Характерные энергии γ -всплесков E_0 группируются вблизи 150 кэв. Наблюдавшиеся на IMP-6 всплески состояли из коротких импульсов с жестким ($E_0 = 150$ кэв) спектром, накладывавшихся на медленно изменяющуюся компоненту мягкого ($E_0 = 75$ кэв) излучения. В спектре γ -всплесков не было найдено линейчатого гамма-излучения. Наблюдения на IMP-6 не показали резких изменений энергетического спектра во время отдельных импульсов.

Один из γ -всплесков, зарегистрированный 14 мая 1972 г., наблюдался и в диапазоне жесткого рентгеновского излучения на приборах спутника

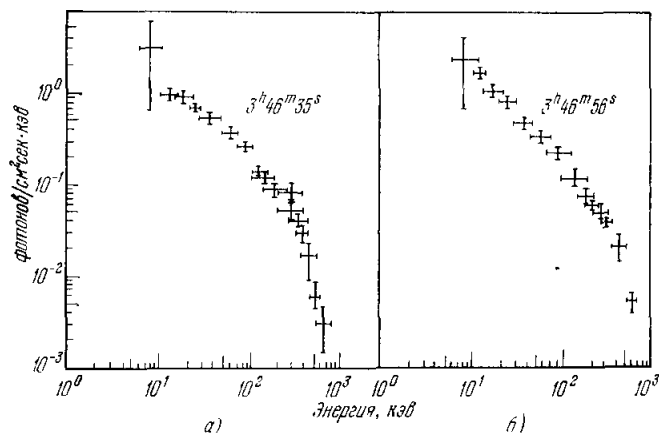


Рис. 6. Энергетические спектры первого (а) и второго (б) субимпульсов гамма-всплеска, зарегистрированного 14 мая 1972 г.

Спектральные наблюдения проводились на спутниках OSO-7 и IMP-6.

OSO-7^{19,20}. Спутник OSO-7 находился на круговой орбите высотой 550 км, расположенной внутри магнитосферы. Его детекторы (сцинтилляционные спектрометры с кристаллами NaI) регистрировали излучение в диапазонах 7—500 кэв и 11—300 кэв. Временное разрешение приборов было невелико — 10—15 сек.

Наблюдения на приборах спутника OSO-7 показали, что спектр всплесков в жестком рентгеновском диапазоне отличается от спектра в диапазоне гамма-лучей (рис. 6):

$$\frac{dn}{dE} \propto E^{-\alpha}, \quad (3)$$

где α колебалось в пределах 0,6—1,4. Спектральный индекс увеличивался при уменьшении интенсивности, что указывало на более медленный спад мощности излучения на малых энергиях.

Интересно отметить, что область небесной сферы в направлении данного γ -всплеска сканировалась приборами в течение 12 часов до и после всплеска. Никакого излучения не было обнаружено. Верхний предел на уровне 3σ ($2 \cdot 10^{-3}$ фотонов/см² сек в диапазоне 10,6—14,4 кэв) в 400 раз меньше максимальной интенсивности во время всплеска.

Интересные результаты были получены на детекторе γ -излучения, установленном на спутнике 1972—076В. На этом спутнике, движущемся по полярной орбите высотой 750 км, был установлен германиевый полупроводниковый спектрометр с высоким энергетическим и временным разрешением^{21–23}. Прибор регистрировал фотоны с энергией 50—2500 кэв при энергетическом разрешении 3,5 кэв. Каждый из каналов 4096-канального анализатора опрашивался один раз в миллисекунду.

На рис. 7 показана зависимость скорости счета прибора во время всплеска 18 декабря 1972 г. Всплеск γ -излучения обладает сложной структурой; в нем наблюдается по крайней мере шесть отдельных субвсплесков. Повышение скорости счета на приборах спутника 1972-076В началось за 1,2 сек до включения логической схемы детекторов спутника «Вела-6В». В данном всплеске не

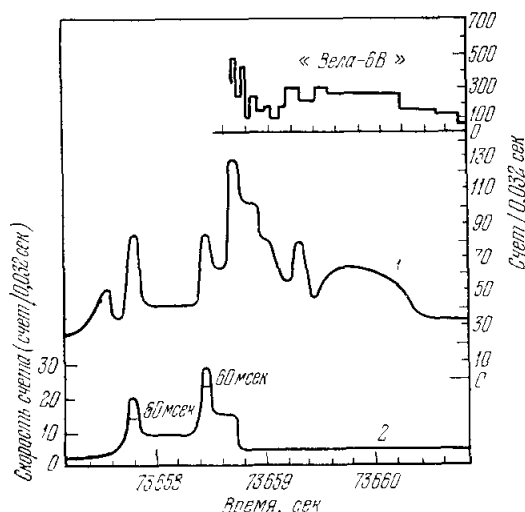


Рис. 7. Временная зависимость скорости счета прибора во время всплеска 18 декабря 1972 г. (наблюдения проводились на спутнике 1972-076В).

(1 — германиевый спектрометр, 2 — антисовпадательный пластиковый счетчик). Для сравнения на рисунке показана временная структура импульса по данным спутника «Вела».

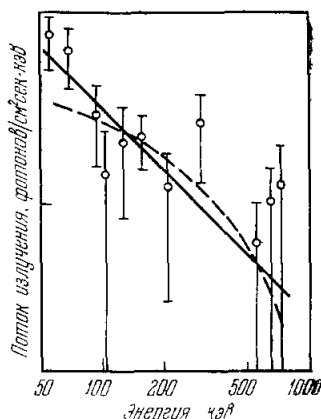


Рис. 8. Энергетический спектр гамма-всплеска 18 декабря 1972 г., измеренный на спутнике 1972-076В.

было обнаружено очень коротких субвсплесков с продолжительностью от 5 мксек до 32 мсек. Спектры, полученные на германиевом спектрометре, аппроксимируются либо экспоненциальной, либо степенной функциями в пределах статистических ошибок (рис. 8).

Гамма-всплески, обнаруженные системой «Вела», были замечены и на других приборах, установленных на различных ИСЗ «Космос-461»³, «Ухуру»²⁴, TD-1A²⁵, OSO-6²⁶, OSO-5^{27, 28}.

В некоторых случаях регистрация γ -всплесков на этих приборах позволила уточнить расположение их источников на небесной сфере⁸. Данные наблюдений γ -всплесков приведены в табл. IV.

в) Поиск новых рентгеновских и γ -всплесков. Открытие γ -всплесков на спутниках «Вела» инициировало поиск аналогичных явлений с помощью детекторов рентгеновского и гамма-излучения, установленных на различных космических аппаратах. Несмотря на то, что ни один из этих приборов не обладал столь же высокой избирательностью к импульсам гамма-излучения, как детекторы спутников «Вела», их более высокая чувствительность или более широкий энергетический диапазон позволили обнаружить довольно интересные явления, хотя степень достоверности полученных результатов и меньше, чем при измерениях на спутниках «Вела».

На космических кораблях «Аполлон-15» и «Аполлон-16» были установлены рентгеновские спектрометры, предназначенные для исследования

Таблица IV

Сводка наблюдений гамма-всплесков

Номер всплеска	Космические аппараты									
	«Вела»	OSO-7	IMP-6	«Ухуру»	SAS-2	OSO-6	OGO-5	TD-1A	«Апол- лон-16»	«Кос- мос-461»
67—1	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—
69—1	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—
69—2	+	—	—	—	—	—	+	—	—	—
69—3	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—
69—4	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—
70—1	+	—	—	—	—	—	+	—	—	—
70—2	+	—	—	—	—	—	+	—	—	—
70—3	+	—	—	—	—	+	+	—	—	—
70—4	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—
70—5	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—
71—1	+	—	—	+	—	—	—	—	—	—
71—2	+	—	+	—	—	—	+	—	—	—
71—3	+	—	+	+	—	—	+	—	—	—
71—4	+	—	—	+	—	—	—	—	—	—
71—5	+	—	+	+	—	—	+	—	—	—
72—1	+	—	+	+	—	—	—	—	—	+
72—2	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—
72—3	+	—	+	—	—	—	—	—	—	—
72—4	+	+	+	—	—	—	—	—	—	—
72—5	+	—	—	—	—	—	—	+	—	—
72—6	+	—	—	—	+	—	—	—	+	—
73—1	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—
73—2	+	—	—	—	+	—	—	—	—	—

химического состава поверхности Луны с окололунной орбиты ^{29, 30}. Эти спектрометры работали в диапазоне мягкого рентгеновского излучения от 1 до 3 *кэв*. На борту космических кораблей «Аполлон-15» и «Аполлон-16» находились также спектрометры гамма-излучения с энергиями выше 200 *кэв*.

В течение двадцати часов наблюдений во время полета по трассе Земля — Луна — Земля было обнаружено два всплеска рентгеновского излучения продолжительностью около двух минут и еще два всплеска несколько большей длительности. На рис. 9 показана запись наблюдений всплеска рентгеновского излучения, зарегистрированного 25 июня 1971 г. Время нарастания импульса несколько меньше минуты, а максимальная интенсивность в несколько раз превышает интенсивность самого яркого рентгеновского источника Скорпион X-1 ³¹. Во время этого всплеска жесткого гамма-излучения с энергией фотонов более 200 *кэв* обнаружено не было.

Направление на источник рентгеновских всплесков установить не удалось, поскольку ширина диаграммы направленности прибора была велика (около 50°). Однако частота появления всплесков оказалась намного большей, чем для обнаруженных на спутниках «Вела» γ -всплесков — 10⁴ всплесков в год на всей небесной сфере против 5—7.

Тем не менее у авторов работы ³¹ нет полной уверенности в том, что наблюдавшиеся всплески имеют рентгеновскую природу. Аналогичные эффекты могли бы быть вызваны всплеском электронов с достаточно мягким энергетическим спектром, ускоренных в плазменных слоях в окололунном пространстве. Детекторов электронов малых энергий на борту «Аполлонов» не было, и поэтому отбросить подобное объяснение нельзя. Однако

соотношение скоростей счета приборов, входящих в состав спектрометра, более характерно для рентгеновского излучения, чем для электронов.

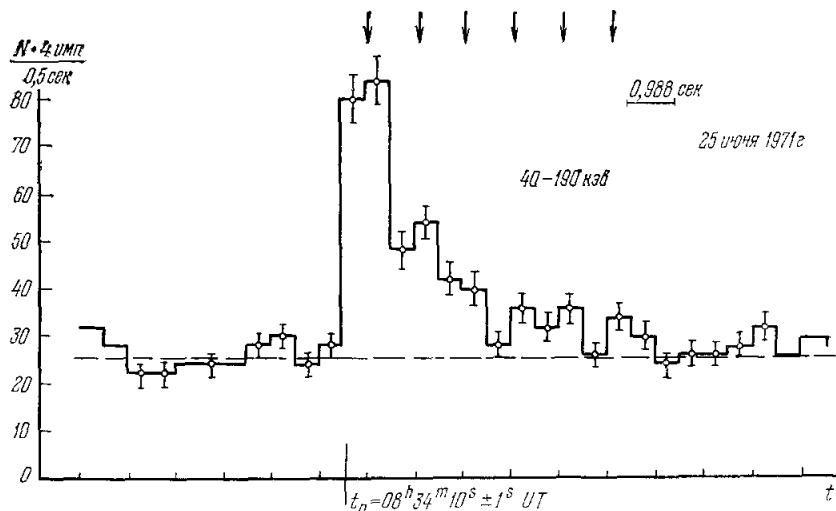


Рис. 9. Суммарная скорость счета во время вспышки 25 июня 1971 г., зарегистрированная на спутнике «Космос-428» в диапазонах*40-190 кэВ⁴.

Стрелками указаны возможные положения максимумов с периодом 1 сек.

Высокая частота повышений скорости счета наблюдалась и на детекторе жесткого рентгеновского излучения спутника OSO-7³². За 261 день наблюдений было обнаружено 374 всплеска, что при учете телесного угла прибора соответствует частоте всплесков порядка 10^4 в год на всей небесной сфере.

Всплески жесткого рентгеновского излучения были обнаружены также на спутнике «Космос-428»⁴. Временная структура всплесков похожа на структуру γ -всплесков (см. рис. 9), однако их спектр более мягкий. Авторы⁴ отмечают, что расположение всплесков на небесной сфере совпадает с положением обнаруженных на том же приборе сильных дискретных переменных источников жесткого рентгеновского излучения^{4,33,34}.

На рис. 10 показано распределение обнаруженных на спутнике «Космос-428» всплесков рентгеновского излучения. Следует отметить очень высокую частоту этого явления — суммарная интенсивность всплесков составляет заметную часть от диффузного фонового рентгеновского излучения.

Совокупность наблюдений рентгеновских всплесков не исключает возможность того, что это явление встречается намного чаще, чем обнаруженные на спутниках «Вела» γ -всплески. Тем не менее окончательное доказательство рентгеновских всплесков может быть получено лишь после проведения коррелированных наблюдений на нескольких космических аппаратах.

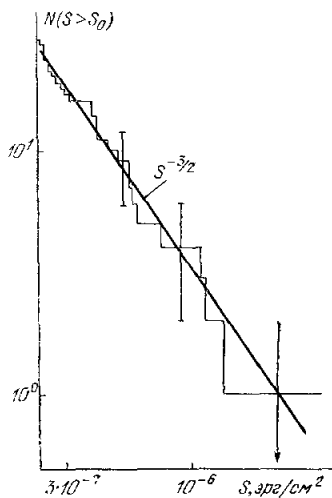


Рис. 10. Распределение рентгеновских всплесков, обнаруженных на ИСЗ «Космос-428», по потокам.

Приборы спутника IMP-6 обладали на порядок большей чувствительностью, чем приборы спутника «Вела». Наблюдения на этих приборах показали, что частота всплесков с малым потоком в диапазоне мягких γ -лучей невелика и не противоречит характерному для изотропного распределения источников закону $S^{-3/2}$ (где S — поток излучения за всплеск). Наблюдения γ -всплесков на баллонах^{35,36} также не привели к обнаружению большого числа событий (однако из-за небольшой экспозиции прибора полученный верхний предел на частоту событий довольно высок: $N \leq 2 \cdot 10^4$ всплесков в год на всей небесной сфере при чувствительности 10^{-7} эрг/см² в диапазоне 100—400 кэв).

г) Наземные наблюдения явлений, ассоциируемых с γ -всплесками. Импульсное рентгеновское и гамма-излучение может обнаружено по воздействию на верхние слои атмосферы. Ионизация, создаваемая жестким излучением в нижней ионосфере, должна приводить к сдвигу фазы длинноволновых радиосигналов и к дополнительному поглощению радиоволн. Расчеты показывают, что ионосферные эффекты, вызываемые γ -всплесками, находятся на пороге чувствительности современной аппаратуры³⁷⁻³⁹. Воздействие жесткого излучения на верхнюю атмосферу может проявляться и в оптической флуоресценции — этот эффект использовался при поиске всплесков жесткого гамма-излучения с энергиями в сотни Мэв^{40,41}.

Тем не менее чувствительность наземных методов регистрации рентгеновских и γ -всплесков значительно ниже, чем у детекторов, размещенных на космических аппаратах.

Гораздо больший интерес представляет наземный поиск явлений, ассоциируемых с γ -всплесками, в радио- и оптическом диапазонах. Открытие радио- и оптического сопровождения γ -всплесков сыграло бы важную роль как в выяснении природы их источников, так и в решении других астрофизических проблем. Оптическое излучение, сопровождающее γ -всплески, может возникать в различных типах источников — при звездных вспышках, при облучении нормального компонента тесной двойной системы жестким излучением и т. д., и исследование его свойств принесло бы важную информацию о природе источников γ -всплесков. Изучение радиоизлучения, связанного с γ -всплесками метagalктического происхождения, смогло бы дать ценные сведения о свойствах межгаллактического газа⁴².

Наблюдения редких всплесков радио- и оптического излучения исключительно сложны из-за наличия большого числа фоновых событий как естественного, так и искусственного происхождения. До сих пор оптических и радиовсплесков, связанных с γ -всплесками, обнаружено не было. Тем не менее существует большой запас по чувствительности приборов для регистрации подобных явлений, и можно надеяться, что в ближайшие годы здесь будут получены важные результаты.

Наблюдения оптического сопровождения всплесков проводились на системе «Prairie Network», предназначенной для обнаружения места падения метеоритов⁴³. На каждой из 16 станций этой системы установлено по четыре фотокамеры с объективами диаметром 5 м и углом зрения 90°. Эта система могла обнаруживать оптические вспышки с яркостью до шестой звездной величины.

Благоприятные условия наблюдений — ясная погода, точное знание координат γ -всплеска — были обеспечены лишь для двух всплесков. Никаких оптических вспышек во время всплесков замечено не было, и верхний предел на интенсивность оптического излучения всплеска составил $m_v \geq +6$ или $F_v \leq 1,2 \cdot 10^{-22}$ эрг/см² сек·гц.

Поиск радиовсплесков в метровом, дециметровом и сантиметровом диапазонах проводится с помощью разнесенных на большие расстояния приемников с антеннами, обладающими широкой диаграммой направленности⁴⁴⁻⁵⁰. Положительных результатов поиски радиовсплесков пока не дали. Верхние пределы на потоки радиоизлучения, сопровождающие γ всплески, составляют 10^{-21} — 10^{22} *вт/м² гц*. Результаты поисков радиовсплесков изложены в обзоре⁵¹.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ γ -ВСПЛЕСКОВ

а) Общие требования к моделям γ -всплесков. Все предлагаемые для интерпретации γ -всплесков модели стремятся объяснить скоротечность наблюдаемого явления и исключительно высокую степень концентрации энергии. Некоторые гипотезы привлекают для объяснения необычных свойств γ -всплесков весьма экстравагантные процессы, до сих пор не находившие себе применения. Тем не менее большая часть выдвинутых гипотез использует для интерпретации γ -всплесков процессы, которые хорошо зарекомендовали себя в астрофизике высоких энергий.

Из приближенной изотропии распределения γ -всплесков по небесной сфере следует, что их источники должны находиться либо на малых расстояниях, меньших толщины галактического диска ($r \lesssim 100$ *пс*), либо на больших, метагалактических расстояниях ($r \gtrsim 10$ *Мпс*). Имеющиеся наблюдения не позволяют пока сделать выбор между возможными локализациями источников γ -всплесков (имеются, однако, некоторые указания в пользу галактической природы γ -всплесков¹⁰⁻¹², но их статистическая обеспеченность невелика).

Модели галактических источников γ -всплесков рассматриваются в п. б). Энерговыведение галактических γ -вспышек ($Q \lesssim 10^{38}$ *эрг*) невелико по сравнению с энерговыведением метагалактических вспышек. Это позволило многим авторам использовать при объяснении γ -всплесков известные в астрофизике высоких энергий механизмы: диссипацию энергии магнитного поля в токовых слоях, аккрецию на компактные объекты и т. д. Основной особенностью галактических источников γ -всплесков является их многочисленность по сравнению с галактическими источниками рентгеновского и гамма-излучения. Если число рентгеновских источников в Галактике по порядку величины равно 10^2 , то число галактических источников γ -всплесков должно превышать 10^5 , поскольку в ближайшей к нам области галактического диска с радиусом порядка сотни парсек должно находиться около десятка источников.

В п. в) рассматриваются модели метагалактических источников γ -всплесков. Энергетические требования к метагалактическим источникам весьма жестки: энергия, выделяющаяся за промежуток времени порядка секунд, должна составлять, в зависимости от расстояния до источника, 10^{48} — 10^{53} *эрг*. Все предложенные до сих пор модели γ -всплесков метагалактического происхождения связаны с коллапсом звезд или звездообразных массивных тел в ядрах активных галактик.

Несмотря на то, что в настоящее время окончательный выбор между моделями источников γ -всплесков не может быть сделан, обзор существующих гипотез представляет определенный интерес. Большое разнообразие моделей, выдвинутых для объяснения природы γ -всплесков, отражает богатство явлений, которые могут быть обнаружены при увеличении чувствительности существующих рентгеновских и гамма-телескопов. Даже в том случае, если предлагаемые модели не будут иметь отношения к γ -всплескам, наблюдаемым в настоящее время, явления, предсказываемые

выдвинутыми моделями, будут существовать, и их исследование должно привести к более глубокому пониманию процессов в нестационарных космических объектах.

В заключение параграфа приведем краткую сводку основных результатов наблюдений γ -всплесков, которые должны быть объяснены в любой предлагаемой для их интерпретации модели.

1) Полный поток энергии за импульс составляет в среднем 10^{-4} эрг/см²; интервал наблюдаемых потоков заключен в пределах от $5 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-6}$ эрг/см².

2) Наблюдаемая частота всплесков составляет около пяти событий в год на всей небесной сфере.

3) Ярko выраженной анизотропии углового распределения γ -всплесков не обнаружено.

4) Длительность всплесков составляет в среднем несколько секунд, изменяясь в интервале от 0,1 до 80 сек. Характерное время флуктуаций интенсивности во время всплеска может достигать сотых долей секунды.

5) Спектры γ -всплесков могут быть аппроксимированы экспоненциальной функцией $F(E) \propto \exp(-E/E_0)$; $E_0 \sim 150$ кэв.

Перейдем теперь к обсуждению конкретных моделей источников γ -всплесков.

б) Галактические источники. 1) *Вспыхивающие звезды*. Одной из первых гипотез о природе γ -всплесков была гипотеза Стекера и Фроста⁵², согласно которой наблюдаемое гамма-излучение образуется при звездных вспышках, подобных солнечным. Аргументом в пользу данной гипотезы послужило сходство между длительностями и спектрами гамма-излучения всплесков и жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек^{52, 53}.

Известно, что источником энергии солнечных вспышек является энергия магнитного поля: магнитная энергия во время вспышек переходит в энергию частиц плазмы в результате диссипации магнитного поля вблизи его нулевых точек⁵⁴.

Жесткое рентгеновское и гамма-излучение может возникать в следующих процессах:

а) тормозном излучении нетепловых электронов, ускоряемых в процессе вспышки;

б) тормозном излучении тепловых электронов горячей термализованной плазмы;

в) обратном комптоновском рассеянии излучения звезды на ускоренных ультрарелятивистских электронах;

г) синхротронном излучении ультрарелятивистских электронов в сильных магнитных полях.

В солнечных вспышках жесткое рентгеновское излучение обусловлено первым механизмом. Однако этот механизм довольно неэффективен — доля энергии электронов, переходящая при их полном торможении в нетепловое тормозное излучение, составляет около 10^{-5} ⁵⁵.

Для того чтобы объяснить наблюдаемые потоки излучения γ -всплесков вспышкой на звезде, находящейся на расстоянии в 10—100 пс, надо предположить, что энергия, излучаемая в диапазоне гамма-лучей, составляет 10^{36} — 10^{38} эрг. Если доля энергии, переходящей при вспышке к гамма-лучам, такая же, как и в солнечных вспышках (согласно⁵³), то полная энергия вспышки составит 10^{41} — 10^{43} эрг. Эта энергия должна была бы высветиться в других диапазонах — оптическом, ультрафиолетовом или рентгеновском, чего до сих пор не наблюдалось.

Коэффициент полезного действия гамма-вспышки можно повысить, предполагая, что гамма-кванты возникают при тормозном излучении горячей плазмы с температурой порядка 10^9 °К. Однако существование быстрых флуктуаций интенсивности γ -всплесков накладывает сильные ограничения на возможные параметры источников. Характерное время флуктуаций потока гамма-излучения не может быть короче времени охлаждения излучающей плазмы, равного

$$t = 2 \cdot 10^{11} \sqrt{T} n^{-1} \text{ сек.} \quad (4)$$

При температуре $T = 1,5 \cdot 10^9$ °К, соответствующей спектру (2) с $E_0 = 150$ кэв и времени флуктуации $\sim 1,6 \cdot 10^{-2}$ сек, концентрация плазмы в излучающей области должна превышать $6 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$.

Столь высокая концентрация в нормальных звездах достигается в слоях, лежащих значительно ниже фотосферы, и только в случае компактных звезд, в частности белых карликов, такая концентрация будет соответствовать оптически тонкому поверхностному слою звезды.

Белые карлики — как источники γ -всплесков — обладают еще одним преимуществом: магнитные поля, наблюдаемые на их поверхности, достигают в некоторых случаях 10^7 э 56 . Столь сильные магнитные поля могут послужить источником энергии для мощных звездных вспышек.

Перейдем теперь к обсуждению моделей γ -всплесков, в которых жесткое электромагнитное излучение генерируется ультрарелятивистскими электронами.

Бречер и Моррисон 57 предложили модель γ -всплесков, в которой гамма-излучение образуется при рассеянии теплового излучения звезды с энергией фотонов ~ 1 эв на электронах с энергией 50—500 Мэв, выброшенных из звезды во время вспышки и распространяющихся вдоль силовых линий ее магнитного поля. В этом случае гамма-излучение может быть сосредоточено внутри очень малого телесного угла, что снижает необходимую для объяснения наблюдаемых всплесков полную мощность гамма-вспышки. Однако выигрыш в мощности достигается в этом случае за счет возрастания числа источников, необходимого для объяснения наблюдаемой частоты появления γ -всплесков. Следует отметить, что в данной модели коэффициент трансформации энергии релятивистских электронов в энергию гамма-излучения невелик ($\sim 10^{-5}$ 57).

В сильных магнитных полях компактных объектов возможен еще один механизм генерации γ -всплесков — синхротронное излучение ультрарелятивистских электронов. При магнитных полях порядка 10^7 э, наблюдаемых у белых карликов, синхротронное излучение попадает в диапазон гамма-лучей при энергии электронов порядка 10^9 эв.

Наблюдательная проверка гипотезы о звездных вспышках может быть достигнута при отождествлении источников γ -всплесков с конкретными космическими объектами и последующем проведении коррелированных наблюдений в различных диапазонах.

2) *Нестационарная аккреция на компактные объекты.* Светимость галактических источников γ -всплесков сравнима со светимостью стационарных рентгеновских источников, связанных с компактными объектами в тесных двойных системах. Источником энергии этих рентгеновских источников является выпадение вещества, истекающего из нормальной звезды, на компактный объект — так называемая аккреция.

Отличительной особенностью галактических рентгеновских источников в тесных двойных системах является резкая переменность. Характерные времена перемены колеблются от суток, часов и до миллисекунд $^{58-60}$.

Эта особенность аккреции на компактные объекты и возможность обеспечения высокой светимости и жесткого спектра излучения привели к появлению гипотез о связи γ -всплесков с аккрецией на компактные объекты ⁶¹⁻⁶³.

Тем не менее подобные источники γ -всплесков должны отличаться от стационарных рентгеновских источников по крайней мере в двух аспектах:

а) Как отмечалось выше, число источников γ -всплесков в Галактике должно более чем на три порядка превосходить число стационарных рентгеновских источников.

б) Светимость источников γ -всплесков во время вспышки превосходит светимость в спокойном состоянии более чем на пять порядков величины.

К настоящему времени в рамках этой гипотезы предложены две модели, различно решающие вопрос о природе аккрецируемого вещества. Первая модель, предложенная Харвитом и Солпитером ⁶¹ и независимо Шкловским ⁶², связывает γ -всплески с аккрецией комет на одиночные белые карлики или нейтронные звезды. Масса комет, равная, согласно грубым оценкам, $10^{16} - 10^{21}$ г ⁶³, соответствует по порядку величины массе аккрецируемого газа, необходимой для объяснения энергетики γ -всплесков.

Однако для объяснения наблюдаемой частоты γ -всплесков даже при наиболее благоприятных предположениях о концентрации нейтронных звезд в Галактике ($n \sim 0,03 \text{ пс}^{-3}$ ⁶⁴) необходимо считать, что плотность кометного роя вокруг звезды по крайней мере на два-три порядка выше, чем у Солнца. Это предположение, так же как и возможность выживания кометного роя при образовании нейтронной звезды, кажутся маловероятными.

Вторая модель объясняет генерацию γ -всплесков аккрецией газа, выброшенного при вспышке нормальной звезды, на компактный объект, образующий с нормальной звездой тесную двойную систему ⁶⁵.

Для объяснения γ -всплесков в рамках данной модели необходимо предполагать, что массы газа, выбрасываемые при звездных вспышках, значительно превосходят массу газа, выбрасываемую при солнечных вспышках, в особенности, если аккреция идет на белые карлики.

Существование подобных источников не вызывает сомнения. Однако их отождествление с наблюдаемыми γ -всплесками сталкивается с определенными трудностями. Основной из них является необходимость объяснения малой длительности наблюдаемых γ -всплесков, в сотни раз меньшей времени пролета газового облака от вспыхивающей звезды до компактного объекта.

3) *Активность нейтронных звезд.* Следующая модель γ -всплесков ⁶⁶ также связывает это явление с активностью нейтронных звезд. Однако в отличие от предыдущих моделей в ней предполагается, что γ -всплеск генерируется в результате выброса из молодых нейтронных звезд вещества, представляющего собой смесь сверхтяжелых ядер и свободных нейтронов. Гамма-излучение образуется при делении сверхтяжелых ядер, β -распаде радиоактивных элементов и радиационном захвате свободных нейтронов.

Источником энергии, обеспечивающим такой выброс, может быть запасенная в оболочке нейтронной звезды ядерная энергия, связанная с неравновесным химическим составом ⁶⁷, или энергия, выделяющаяся при плавлении твердого ядра нейтронной звезды ⁶⁸.

Предполагая, что увеличение кинетической энергии волокон в Крабовидной туманности, наблюдавшееся через некоторое время после резкого изменения периода пульсара NP 0532, связано с выбросом вещества из нейтронной звезды, можно получить, что масса выброшенного вещества

составляет $\sim 10^{21}$ г. Выброс из нейтронной звезды такого количества неравновесного вещества должен привести к выделению энергии $\sim 10^{38}$ эрг, что более чем достаточно для объяснения энергетики γ -всплесков.

Спектр первичного гамма-излучения, образующегося при ядерных взаимодействиях, весьма сложен, и его максимум должен приходиться на энергию порядка 1 Мэв. Для объяснения наблюдаемого спектра необходимо предполагать, что в процессе выхода гамма-излучения из облака расширяющегося вещества фотоны уменьшают свою энергию на порядок величины.

Гамма-всплески, одновременные со скачками периода пульсаров, пока не наблюдались. Возможно, что это связано со значительной удаленностью наиболее активных пульсаров. Оценки показывают, что для регистрации γ -всплесков от пульсаров NP 0532 и PSR 0833 необходимо увеличить чувствительность детекторов примерно на порядок величины.

Другой возможностью генерации γ -всплесков в процессах, связанных с активностью нейтронных звезд, являются возмущения магнитосферы пульсаров, обусловленные либо перестройкой внутренних слоев нейтронной звезды⁶⁹, либо неустойчивостью самой магнитосферы⁷⁰.

в) М е т а г а л а к т и ч е с к и е и с т о ч н и к и. 1) *Взрыв сверхновой*. За несколько лет до открытия γ -всплесков Колгейт⁷¹ предсказал существование мощного импульса гамма-излучения, возникающего при взрыве сверхновой. Согласно гипотезе Колгейта, гамма-излучение образуется при выходе релятивистской ударной волны на поверхность предсверхновой.

Образование ударной волны в предсверхновой связано с мощным энерговыделением вблизи ее центра, например при коллапсе ядра звезды. Ударная волна, распространяясь в среде с уменьшающейся плотностью, по мере приближения к поверхности звезды увеличивает свою скорость, и, когда доля массы перед фронтом ударной волны достигает 10^{-4} массы звезды (при массе звезды $5M_{\odot}$ и минимальном радиусе $2 \cdot 10^9$ см), волна становится релятивистской. Температура нагретого газа определяется выражением⁷¹

$$aT^4 = 2\gamma_s^2 \rho_0 c^2, \quad (5)$$

где ρ_0 — плотность газа перед фронтом ударной волны, $\gamma_s = 1/\sqrt{1-(v/c)^2}$, v — скорость газа за фронтом ударной волны, a — константа, равная $7,56 \cdot 10^{-15}$ эрг/град⁴.

Вблизи поверхности звезды температура нагретого газа достигает $2 \cdot 10^9$ °К. Когда оптическая толща газа перед фронтом ударной волны становится порядка единицы, нагретый газ генерирует импульс гамма-излучения.

Средняя энергия квантов в системе, связанной с газом за фронтом ударной волны, равна $3kT$. Из-за доплеровского смещения, обусловленного релятивистским движением нагретого газа ($\gamma_s \approx 1,5 \cdot 10^3$), средняя энергия наблюдаемых квантов возрастает, достигая

$$h\nu = 3kT \sqrt{\frac{1-(v/c)}{1+(v/c)}} \approx 6kT\gamma_s \approx 2 \text{ Гэв}. \quad (6)$$

Длительность всплеска гамма-излучения составляет⁷¹

$$\tau \approx \frac{R}{2\gamma_s^2 c} \approx 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ сек}. \quad (7)$$

Полная энергия, излучаемая в гамма-диапазоне, при взрыве сверхновой с $M = 5 \cdot M_{\odot}$ и $R = 2 \cdot 10^9$ см достигает $5 \cdot 10^{47}$ эрг. Такого энерговыделения было бы достаточно для объяснения наблюдаемого потока γ -всплесков, если сверхновые, генерирующие эти всплески, находятся

в ближайших галактиках. Однако другие параметры гамма-излучения сверхновых — средняя энергия фотонов, длительность всплеска — сильно отличаются от наблюдаемых характеристик γ -всплесков. Всплески жесткого гамма-излучения, предсказанные Колгейтом, до сих пор обнаружены не были.

Предложенное в недавней работе Колгейта ⁷² увеличение радиуса предсверхновой до 10^{12} см дает возможность приблизить длительность и энергию γ -всплесков к наблюдаемым значениям. Однако в этом случае возникает проблема обеспечения энергетического выхода, так как релятивистская ударная волна в звездах с большими радиусами и малыми параболическими скоростями очень слаба и энергии, излучаемой в гамма-диапазоне, недостаточно для объяснения наблюдаемых потоков гамма-излучения.

Другая трудность данной модели связана с тем, что при выходе ударной волны на поверхность предсверхновой должен наблюдаться одиночный всплеск гамма-излучения с монотонным уменьшением и увеличением потока, в то время как наблюдаемые γ -всплески имеют, как правило, сложную структуру (см. рис. 5).

2) *Коллапс звезд*. Другим процессом, который мог бы обеспечить энергетiku метagalaktических γ -всплесков, является гравитационный коллапс. Рассмотрим модели, в основе которых лежит предположение о гравитационном коллапсе звезд как причине γ -всплесков.

Еще до открытия γ -всплесков Лебланк и Вильсон, рассматривая коллапс вращающейся магнитной звезды с массой $7M_{\odot}$, показали, что в процессе коллапса из звезды вдоль ее оси вращения выбрасывается вещество с массой $\sim 2 \cdot 10^{31}$ г, температура, плотность и напряженность магнитного поля внутри которого равны соответственно $3,5 \cdot 10^9$ К, 10^6 г/см³ и 10^{13} э ⁷³. Тепловое излучение данного выброса, согласно Джелли ⁷⁴, может быть ответственно за генерацию γ -всплесков. Если расстояние до коллапсирующей звезды не превосходит сотни мегапарсек, то внутренней энергии выброшенного газа ($\sim 10^{49}$ эрг) достаточно для объяснения наблюдаемого потока гамма-излучения. Данная модель в состоянии объяснить наблюдаемую частоту γ -всплесков. Однако предсказание спектральных свойств γ -всплесков при коллапсе магнитных звезд осложняется необходимостью рассмотрения лучистого переноса в расширяющемся облаке горячей оптически толстой плазмы.

Еще одним возможным источником гамма-излучения при коллапсе звезд является поглощение нейтрино в поверхностных слоях сжимающейся звезды ^{66,75}. Основная часть энергии, выделяющейся при коллапсе звезд, переходит к нейтрино (до 10^{53} эрг при массе порядка нескольких масс Солнца). Тем не менее доля энергии, выделяющаяся в оптически тонком для гамма-излучения поверхностном слое звезды, невелика ⁶⁶, и это явление не может быть ответственно за наблюдаемые γ -всплески. Нелинейное взаимодействие нейтрино и антинейтрино в окрестностях коллапсирующей звезды, приводящее к образованию электрон-позитронных пар и их последующей аннигиляции, приводит к значительно большему энерговыделению ⁷⁶, однако и оно оказывается недостаточным для объяснения наблюдаемых γ -всплесков.

Авторами настоящего обзора была высказана гипотеза, что γ -всплески могут возникать при коллапсе магнитных звезд с $M \sim 10^5 M_{\odot}$ ⁷⁷⁻⁷⁹. В пользу существования таких сверхмассивных звезд в ядрах активных галактик сейчас говорят многочисленные наблюдательные данные ⁸⁰. Магнитное поле этих звезд должно быть очень сильным: магнитная энергия звезды по порядку величины равна ее гравитационной энергии ⁸¹. В процессе эволюции сверхмассивная звезда излучает энергию в окружающее

пространство, что приводит к ее сжатию. Наиболее вероятным исходом эволюции сверхмассивной звезды является ее релятивистский коллапс. В этом случае вне сверхмассивной звезды индуцируется электрическое поле, ускоряющее частицы окружающей ее плазмы до релятивистских энергий. Ускоренные таким образом электроны излучают жесткие гамма-кванты синхротронного излучения. Величина гамма-излучения максимальна при приближении звезды в процессе ее сжатия к своему гравитационному радиусу.

Вследствие небольших размеров области излучения и высокой плотности фотонов жесткие гамма-кванты поглощаются в процессах $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$ и $\gamma + e^\pm \rightarrow 2e^\pm + e^\mp$. В результате вокруг сколлапсировавшей звезды с $M \sim 10^5 M_\odot$ образуется оптически толстое облако с размерами $\sim 10^{11}$ см, состоящее из равновесного электромагнитного излучения, находящегося в локальном термодинамическом равновесии с электрон-позитронными парами. Поверхностная температура облака T_s определяется условием прозрачности по отношению к комптон-эффекту при равновесной концентрации электрон-позитронных пар. Расчеты показывают, что поверхностная температура слабо изменяется с изменением толщины излучающего слоя и лежит в пределах $(2-3) \cdot 10^8$ К.

Полное энерговыделение облака составляет

$$Q \sim 4\pi\sigma R_r^2 T_s^4 \Delta t, \quad (8)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-5}$ эрг/см² сек град⁴ — постоянная Стефана — Больцмана, R_r — размер излучающего облака, Δt — длительность вспышки. При $R_r \sim 10^{11}$ см и $\Delta t \sim R_r/c$ получим $Q \sim 10^{52} - 10^{53}$ эрг.

Облако равновесного излучения должно расширяться с релятивистской скоростью, что приведет к изменению спектра и продолжительности всплеска, а именно: характерная энергия фотонов должна увеличиться в γ_s раз, где γ_s — лоренц-фактор излучающей поверхности, а продолжительность всплеска должна уменьшиться в γ_s^2 раз. Оценки показывают, что $\gamma_s \sim 3-10$. Поэтому максимум спектра должен приходиться на область энергий порядка 100 кэв. Наблюдаемые флуктуации интенсивности γ -всплесков с длительностью порядка десятков миллисекунд могут быть объяснены несферичностью расширения и присутствием нескольких расширяющихся облаков, образующихся в различных нейтральных точках поля коллапсирующей звезды.

В рамках данной модели среднее расстояние до источников наблюдаемых γ -всплесков по порядку величины равно фотометрическому радиусу Метагалактики $\sim 10^{28}$ см при постоянной Хаббла $H = 75$ км/сек · Мпс. При энерговыделении $10^{52} - 10^{53}$ эрг поток энергии за импульс будет соответствовать наблюдаемому.

Основным наблюдательным тестом модели является измерение зависимости числа всплесков от потока. Чувствительность спутников системы «Вела» достаточна для наблюдения значительной части всех происходящих во Вселенной коллапсов сверхмассивных звезд. Поэтому число наблюдаемых γ -всплесков с увеличением чувствительности детекторов должно выходить на насыщение при частоте γ -всплесков $\sim 10 - 10^3$ всплесков в год на небесной сфере^{79, 82} и при дальнейшем увеличении чувствительности не изменяться.

4. ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ γ -ВСПЛЕСКОВ

Разнообразие гипотез, выдвинутых для интерпретации γ -всплесков, в некоторой степени отражает неопределенность экспериментальной ситуации. Существующие данные наблюдений не позволяют отождествить источники γ -всплесков с определенным классом космических объектов.

Это обстоятельство определяет основные задачи, стоящие перед наблюдателями в ближайшем будущем.

Отождествление источников γ -всплесков с тем или иным классом астрофизических объектов может быть достигнуто либо прямым отождествлением γ -всплесков с известными оптическими, радио- или рентгеновскими источниками, либо косвенным отождествлением, полученным с помощью статистических методов.

Прямое отождествление источника γ -всплеска, основанное лишь на наблюдениях всплесков, требует весьма высокой точности определения небесных координат. Практика показывает, что для успешного отождествления рентгеновских источников с оптическими объектами необходимо достичь точности определения координат лучше одной угловой минуты. Современное состояние гамма-астрономии позволяет добиться подобной точности лишь при проведении одновременных наблюдений γ -всплесков с помощью приборов, разнесенных на расстояния порядка астрономической единицы ($\sim 1,5 \cdot 10^{13}$ см). Возможность проведения наблюдений γ -всплесков на приборах, установленных на автоматических межпланетных станциях, позволяющих определять координаты γ -всплесков с точностью до 0,1—1 угловой минуты, обсуждается в Годдардовском центре НАСА⁸³.

Источники γ -всплесков могли бы быть отождествлены с космическими объектами и при менее точном определении координат. Это достигается с помощью коррелированных наблюдений в нескольких диапазонах (так были отождествлены рентгеновские источники Лебедь X-1 и Лебедь X-3). Данный метод столкнется с большими трудностями из-за малой частоты появления γ -всплесков. Тем не менее здесь могут открыться хорошие перспективы, если будет осуществлено возможное повышение в 10^2 раз чувствительности коррелированных оптических наблюдений с обзором всей видимой полусферы⁴³.

Отождествление источников γ -всплесков с определенным классом астрофизических объектов может быть достигнуто и средствами статистической астрономии — исследованием распределения γ -всплесков по потокам и галактическим координатам. Выводы, сделанные по данным проведенных наблюдений, не обладают достаточной статистической обеспеченностью. Однако увеличение статистики наблюдений, обусловленное ростом чувствительности приборов, позволило бы получить важные результаты. Поиск γ -всплесков с высокой чувствительностью будет проводиться в ближайшие годы с помощью как специализированных телескопов для исследования всплесков, так и рентгеновских и гамма-телескопов общего назначения.

В настоящее время в лабораториях различных стран мира разрабатываются проекты приборов, позволяющих проводить наблюдения γ -всплесков с высоким спектральным и временным разрешением.

Лос-аламосская научная лаборатория, сотрудниками которой были открыты γ -всплески, готовит новый эксперимент, дополняющий наблюдения, проводимые на спутниках «Вела»⁸⁴. Этот эксперимент будет проводиться на спутнике «Солрад-Хи», запуск которого намечается на начало 1975 г. На этом спутнике будут установлены два сцинтилляционных счетчика с кристаллами CsI диаметром 38 мм и длиной 38 мм, логический блок и блок памяти. Проектируемый прибор позволит проводить спектральные исследования γ -всплесков с высоким временным разрешением до 0,3 мсек; точность привязки бортовых часов к мировому времени достигнет 1 мсек. Аналогичный прибор будет установлен и на втором спутнике серии «Солрад-Хи». Лос-аламосская научная лаборатория предложила также проект научной аппаратуры для исследования γ -всплесков, который

мог бы быть размещен на малом искусственном спутнике ⁸⁵. Осуществление этого проекта позволило бы значительно увеличить чувствительность приборов для поиска γ -всплесков.

В ряде лабораторий разрабатываются новые конструкции приборов для исследования космических γ -всплесков. Так, в ИКИ АН СССР и ФТИ АН СССР была предложена новая методика определения координат γ -всплесков, основанная на анизотропии эффективной площади сцинтилляционных счетчиков ⁸⁶. Можно надеяться, что проведение новых наблюдений на различных спутниках позволит разрешить загадку нового необычного явления — космических γ -всплесков.

Институт космических исследований
АН СССР

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. R. W. Klebesadel, I. B. Strong, R. A. Olson, *Astrophys. J. Lett.* **182**, L85 (1973).
2. Proceedings of Conference on Transient Cosmic Gamma and X-ray Sources (September 20—21, 1973). Los Alamos Report LA 5505-C, February 1974.
3. Е. П. Мазец, С. В. Голенецкий, В. Н. Ильинский, *Письма ЖЭТФ* **19**, 126 (1974).
4. О. С. Бабушкина, Л. С. Братолобова-Цулукидзе, М. И. Кудрявцев, А. С. Мелиоранский, И. А. Савенко, Б. Ю. Юшков, *Письма Астрон. ж.* **1**, 20 (1975).
5. *Proc. IEEE* **53**, No. 12 (1965).
6. R. W. Klebesadel, *сборник* ², p. 1.
7. R. Giacconi, *Astrophys. J. Lett.* **173**, L79 (1972).
8. R. W. Klebesadel, I. B. Strong, R. A. Olson, *ibid.* **188**, L1 (1974).
9. I. B. Strong, *сборник* ², p. 10.
10. I. B. Strong, *ibid.*, p. 122.
11. I. B. Strong, R. W. Klebesadel, *Bull. Am. Astron. Soc.* **6**, 270 (1974).
12. I. B. Strong, R. W. Klebesadel, *Nature* **251**, 396 (1974).
13. О. Ф. Прилуцкий, *Астрон. цирк.*, № 840 (1974).
14. О. Ф. Прилуцкий, доклад на Всесоюзном семинаре по рентгеновской и гамма-астрономии, КрАО, октябрь 1974 г.
15. R. W. Klebesadel, I. B. Strong, R. A. Olson, *Bull. Am. Astron. Soc.* **5**, 395 (1974).
16. T. L. Cline, U. D. Desai, in: *Proc. of 13th Intern. Conference on Cosmic Rays*, v. 1, Denver, 1973, p. 80.
17. T. L. Cline, U. D. Desai, R. W. Klebesadel, I. B. Strong, *Astrophys. J. Lett.* **185**, L1 (1973).
18. T. L. Cline, U. D. Desai, *сборник* ², p. 45.
19. M. P. Ulmer, *ibid.*, p. 33.
20. W. A. Wheaton, M. P. Ulmer, W. A. Baity et al., *Astrophys. J. Lett.* **185**, L77 (1973).
21. G. N. Nakano, W. L. Imhof, J. B. Reagan, R. G. Johnson, in: *Gamma-Ray Astrophysics*, NASA, SP-339, p. 71.
22. W. L. Imhof, G. N. Nakano, R. G. Johnson, J. B. Reagan, *ibid.*, p. 77.
23. W. L. Imhof, G. N. Nakano, R. G. Johnson, et al., *Astrophys. J. Lett.* **191**, L7 (1974).
24. D. Koch, H. Gursky, H. Tananbaum, E. Kellogg, *сборник* ², p. 16.
25. W. Voges, K. Pinkau, *ibid.*, p. 49.
26. G. G. Palumbo, G. Pizzichini, G. R. Vespignani, *Astrophys. J. Lett.* **189**, L9 (1974).
27. J. L'Heureux, *сборник* ², p. 81.
28. J. L'Heureux, *Astrophys. J. Lett.* **187**, L53 (1974).
29. A. E. Metzger, R. E. Parker, R. H. Parker et al., *сборник* ², p. 72.
30. I. Adler, J. Trombka, J. Gerard et al., *Science* **175**, 436 (1972).
31. P. Gorenstein, P. Bjorkholm, F. R. Harnden, *сборник* ², p. 74.
32. W. A. Wheaton, M. P. Ulmer, W. A. Baity, L. E. Peterson, *ibid.*, p. 61.
33. Л. С. Братолобова-Цулукидзе, Н. Л. Григоров, Б. П. Колесников, М. И. Кудрявцев, А. С. Мелиоранский, И. А. Савенко, Ю. С. Фурсов, *Астрон. цирк.*, № 762, 4 (1973).

34. S. Biswas, R. K. Manchanda, B. V. Sree-Kantan, Preprint of Iata Institute CR-XA-24(74), Bombay, November 1974.
35. R. D. Bleach, J. D. Kurfess, W. N. Johnson, сборник ², p. 98.
36. T. J. Rosenberg, R. R. Brown, *ibid.*, p. 204.
37. R. W. Drever, W. P. S. Meikle, J. Hough et al., *ibid.*, p. 132.
38. R. T. Brown, *ibid.*, p. 186.
39. R. T. Brown, *Nature* **246**, 83 (1973).
40. J. L. Elliott, SAO Report No. 341, January 1972.
41. H. Ogelman, *J. Geophys. Res.* **78**, 3033 (1973).
42. V. L. Ginzburg, *Nature* **246**, 415 (1973).
43. J. E. Grindlay, E. L. Wright, R. E. McCrosky, *Astrophys. J. Lett.* **192**, L113 (1974).
44. W. N. Charman, J. H. Fruin, J. V. Jelley, *Nature* **232**, 177 (1971).
45. R. B. Partridge, G. T. Wrixon, *Astrophys. J. Lett.* **173**, L75 (1972).
46. R. B. Partridge, *Phys. Rev. Lett.* **26**, 912 (1971).
47. V. A. Hughes, D. S. Retallack, *Nature* **242**, 105 (1973).
48. R. B. Partridge, G. T. Wrixon, Н. Рена, К. С. Turner, *ibid.* **245**, 53.
49. В. С. Троицкий, Л. Н. Бондарь, А. М. Стародубцев и др., *Изв. вузов (Радиофизика)* **16**, 323 (1973).
50. В. С. Троицкий, Л. Н. Бондарь, А. М. Стародубцев и др., *ДАН СССР* **212**, 607 (1973).
51. В. С. Троицкий, Л. Н. Бондарь, А. М. Стародубцев, *УФН* **113**, 719 (1974).
52. F. W. Stecker, K. J. Frost, *Nature* **245**, 70 (1973).
53. K. J. Frost, *Astrophys. J. Lett.* **158**, L159 (1969).
54. С. И. Сыроватский, *Астрон. ж.* **43**, 340 (1966).
55. Л. М. Озерной, О. Ф. Прилуцкий, И. Л. Розенталь, *Астрофизика высоких энергий*, М., Атомиздат, 1973, гл. II.
56. В. Н. Саонов, *УФН* **108**, 583 (1972).
57. K. Brecher, Ph. Morrison, *Astrophys. J. Lett.* **187**, L97 (1974).
58. S. Rappaport, R. Doxsey, W. Zaumen, *ibid.* **168**, L43 (1971).
59. E. E. Becklin, G. Neugebauer, et al., *Nature* **245**, 302 (1973).
60. R. Giacconi, E. Kellogg, et al., *Astrophys. J. Lett.* **165**, L27 (1971).
61. M. Harwit, E. E. Salpeter, *ibid.* **186**, L37 (1973).
62. И. С. Шкловский, *Астрон. ж.* **51**, 665 (1974).
63. J. C. Brandt, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* **6**, 267 (1968).
64. J. Ostriker, M. J. Rees, J. Silk, *Astrophys. Lett.* **6**, 179 (1970).
65. D. Q. Lamb, F. K. Lamb, D. Pines, сборник ², p. 192.
66. Г. С. Бисноватый-Коган, В. С. Имшенник, Д. К. Надежин, В. М. Чечеткин, Препринт ИПМ АН СССР № 12, Москва, 1974.
67. Г. С. Бисноватый-Коган, В. М. Чечеткин, *Письма ЖЭТФ* **17**, 622 (1973).
68. Ю. М. Брук, *Астрофизика* **11**, 58 (1975).
69. A. I. Tsygan, *Astron. and Astrophys.* **38**, 287 (1975).
70. F. Pacini, M. Ruderman, *Nature* **251**, 399 (1974).
71. S. A. Colgate, *Can. J. Phys.* **46**, S476 (1968).
72. S. A. Colgate, *Astrophys. J.* **187**, 333 (1974).
73. J. M. LeBlanc, J. R. Wilson, *ibid.* **161**, 541 (1969).
74. J. V. Jelley, *Nature* **249**, 747 (1974).
75. R. Ramaty, J. M. Cohen, сборник ², p. 146.
76. V. S. Beresinsky, O. F. Prilutski, in: *Proc. of 14th Intern. Conference on Cosmic Rays, München, 1975*, p. 448.
77. О. Ф. Прилуцкий, И. Л. Розенталь, В. В. Усов, *Природа*, № 3, 93 (1974).
78. О. Ф. Прилуцкий, И. Л. Розенталь, В. В. Усов, *УФН* **113**, 718 (1974).
79. O. F. Prilutski, V. V. Usov, *Astrophys. and Space Sci.* **33**, 453 (1975).
80. L. M. Ozerouy, in: *Proc. of 1st European Astrophysical Meeting, Athens, 1972*, p. 126.
81. L. M. Ozerouy, V. V. Usov, *Astrophys. and Space Sci.* **25**, 149 (1973).
82. В. В. Усов, Г. В. Чибисов, *Астрон. ж.* **52**, 192 (1975).
83. T. L. Cline, U. D. Desai, сборник ², p. 278.
84. R. W. Klebesadel, R. E. Spalding, *ibid.*, p. 290.
85. J. P. Conner, W. D. Evans et al., *ibid.*, p. 262.
86. Е. М. Круглов, Г. М. Городненский, В. Л. Воков, Препринт ФТИ АН СССР № 463, Ленинград, 1974.