

Реакция атмосферы на близкий гамма-всплеск: химические процессы и возможные исторические проявления

О.С. Угольников

Институт космических исследований РАН, 119997, Москва, Профсоюзная ул., 84/32.
e-mail: ougolnikov@gmail.com

Космические гамма-всплески бесспорно являются самым удивительным классом астрономических объектов, открытых в XX веке. Можно без преувеличения сказать, что космические гамма-всплески были основным объектом самых оживленных дискуссий астрономов в течение всех 40 лет, прошедших с момента их открытия. Ни у каких других объектов, открытых в XX веке, природа не оставалась невыясненной в течение такого большого промежутка времени. Лишь в самые последние годы столетия был сделан очень большой шаг вперед в исследованиях этих объектов.

Космические гамма-всплески, как и многие другие классы астрономических объектов, были открыты случайно, с помощью системы американских спутников Vela в конце 60-х годов XX века [1]. Гамма-всплески являлись сравнительно кратковременными (от долей секунды до 1000 секунд) вспышками гамма-излучения в диапазоне от десятков кэВ до нескольких МэВ, приходящих из космоса. Поток от гамма-всплесков составлял от 10^{-11} до 10^{-6} Вт/м².

Точность определения координат в гамма-области невелика, и положения источников вспышек определялись с погрешностью порядка 1°. Поэтому связать источники вспышек с какими-либо известными небесными объектами было невозможно. При этом гамма-всплески проявляли удивительное свойство – источники равномерно заполняли все небо, не проявляя никакой связи с проекцией плоскости Галактики (Млечным Путем), эклиптической и т.д. Это в известной мере затрудняло решение вопроса о происхождении гамма-всплесков.

К середине 90-х годов XX века, во многом благодаря эксперименту BATSE (Burst And Transient Source Experiment) на борту Космической Гамма-Обсерватории им. Комптона (CGRO, США), были зафиксированы почти 3000 гамма-всплесков. Частота их регистрации составляла примерно 1 всплеск в день. Но и это не выявило значимых неоднородностей в их распределении на небе и не решило вопрос об их происхождении.

Существовавшие гипотезы о природе гамма-всплесков делились на три основные группы. В первом случае предполагалось, что источники вспышек находятся близко к Солнцу (в масштабах Галактики) или даже на окраинах Солнечной системы. При этом оставалось неясным, какие процессы могли бы вызвать кратковременные вспышки гамма-излучения. Вторая группа гипотез

связывала вспышки со старым звездным населением нашей Галактики. Эти объекты располагаются в обширном сферическом гало Галактики и так же могут изотропно заполнять небо. Однако, в этом случае были бы зафиксированы некоторые вспышки из гало ближайших гигантских галактик (туманность Андромеды, туманность Треугольника), и распределение вспышек на небе имело бы максимум вблизи положения этих галактик. Но этого также не наблюдалось.

Наконец, третий класс гипотез связывал гамма-всплески с далекими галактиками, удаленными на расстояния, сопоставимые с масштабным фактором Вселенной (порядка 10^{26} м). Межзвездное и межгалактическое поглощение гамма-излучения мало, и мы можем наблюдать практически все вспышки, происходящие во Вселенной. Распределение галактик на таком большом пространственном масштабе изотропно, отсюда вытекает и наблюдаемое распределение источников вспышек на небе.

Очевидно, что эти гипотезы предполагали гигантское энерговыделение – до 10^{46} Вт (для сравнения – светимость Солнца составляет $4 \cdot 10^{26}$ Вт). При этом, кратковременность вспышек указывает на малые размеры источников, сопоставимые с размерами одной звезды. Условия казались экзотическими, и хотя эти гипотезы наилучшим образом объясняли наблюдаемые свойства вспышек, окончательно поверить в них можно только после точного измерения координат и отождествления источников гамма-всплесков с далекими галактиками.

Решить проблему точной локализации гамма-всплесков (разумеется, только лишь некоторых) удалось в самые последние годы XX столетия, с запуском итало-голландского спутника Верро-SAX. Наряду с гамма-детекторами, на борту спутника находились рентгеновские телескопы, способные быстро наводиться на область неба, заданную приблизительными координатами гамма-всплеска. В рентгеновской области спектра точность измерения координат уже значительно лучше, и в случае обнаружения там нового объекта с быстро изменяющейся яркостью его координаты можно передать на Землю, где к наблюдениям подключаются оптические телескопы.

28 февраля 1997 года впервые был обнаружен рентгеновский, а затем и оптический транзиент («послесвечение») гамма-всплеска, и это событие считается революционным в исследованиях этих

объектов. Для следующего обнаруженного послесвечения (8 мая 1997 года) на телескопе им. Кека удалось получить оптический спектр. Его линии характеризовались сильным «красным смещением» (0.835), что указывало на огромную скорость удаления источника от наблюдателя, характерную для далеких внегалактических объектов. Наконец, на месте послесвечения гамма-всплеска 14 декабря 1997 года была найдена далекая галактика с еще большим красным смещением – 3.42.

Следующее эпохальное событие в истории изучения космических гамма-всплесков произошло 23 января 1999 года. В этот день наблюдался яркий гамма-всплеск, который был зафиксирован Космической обсерваторией им. Комптона и спутником Верро-SAX. Наряду с рентгеновским послесвечением, был найден и оптический компонент, причем впервые это было сделано во время гамма-всплеска и до наступления максимума яркости оптического компонента. Сделать это удалось благодаря широкоугольной (поле зрения 2°) оптической камере ROTSE (Robotic Optical Transient Search Experiment), установленной в Лос-Аламосской научной лаборатории США. Через 50 секунд после начала всплеска оптический компаньон достиг блеска 8.95^m , т.е. мог наблюдаться в обычный бинокль! Это было значительно ярче всех оптических послесвечений гамма-всплесков, наблюдавшихся до этого. Хотя после этого блеск стал быстро падать, были сняты оптические спектры источника и определено его красное смещение. Оно вновь было весьма значительным: 1.6.

Итак, космологическая природа источников гамма-всплесков и тем самым их гигантская светимость были подтверждены. Вставал вопрос о механизмах столь большого энерговыделения в компактной области пространства.

Этот вопрос начал обсуждаться задолго до подтверждения космологической природы гамма-всплесков. Наиболее правдоподобная гипотеза была высказана в 1984 году [2] и связывала гамма-всплески с тесными двойными системами, состоящими из нейтронных звезд. Быстро обращаясь вокруг общего центра масс, такие звезды должны постепенно терять энергию за счет излучения гравитационных волн. Звезды будут сближаться и в некоторой момент сольются, образуя, вероятнее всего, черную дыру. В момент слияния звезд высвободится энергия, уносимая в виде гамма-излучения.

В настоящее время именно этот механизм считается причиной появления класса «коротких» гамма-всплесков, с продолжительностью менее 2 секунд. Более длительные и мощные всплески возникают, по-видимому, в результате взрывов «гиперновых» звезд – сверхновых звезд, обладающих значительным моментом вращения [3].

Отметим, что оба механизма предусматривают неизотропное выделение энергии – в двух узких конусах вокруг оси вращения пары нейтронных

звезд или гиперновой звезды. В этом случае полное энерговыделение может быть существенно меньше, чем указывалось выше, но полное количество всплесков во Вселенной увеличивается во столько же раз. В результате, вероятность регистрации всплеска с заданным потоком энергии остается той же самой.

Происходя примерно раз в сутки во всей Вселенной (или несколько чаще, если учесть неизотропность выходящего излучения), гамма-всплески являются крайне редкими событиями в масштабах одной галактики. Подобное событие в нашей Галактике, при котором Земля попала бы в один из двух конусов гамма-излучения, может происходить примерно раз в миллион лет. Однако, эта величина существенно меньше возраста Земли и жизни на ней. То есть, в своей истории наша планета должна была пережить воздействие близкого гамма-всплеска огромной мощности. К тому же, на ранних этапах жизни нашей Галактики звездообразование могло идти интенсивней, чем сейчас, а значит, и массивных звезд – будущих потенциальных источников гамма-всплесков – могло быть еще больше.

Возникает вопрос – насколько опасным для жизни нашей планеты может быть воздействие мощного, но достаточно кратковременного потока гамма-лучей? Несет ли угрозу биосфере любой гамма-всплеск с источником в нашей Галактике, или этот источник должен находиться по соседству с Солнцем и Землей в галактических масштабах? Насколько частыми могут быть подобные события?

Ответ можно дать, создав модель реакции атмосферы на некоторый «стандартный» гамма-всплеск, удаленный на расстояния, характерные для масштабов нашей Галактики. Вспомним, что последняя представляет собой диск толщиной около 500 парсек (пк). Четкой внешней границы у Галактики нет, но большая часть звездного населения диска располагается внутри окружности с радиусом 20 кпк. Солнце располагается в 8 кпк от центра Галактики (1 парсек равен примерно $3 \cdot 10^{19}$ м).

Космическое гамма-излучение не доходит до поверхности Земли, защищенной плотной атмосферой нашей планеты. Поэтому непосредственного контакта излучения всплеска и живыми организмами не произойдет. Но это не означает, что близкий гамма-всплеск будет безопасным для жизни на нашей планете. При достаточно большом потоке гамма-излучения может существенно измениться состояние тех слоев атмосферы, где оно будет задерживаться, взаимодействуя с веществом. А эти слои не так уж и далеки от поверхности Земли – речь идет о стратосфере, простирающейся на высотах от 20 до 50 км. Более того, именно там содержится большая часть атмосферного озона – газа, защищающего нас от губительного солнечного ультрафиолета.

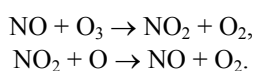
Взаимодействие гамма-излучения с веществом стратосферы (прежде всего, молекулами азота N_2 и кислорода O_2) может приводить к ионизации молекул (с образованием ионов N_2^+ и O_2^+) и их

диссоциации с образованием атомарного азота и кислорода. Атомы, ионы и, особенно, электроны, образующиеся в этих реакциях, будут иметь большую кинетическую энергию. Сталкиваясь с другими молекулами азота и кислорода, они будут также приводить к их ионизации и/или диссоциации, создавая процесс «электронной лавины».

Среди всех процессов, происходящих в атмосфере в момент облучения, обратим внимание на образование «нечетного» азота – молекул, ионов и радикалов, содержащих нечетное количество (чаще всего, один) атомов азота. Эти процессы – диссоциация молекул азота с образованием атомов N и ионов N^+ , а также взаимодействие иона O_2^+ (или O^+) с молекулой N_2 с образованием молекулы NO (или атома N) и иона NO^+ .

После окончания гамма-всплеска ионы в стратосфере быстро рекомбинируют, большая часть свободных атомов входит в состав молекул. Однако, химический состав стратосферы будет заметно отличаться от состояния до всплеска – увеличится содержание некоторых малых атмосферных примесей. С одной стороны, обилие атомарного кислорода во время облучения приведет к заметному росту содержания озона O_3 . С другой стороны, в атмосфере появится значительная фракция «нечетного азота». В ходе большинства химических реакций эти составляющие этой фракции в основном превращаются друг в друга, в целом же фракция отличается высокой стабильностью. После всплеска она будет представлена, в основном, двумя оксидами азота: NO и NO_2 .

Соединения «нечетного азота» в атмосфере являются одними из самых активных разрушителей озона в ходе известных реакций:



В этом цикле уничтожается молекула озона и атомарный кислород (важный для образования озона), а окиси азота лишь переходят друг в друга, оставаясь в атмосфере. Подобным образом одна молекула «нечетного азота» может уничтожить миллионы молекул озона. В результате, хотя содержание озона в стратосфере сразу после гамма-всплеска может заметно увеличиться, далее начинается его уменьшение.

Оценка уменьшения общего содержания озона в результате гамма-всплеска делалась в ряде работ, начиная с [4]. Там отмечалось, что именно образование окисей азота может быть основным негативным последствием облучения атмосферы гамма-всплеском.

В работе [5] была поставлена задача оценки максимального расстояния до гамма-всплеска с энергией взрыва 10^{46} Дж, при котором будет существенно поврежден озоновый слой земной атмосферы. Для этого была использована простая кислородно-азотная химическая модель атмосферы

с учетом 21 нейтральных и ионных компонент и около 50 реакций.

Очевидно, что большинство энергии, попавшей в земную атмосферу от гамма-всплеска, после ряда превращений переходит в тепло. И если разогрев стратосферы будет сильным ($\Delta T/T \sim 1$), то химическая модель станет неприменимой, но и без ее использования можно делать вывод о неизбежности катастрофических последствий для стратосферы и атмосферы в целом. Оценки, сделанные в [5], показывают, что такая ситуация сложится, если источник окажется менее, чем в 500 пк от Солнца.

Угроза для жизни на Земле сохранится и для более далеких всплесков. Моделирование химических процессов показало, что после облучения атмосферы всплеском с расстояния 1 кпк на высотах более 30 км образуется большое количество окисей азота, достаточное для полного уничтожения озона в верхней части стратосферы. Сильно уменьшится и общее содержание озона. Граница «опасной зоны» для источников гамма-всплесков проходит примерно в 2 кпк от Солнца. Следует оговориться, что это относится к «стандартному» всплеску с энергией 10^{46} Дж, для некоторых «длинных» всплесков энергия может быть еще больше, и соответствующее расстояние также несколько увеличится.

Более подробное и полное моделирование отклика атмосферы на гамма-всплеск было сделано в работе [6]. Ее авторы использовали двумерную (широта и высота) атмосферную модель НАСА с 65 химическими составляющими, учетом горизонтального и вертикального переноса вещества. Расчеты проводились для различных положений Солнца и гамма-источника в момент облучения и разных сезонов года. На основе детального анализа этих случаев авторы приходят к аналогичному выводу: потенциальную опасность для жизни на Земле несут гамма-всплески на расстоянии 2 кпк и менее.

Всплеск, удаленный на 2 кпк, может привести к уменьшению общего содержания озона на 30%, которое восстановится лишь за несколько лет. Данный период соответствует времени жизни соединений «нечетного азота» в атмосфере.

Полученная величина расстояния в 2 кпк превышает толщину диска Галактики, но заметно меньше его радиуса, а также расстояния Солнца от центра нашей звездной системы. Поэтому, к счастью для нас, жителей Земли, далеко не каждый из галактических всплесков с попавшим на нас конусом излучения представляет опасность для существования цивилизации. Круг с радиусом в 2 кпк и центром в Солнце занимает порядка 1% всей площади галактического диска. И если мы сможем наблюдать гамма-всплески в Галактике раз в миллион лет, то лишь раз в 100 миллионов лет поток энергии от такого всплеска на Земле примет угрожающую величину.

Разумеется, это лишь оценка периода времени по порядку величины. И все же мы можем сделать определенные выводы. Величина в 100 миллионов

лет огромна по сравнению с продолжительностью человеческой жизни, но все же меньше возраста Земли. То есть, наша планета и населявшие ее организмы в прошлом наверняка испытали на себе мощный гамма-импульс от близкой галактической гиперновой звезды или слияния двух нейтронных звезд.

Можно ли установить, когда именно это происходило, и каковы были последствия? С полной достоверностью этого сделать нельзя, но вероятные эпохи указать можно. Авторы [6] отмечают эпоху массового вымирания в позднюю Ордовикскую эру, 443 миллиона лет назад. Точная причина вымирания не установлена, но результаты исследований указали на два весьма интересных факта. С одной стороны, уровень ультрафиолетовой радиации Солнца был повышен, что можно было бы объяснить уменьшением общего содержания озона. С другой стороны, рост ледников говорил о похолодании климата. Оно могло быть связано с увеличением содержания в атмосфере диоксида азота NO_2 , поглощающего солнечное излучение в видимой области спектра.

Итак, космические гамма-всплески, открытые немногим более 40 лет назад, могли играть заметную роль в истории земной цивилизации, не меньшую, чем столкновения Земли с астероидами, с которыми сейчас также связывают массовые вымирания организмов на нашей планете.

Вероятность близкого гамма-всплеска не исключена и в настоящее время. В отличие от столкновения Земли с астероидом, подобное

событие невозможно предсказать заранее. Поэтому не представляется возможным предотвратить прямое воздействие всплеска на атмосферу (ионизация, разогрев стратосферы и т.д.). Однако, если расстояние до источника всплеска превышает 500 пк, прямое воздействие всплеска на атмосферу не будет носить катастрофического характера. В этом случае проблема будет состоять в уничтожении озона соединениями «нечетного азота» и роста уровня солнечной ультрафиолетовой радиации. С подобной проблемой, хоть и в меньших масштабах, человечество сталкивается уже в настоящее время и вне связи с космическими гамма-всплесками. Возможно, меры противодействия данному процессу смогут быть предприняты.

Список литературы

1. Klebesadel R.W., Strong I.B., Olson R.A. // *Astrophysical Journal Letters*. 1973. V.182. P.L85.
2. Блинные С.И., Новиков И.Д., Переводчиков Т.В., Полнарев А.Г. // Письма в *Астрономический журнал*. 1984. Т.10. №6. С.422.
3. Woosley S.E. // *Astrophysical Journal*. 1993. V.405. P.273.
4. Thorsett S.E. // *Astrophysical Journal Letters*. 1995. V.444. P.L53.
5. Угольников О.С. Последствия близкого космологического гамма-всплеска для атмосферы Земли. Дипломная работа. Москва, МГУ, 1997.
6. Thomas B.C. et al. // *Astrophysical Journal*. 2005. V.634. P.509.