

**Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе Российской академии наук**

**5. Результаты исследований и наблюдений, полученные  
российскими учеными и специалистами в ходе реализации  
летних научных программ в сотрудничестве и при содействии  
иностраннных ученых и специалистов**

**Исследования космических гамма-всплесков в российско-американском эксперименте КОНУС-ВИНД на американском космическом аппарате «Винд»**

Российско-американский эксперимент по исследованию космических гамма-всплесков и мягких гамма-репитеров КОНУС-ВИНД успешно проводится на американском космическом аппарате «Винд» с помощью российской научной аппаратуры КОНУС непрерывно с ноября 1994г. по настоящее время. Благодаря высокой чувствительности, исключительно благоприятному месту наблюдений в межпланетном пространстве и детальной программе наблюдений эксперимент КОНУС-ВИНД является уникальным источником информации о временных и спектральных характеристиках гамма-всплесков в широком интервале энергий от 20 кэВ до 10 МэВ. Эти данные составляют неотъемлемую часть современных всеволновых исследований источников гамма-всплесков на космических аппаратах и сети наземных оптических и радиотелескопов и широко востребованы. Приводятся результаты исследований в эксперименте КОНУС-ВИНД коротких и ультрадлинных гамма-всплесков.

**1. Методика исследований.**

Российско-американский эксперимент КОНУС-ВИНД по исследованию космических гамма-всплесков проводится с на американском космическом аппарате «Винд» с ноября 1994г. по настоящее время с помощью научной аппаратуры КОНУС ФТИ им.А.Ф.Иоффе . Аппаратура находится в исключительно благоприятных условия для наблюдения гамма-всплесков. Орбита космического аппарата расположена вне магнитосферы Земли, обеспечивая тем самым возможность непрерывных наблюдений всей небесной сферы, при стабильном радиационном фоне в отсутствии помех от радиационных поясов и затенения Землей.

Аппаратура КОНУС-ВИНД представляет собой сцинтилляционный гамма-спектрометр, состоящий из двух идентичных детекторов гамма-квантов и электронного блока для регистрации и предварительной обработки сигналов детекторов. Каждый детектор содержит кристалл NaI(Tl) диаметром 130 мм и высотой 75 мм, помещенный в тонкостенный алюминиевый контейнер с бериллиевым входным окном и свинцовым стеклом высокой прозрачности для защиты от фона космического аппарата в мягкой области спектра. Такой детектор обеспечивает низкий энергетический порог регистрации излучения 10 – 12 кэВ, диапазон регистрации гамма-квантов до 10 МэВ с энергетическим разрешением 8,5 – 9,0 % на линии Cs137 и чувствительность обнаружения всплесков на уровне  $\sim 10^{-7}$  эрг см<sup>-2</sup>. Детекторы размещены на стабилизированном вращением космическом аппарате таким образом, что они непрерывно осматривают, соответственно, северную и южную небесные полусферы.

Аппаратура функционирует в двух основных режимах: режиме регистрации всплеска и в режиме ожидания всплеска, в котором измеряется фоновое рентгеновское и гамма-излучение также в трех энергетических интервалах:

20 кэВ – 80 кэВ, 80 кэВ – 300 кэВ, 300 кэВ – 1200 кэВ, а также регистрируется скорость счета заряженных частиц с энерговыделением в детекторах более 15 МэВ. Номинальное значение нижних энергетических порогов детекторов в начале эксперимента составляло 12 кэВ. При многолетней непрерывной работе коэффициенты усиления детекторов медленно уменьшались. Возможности их коррекции по командам с Земли были исчерпаны в 1997г. По состоянию на конец 2015 г. нижний порог детектора, осматривающего южную небесную полусферу, составляет 21,5 кэВ, северную – 18,5 кэВ. Для удобства сравнения при обработке данные приводятся к порогу 20 кэВ.

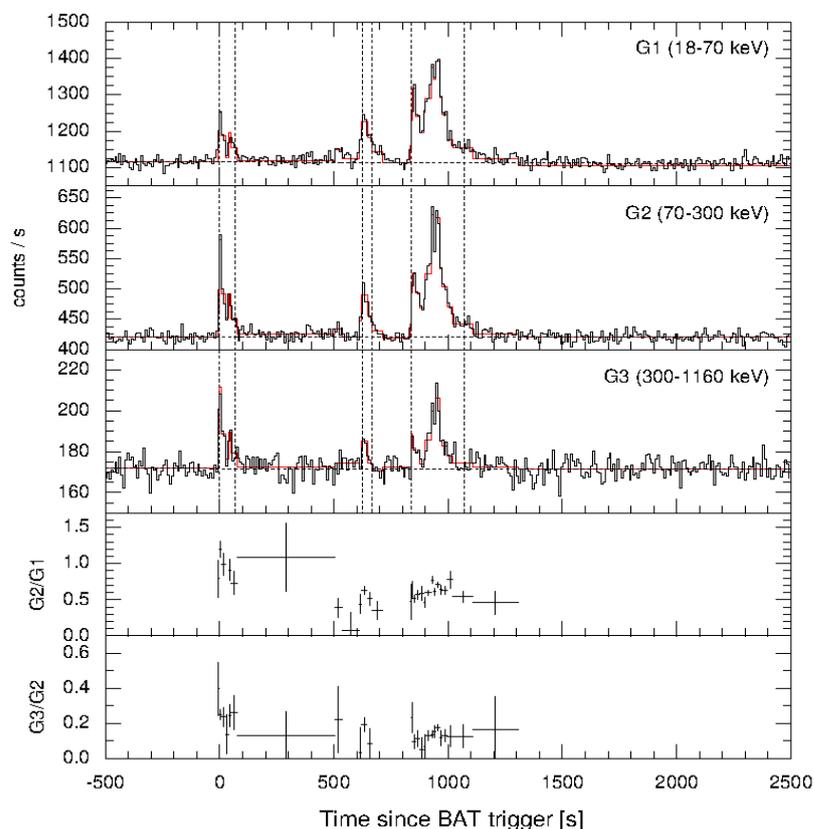
Эксперимент КОНУС-ВИНД имеет следующие преимущества по сравнению с другими приборами, осуществляющими в настоящее время наблюдения космических гамма-всплесков:

1. Аппаратура имеет исключительно благоприятные условия наблюдения гамма-всплесков. Космический аппарат все время находится вне магнитосферы Земли, обеспечивая тем самым стабильный радиационный фон, отсутствие помех от радиационных поясов и затенения Землей и возможность непрерывных наблюдений.
2. Два детектора аппаратуры постоянно осматривают всю небесную сферу обеспечивая возможность с одинаковой чувствительностью регистрировать гамма-всплески, приходящие с любых направлений.

Эксперимент КОНУС-ВИНД является в настоящее время уникальным источником наиболее полных данных о временных, спектральных и энергетических характеристиках космических гамма-всплесков в широкой области энергий от 20 кэВ до 15 МэВ.

## **2. Результаты исследований ультра-длинных гамма-всплесков.**

Были выполнены всеволновые исследования ультра-длинного гамма-всплеска 24 октября 2009г. Его полная длительность составила  $\sim 1300$  сек и полная кривая яркости в гамма-лучах была получена только в эксперименте КОНУС-ВИНД (рис. 1). Оптическая компонента всплеска исследовалась на нескольких наземных телескопах и было определено космологическое красное смещение  $z= 1,09$ . Не было найдено корреляции между пиками в гамма-излучении источника всплеска и его оптическим излучением, что было интерпретировано как излучение ударных волн в сильно намагниченной плазме.

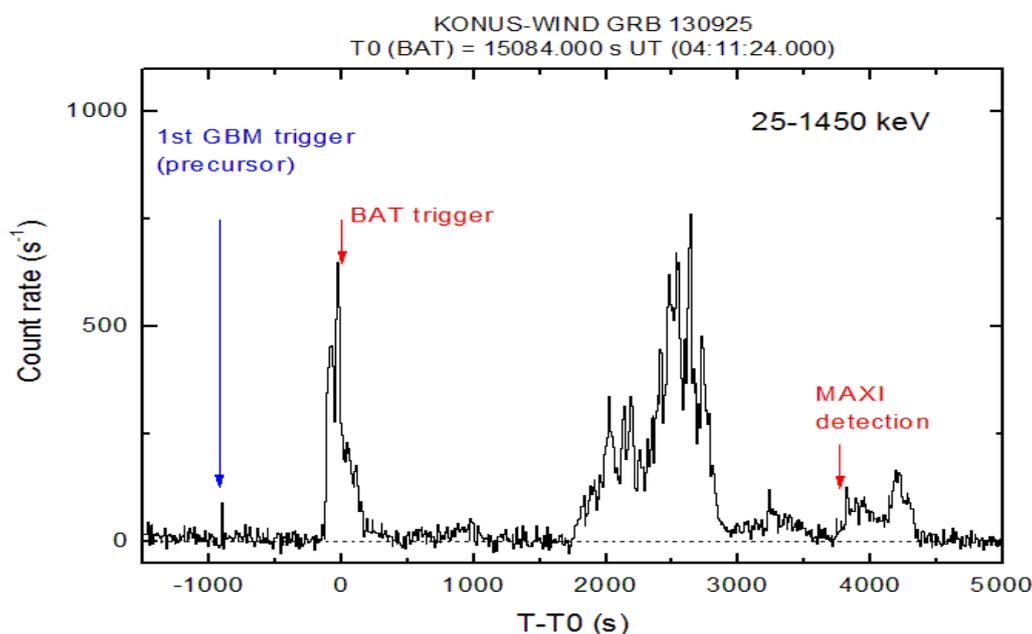


**Рис. 1.** Временной профиль гамма-всплеска 24 октября 2009г. по данным эксперимента КОНУС-ВИНД. На трех верхних панелях приведены скорости счета в трех указанных энергетических интервалах. На двух нижних панелях отношения скоростей счета в соседних энергетических интервалах, характеризующие жесткость излучения всплеска.

Изучение этого всплеска в широком диапазоне длин волн привело к выводу о том, что ультра-длинны гамма-всплески находятся на хвосте

распределения длинных всплесков (F.R. Virgili, D.S. Svinkin et al, 2013, Astr.J., 778, 54).

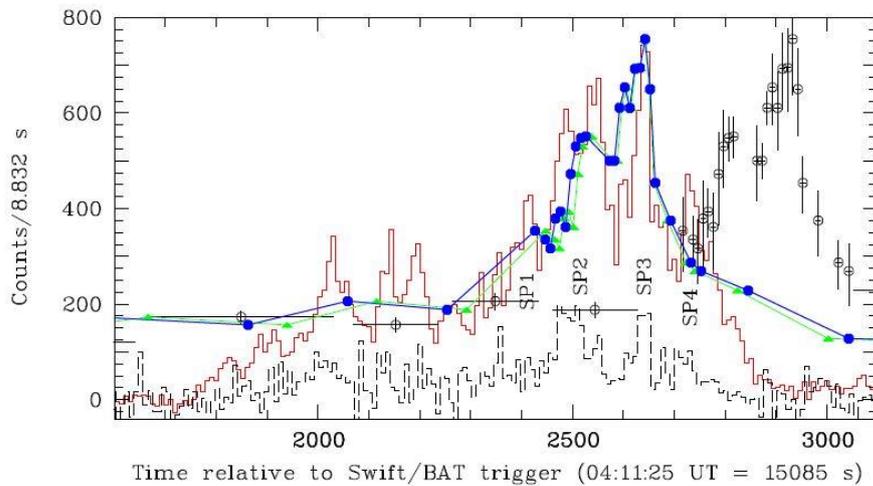
Еще один ультра-длинный гамма-всплеск GRB130925A изучался на многих космических аппаратах, но из-за его уникальной длительности, превысившей 20 тысяч секунд, полная картина активности источника этого всплеска была получена только в эксперименте КОНУС-ВИНД (рис. 2).



**Рис. 2.** Кривая яркости GRB130925A по данным эксперимента КОНУС-ВИНД совместно с данными Swift/BAT, Fermi/GBM и аппаратуры MAXI. По оси ординат приведена скорость счета в зависимости от времени всплеска.

Основной эпизод этого всплеска, длительностью более 5000 сек, был исследован только в эксперименте КОНУС-ВИНД (Evans,...Frederiks et al, 2014, MNRAS, 444, 2505). Рентгеновское послесвечение источника всплеска длилось более 20000 сек с нехарактерным спектром, свидетельствующим о среде в виде сильно разряженной плазмы с плотностью частиц  $n \sim 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ . В еще одном всеволновом исследовании этого всплеска с участием эксперимента КОНУС-ВИНД и телескопа GROND была зарегистрирована коррелированная с гамма-излучением оптическая эмиссия, задержанная

относительно гамма-излучения на  $\sim 300$  сек (Рис. 3). Еще одна вспышка оптического излучения этого источника сопровождала гамма-излучению с энергией несколько ГэВ, зарегистрированному телескопом Ферми/LAT.

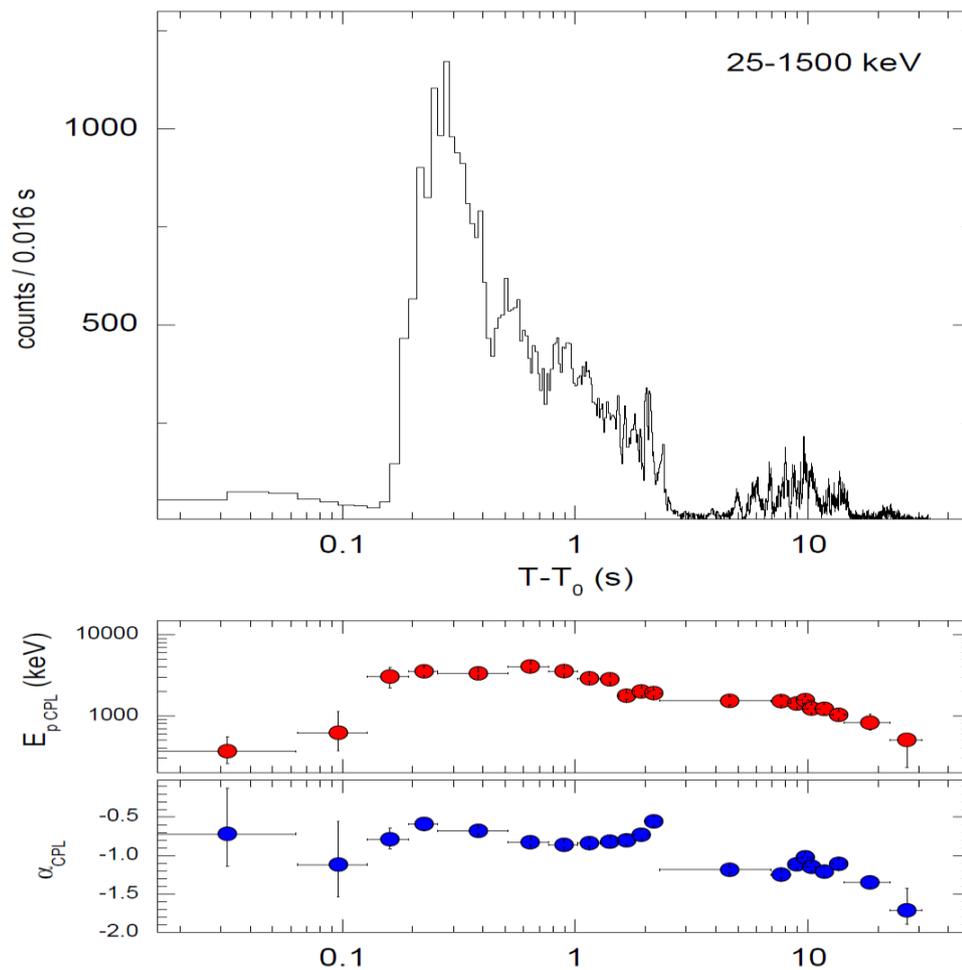


**Рис. 3.** Оптическая активность источника всплеска GRB130925 по данным телескопа GROND (синие точки) совместно с данными о скорости счета гамма-квантов за 8-ми секундный интервал КОНУС-ВИНД (красные линии). В районе длительности события 3000 сек наблюдалась оптическая активность, сопутствующая образованию гамма-излучения с энергией десятки ГэВ по данным наблюдений телескопом Ферми/LAT (зеленые точки).

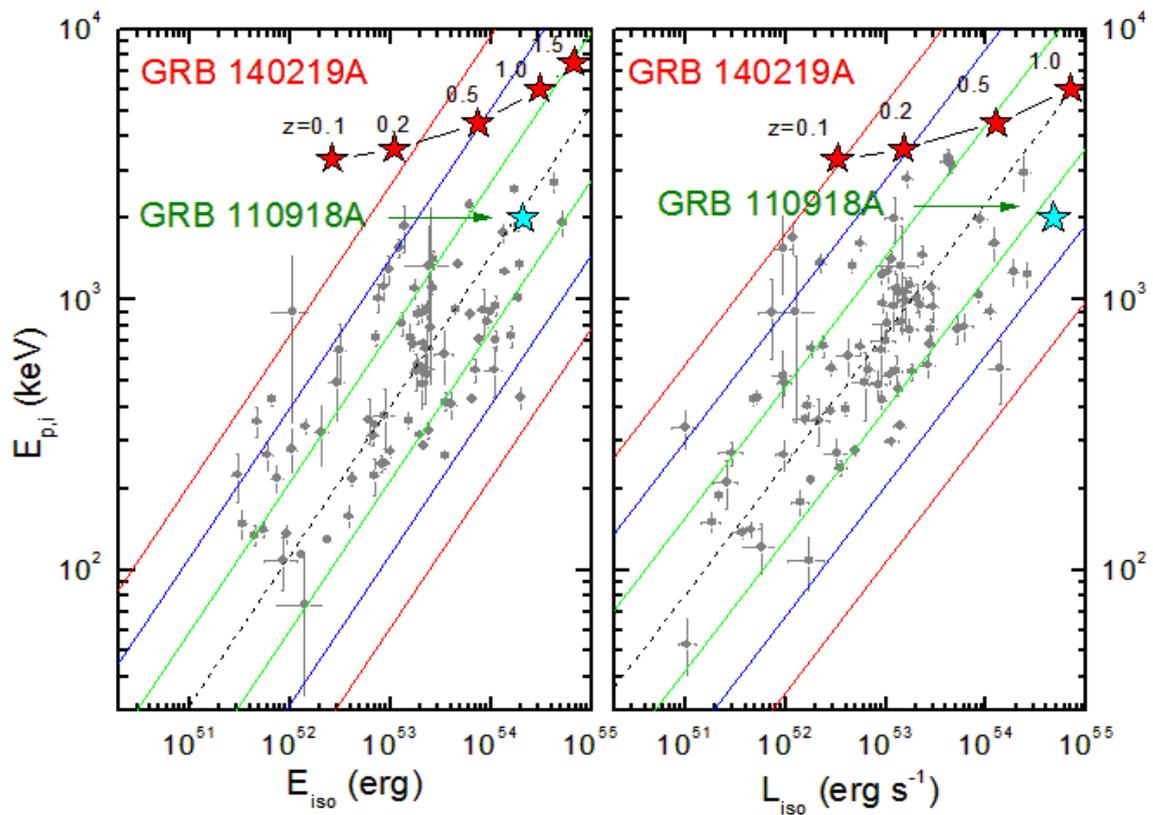
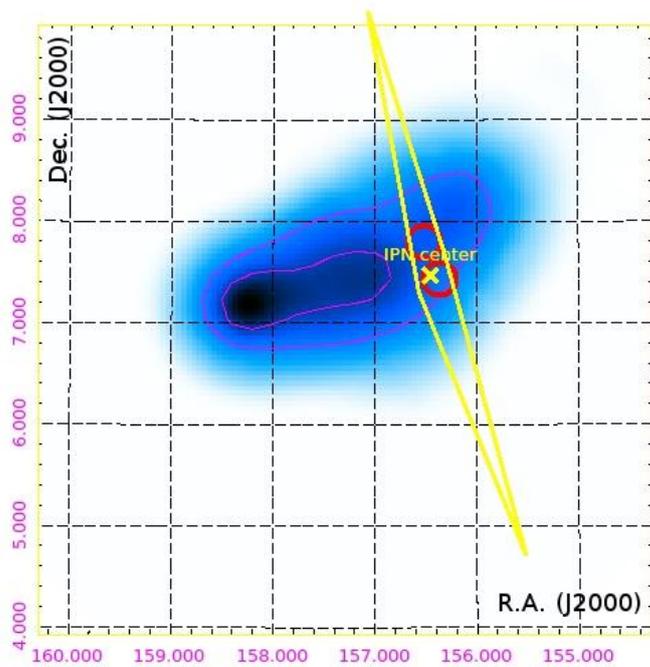
### 3. Исследования ультра-яркого гамма-всплеска GRB140219A

Гамма-всплеск 19 февраля 2014г. является одним из самых интенсивных событий, зарегистрированных за все время их исследований. Рис. 4 показан временной профиль основной фазы всплеска, длившейся 2,5 с и зарегистрированной только в эксперименте КОНУС-ВИНД. Пиковая энергия всплеска на протяжении этой фазы превышала величину 2 МэВ при потоке энергии  $1,1 \times 10^{-3}$  эрг  $\text{см}^{-2}$  (Голенецкий и др., GCN Circular № 15870, 2014). Источник всплеска был локализован сетью IPN и в области его локализации телескопом Ферми/LAT были зарегистрированы гамма-кванты сверхвысокой энергии начиная с 1,6 ГэВ с интервале времени от 500 с до 2300 с после срабатывания триггера КОНУС-ВИНД. На рис. 5 вверху показана область локализации источника этого всплеска сетью IPN совместно с информацией телескопа Ферми/LAT. Внизу на том же рисунке приведены расчетные

характеристики GRB140219A в собственной системе для различных значений космологического красного смещения  $z$  от 0,1 до 1,0. Для  $z=1,0$  полный поток энергии от этого источника составил  $E_{iso}=3 \times 10^{54}$  эрг сек $^{-1}$  и светимость  $L_{iso}= 8 \times 10^{54}$  при пиковой энергии  $\sim 6$  МэВ.



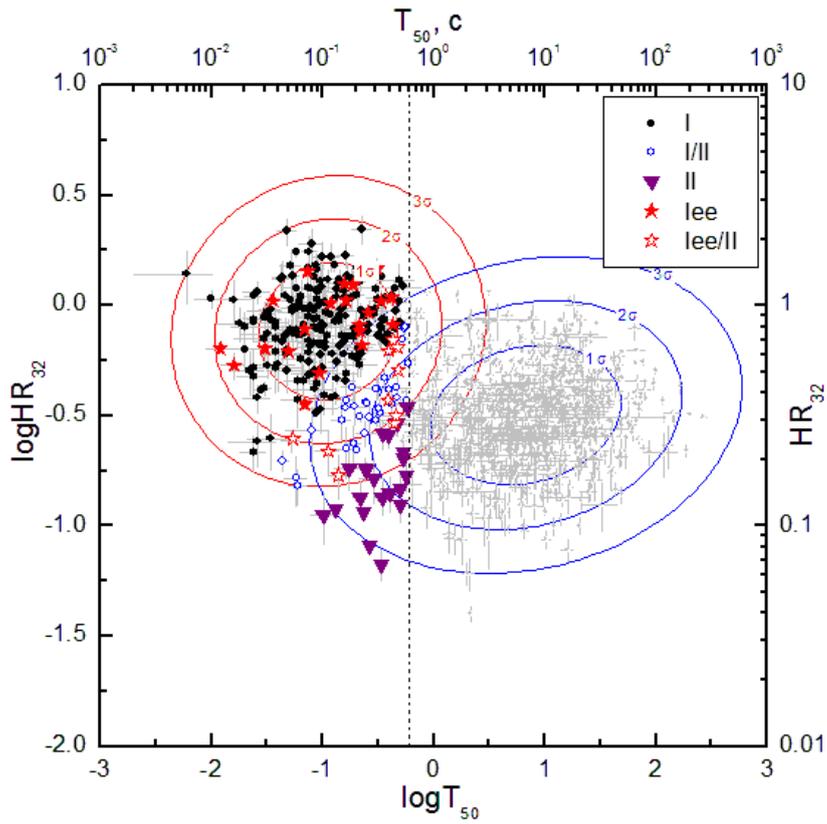
**Рис.4.** Временной профиль начальной фазы GRB 140219A по данным эксперимента КОНУС-ВИНД совместно с данными о пиковой энергии  $E_p$  и модельном параметре  $\alpha$ .



**Рис. 5.** На верхней части рисунка приведены данные телескопа Ферми/LAT совместно с данными о локализации источника сетью IPN. В нижней части рисунка приведены расчетные характеристики GRB 140219A для различных значений космологического красного смещения  $z$  и их сравнение с параметрами GRB110918A.

#### **4. Каталог коротких гамма-всплесков эксперимента КОНУС-ВИНД.**

Создан и опубликован второй каталог коротких гамма-всплесков эксперимента КОНУС-ВИНД ( Svinkin D.S., et al, 2016, Astr.J.S., ecepted, arXiv:1603.06832). Каталог содержит данные о временных и спектральных характеристиках 293-х коротких гамма-всплесках, зарегистрированных в период с 1994г. по 2010г. Среди 214 гамма-всплесков с многоканальными спектрами обнаружено три события, для описания которых необходима дополнительная степенная компонента с фотонным индексом  $\sim 2$ . Эти гамма-всплески входят число 10% наиболее интенсивных событий. В каталоге подробно рассмотрены короткие гамма-всплески с продленным излучением (extended emission, EE), которые были впервые детально проанализированы именно в эксперименте КОНУС-ВИНД. На рис. 6 проиллюстрирована классификация 1143 ярких гамма-всплеска эксперимента КОНУС-ВИНД. На нем вертикальной пунктирной линией обозначена граница между длинными и короткими гамма-всплесками.



**Рис. 6.** Классификация 1143 ярких гамма-всплеска в эксперименте КОНУС-ВИНД. По оси абсцисс приведена длительность всплеска. По оси ординат указана жесткость всплесков. Вертикальной пунктирной линией обозначена граница между длинными и короткими всплесками.

## **5. База данных эксперимента КОНУС-ВИНД по вспышкам жесткого рентгеновского излучения Солнца.**

Создана база данных жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек, зарегистрированных в российско-американском эксперименте КОНУС-ВИНД. Аппаратура КОНУС-ВИНД функционирует в составе американского космического аппарата «Винд» в оптимальных условиях межпланетного пространства непрерывно с ноября 1994г. ( с июля 2004г. в окрестностях точки Лагранжа L1). В режиме ФОН кривые яркости измеряются в трех энергетических диапазонах в настоящее время G1 (20-80 кэВ), G2 (80 – 300 кэВ) и G3 (300 – 1200 кэВ) с временным разрешением 2,944 с. В режиме ВСПЛЕСК кривые яркости измеряются в тех же энергетических диапазонах с переменным временным разрешением от 2 мс до 256 мс. В дополнение в режиме ВСПЛЕСК измеряются многоканальные энергетические спектры в двух частично перекрывающихся энергетических диапазонах: ~ 20 – 1200 кэВ и ~ 250 кэВ – 15 МэВ. В течение более 20-ти лет непрерывных наблюдений КОНУС-ВИНД зарегистрировал более 1000 солнечных вспышек в режиме ВСПЛЕСК. База данных предоставляет спектральные данные в FITS формате и кривые яркости в IDL SAV и ASCII форматах. Процедура IDL для чтения и обработки FITS спектральных файлов дополнена пакетом OSPEX и доступна из SSW. Мы описываем солнечные данные эксперимента КОНУС-ВИНД, их преимущества и ограничения. Мы иллюстрируем важность полученных данных на примерах ряда интересных солнечных событий, зарегистрированных в эксперименте КОНУС-ВИНД. (G.D. Fleishman,... A.L. Lysenko, A.T. Altyntsev et al, 2016, Astr.J., 822, 71). Планируется, что база данных солнечных вспышек эксперимента КОНУС-ВИНД будет выставлена на сайте ФТИ им. А.Ф. Иоффе не позднее 15 июня 2016г.

## **6. Участие эксперимента КОНУС-ВИНД в поиске гамма-излучения от источников гравитационных волн.**

В феврале 2016 г. были опубликованы первые данные о регистрации гравитационных волн детекторами коллаборации LIGO/Virgo (Abbot, P.B. et al., 2016, PRL, 116, 061102), вызванных слиянием двух массивных черных дыр. Вслед за этим событием, получившим обозначение GW150914, были опубликованы данные эксперимента Fermi/GBM о регистрации спустя 0,4 с после гравитационного сигнала слабого короткого гамма-всплеска (V. Connaughton et al., ApJ, 2016, submitted, arXiv:1602.03920). Эти данные не получили подтверждения в наблюдениях аппаратурой INTEGRAL/SPI-ACS (V.Savchenko et al., ApJ, 2016, submitted, arXiv:1602.04180) и в данных эксперимента КОНУС-ВИНД и сети IPN (K. Hurley, ..., D. Svinkin, R. Aptekar, D. Frederiks, et al., in prep.). Эксперимент КОНУС-ВИНД через сеть IPN участвует в широкой коллаборации по поиску сигналов, коррелированных с сигналами гравитационных волн (B. P. Abbot, et al., ApJL, 2016, arXiv: 1602.08492). Дальнейшие наблюдения таких событий в эксперименте КОНУС-ВИНД исключительно важны, поскольку его детекторы в оптимальных условиях межпланетного пространства постоянно осматривают всю небесную сферу, а взаимодействие с сетью IPN обеспечивает возможность локализации источника излучения триангуляционным методом.

## **7. Заключение**

По важности, качеству и полноте получаемых данных эксперимент КОНУС-ВИНД является одним из мировых лидеров в изучении экстремальных взрывных явлений во Вселенной. Детальная программа измерений временных

и спектральных характеристик космических гамма-всплесков и орбита в межпланетном пространстве обеспечивают, практически, идеальные условия для изучения этого астрофизического явления. Высокочувствительные детекторы аппаратуры КОНУС-ВИНД постоянно осматривают всю небесную сферу. Поэтому данные эксперимента КОНУС-ВИНД широко востребованы в современных всеволновых исследованиях космических гамма-всплесков.

**Авторы:**

*Р.Л.Аптекарь, С.В.Голенецкий, Ф.П. Олейник, Д.С. Свинкин, М.В. Уланов, Д.Д.Фредерикс, А.Е. Цветкова (Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия).*

*Т.Л. Клайн (Годдардовский центр космических полетов НАСА, Гринбелт, США).*