

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА»
Физический факультет

КУРСОВАЯ РАБОТА

«Грозовая активность и потоки нейтронов на высотах низкоорбитальных
спутников»

Исполнитель
Студент 213 группы
Зиганшин И.И.

Научные руководитель:
кандидат физико-математических наук,
Григорьев А.В.

Москва 2018

Оглавление

Актуальность работы	2
Введение	3
Введение	3
Взаимодействие нейтронов с веществом	4
Нейтроны в атмосфере	5
Нейтроны альbedo	6
Нейтроны от гроз	7
Эксперименты по обнаружению нейтронов от гроз	7
Теория образования нейтронов в стволе молнии	7
Нейтроны от убегающих электронов	8
Возникновение γ -вспышек во время гроз	9
Детекторы тепловых нейтронов	9
Постановка задачи	11
Эксперимент	11
Результаты работы	17
Список литературы	18

Актуальность работы

Работа посвящена изучению потока нейтронов на высотах низкоорбитальных спутников (500-600км) и анализу возможностей выделения из данных эксперимента ДЕПРОН нейтронов связанных с грозовой активностью. Анализ литературных источников и наличие свежих статей связанных с темой нейтронов и грозовой активности говорит о интересе научного сообщества к этой теме. Также в сентябре пройдет конференция ТЕРА 2018, посвященная теме гроз и связанных с ними частиц. В разные года на этой конференции выступали и сотрудники НИИИФ.

Введение

Введение

В 1919г. Резерфорд впервые искусственно расщепил ядро атома азота с помощью α -частицы, вслед за этим началось активное изучение искусственных ядерных превращений. В 1930г. Боте и Беккер в ходе экспериментов по облучению различных элементов α -частицами обнаружили слабо поглощаемое свинцом излучение, которое действует на счетчик Гейгера-Мюллера. Это излучение могло выбивать протоны энергией около 5 МэВ из водородосодержащих веществ. В 1932г. Чадвик предположил, что в этих реакциях испускается неизвестная нейтральная частица малой массы примерной равной массе протона. Он назвал ее "Нейтрон". Ввиду того что до этого момента нейтроны не были обнаружены, Чадвик предположил, что нейтрон нестабильная частица.[1]

Открытие нейтрона дополнило картину строения ядра. В 1932г. Гейзенберг предположил, что ядра состоят из протонов и нейтронов, которые остаются стабильными внутри ядра. Внутренняя структура нейтрона впервые была исследована Хофштадтером путем изучения столкновения пучка электронов с энергиями 2 ГэВ с дейтронами, за что получил Нобелевскую премию по физике в 1961г. В 1935г. была точно определена масса нейтрона:

$$m_n = m_d - m_p + \frac{E_d}{C^2} \quad (1)$$

Где E_d - энергия связи дейтрона.

Масса нейтрона оказалась равной $1.67 \cdot 10^{-24}$ г

Масса нейтрона больше массы протона на $0,84 \cdot 10^{-3}$ а.е.м, этим и объясняется его нестабильность. Нейтрон может распасться на протон и электрон. Подобный распад наблюдался Снеллом в 1948г.

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu} \quad (2)$$

В виду того, что этот процесс идет с образованием лептонов и нарушением закон сохранения ароматов кварков, то эта реакция обязана проходить за счет слабого взаимодействия. Из-за специфических свойств слабого взаимодействия и крайне малого энерговыделения в реакции скорость реакции оказывается крайне малой. Именно этим определяется большое время жизни нейтрона, по современным данным оно составляет $878,5 \pm 1$ с ($\approx 14,5$ минут), что примерно в миллиард раз больше времени жизни мюона – следующей по времени жизни метастабильной частицей. [1],[2],[5]

Нейтрон состоит из трех кварков – udd , где «u» - верхний кварк , а «d» - нижний. [5]

Взаимодействие нейтронов с веществом

Характер взаимодействия нейтронов с веществом определяется силами, которые действуют на нейтрон со стороны вещества. Наиболее существенны силы действующие между нейтроном и ядрами атомов , так называемые ядерные силы. Силы действующие между нейтронами и электронами крайне малы, т.к. нейтрон не имеет заряда, то Кулоновского взаимодействия для нейтрона не существует, однако электромагнитное взаимодействие между нейтронами и электронами не исключено, потому что обе частицы обладают магнитным моментом. Согласно с мезонной теорией ядерных сил нейтрон можно представить как систему состоящую из π^- -мезона и протона, что объясняет наличие магнитного момента у нейтрона.[1]

Взаимодействие нейтронов с ядрами зависит с одной стороны от свойств самих ядер, так как они состоят из нейтронов и протонов, а с другой стороны – в результате столкновения нейтронов с ядрами. На основании изучения свойств ядер были установлены различные характеристики ядерных сил : радиус действия, глубина потенциальной ямы ядерных сил, насыщение ядерных связей, обуславливающее независимость энергии связи от размеров ядра и также приблизительная одинаковость n - n и p - p сил.[1]

Однако этих сведений недостаточно для строгого количественного описания столкновения нейтрона с ядром , так как это делает электродинамика, но общие характеристики ядерных столкновений на основании имеющихся данных мы можем предсказать. Одной из определяющих особенностей ядерных сил является – их крайне малый радиус и большая величина потенциала . С точки зрения ядерных сил нейтроны или протоны с энергиями порядка нескольких электрон вольт являются такими же медленными как и с энергиями в десятки ЭВ с точки зрения электромагнитных сил. Сталкиваясь с ядром нейтрон с такой энергией с большой вероятностью будет захвачен ядром с образованием возбужденного ядра.[1]

Таким образом , столкновение нейтрона с ядром может закончиться одним из процессов:

- 1) Упругое рассеяние (n, n)
- 2) Неупругое рассеяние (n, n')
- 3) Расщепление с вылетом заряженных частиц (n, p), (n, α) и т.п.
- 4) Деление ядра
- 5) Радиационный захват

Следует заметить, что процессы расщепления становятся тем более разнообразными, чем больше энергия налетающего нейтрона. Одним из распространенных

и существенно важных процессов является $(n, 2n)$, т.е. процессе с вылетом 2 нейтронов из составного ядра, он становится возможным при энергии бомбардирующего нейтрона больше энергии связи нейтрона в атоме. Подробнее рассмотрим некоторые из этих процессов :

Упругое рассеяние

Упругим рассеянием называют рассеяние без изменения внутреннего состояния частиц и без рождения новых частиц. Так как масса нейтрона не слишком мала по сравнению с массой ядра, то уменьшение энергии при упругом рассеянии нейтрона на ядре равняется по абсолютному значению энергии отдачи ядра, которая оказывается заметной, особенно в случае легких ядер.

Захват нейтрона

Захват нейтрона ведет к образованию возбужденного составного ядра. Возможность и вероятность того или иного процесса захвата определяется в первую очередь кинетическими характеристиками. Так, например, эндотермические реакции имеют порог энергии.

Неупругое рассеяние

Неупругое рассеяние связано с передачей части кинетической энергии нейтрона ядру в качестве энергии возбуждения, что связано с большими потерями энергии, чем при упругом рассеянии. Средние потери энергии при неупругом рассеянии увеличиваются от легких элементов к тяжелым. Неупругое рассеяние крайне эффективно замедляет нейтроны.

Нейтроны в атмосфере

Нейтроны в вакууме достаточно быстро распадаются и в свободном состоянии не живут, распадаясь на протоны, электроны и антинейтрино. На земле и в ее атмосфере нейтроны связаны в ядрах, свободные нейтроны в основном образуются в результате воздействия космических лучей, вторичного излучения от них же, частиц радиоактивного распада и деления природного урана и радона. Подавляющее большинство нейтронов в атмосфере являются вторичными частицами от взаимодействия космических лучей и вторичного излучения с атомами атмосферы. В результате прохождения ШАЛ (Широкого атмосферного ливня) от его нуклонной компоненты также образуются нейтроны при этом их средняя энергия около 3 МэВ. Вклад ШАЛ в поток нейтронов в атмосфере составляет не более 1% [2].

В 1985 году было показано, что свободные нейтроны могут образовываться в результате грозových разрядов. Нейтроны регистрировались на горе Гулмарг детектором на основе BF₃. Авторы работы предположили, что во время разряда образуется

$10^7 - 10^{10}$ нейтронов. [2]

Также в качестве возможных источников нейтронов могут рассматриваться Луна и Солнце. На Солнце нейтроны могут образовываться в следствии двух процессов:

а) Солнечные вспышки

Солнечная вспышка характеризуется ускорением большого числа частиц; электронов и ядер в широком спектре зарядов – от протонов до ядер железа и более тяжелых. Ускоренные во вспышках частицы, проходя атмосферу солнца, взаимодействуют с ее ядрами. Генерация нейтронов является одним из результатов этого взаимодействия [4]

б) Образование нейтронов под действием ГКЛ

Основным источником нейтронов в этом случае будет взаимодействие релятивистских протонов в ГКЛ с водородной атмосферой Солнца, возникающие при этом нейтроны будут обладать энергией в сотни МэВ и будут достигать земли почти не распадаясь.

Нейтроны с энергиями до 10 МэВ, рожденные на Солнце, по большей части распадаются на пути к Земле. Есть возможность регистрации в околоземном пространстве нейтронов от Солнца более высоких энергий, а также возможность регистрации нейтронов во время солнечных вспышек, образованных в результате взаимодействия солнечных протонов и атмосферы Земли или вещества космического аппарата.[4]

Другим возможным источником нейтронов является Луна. На поверхности Луны может возникать значительно больше нейтронов чем в атмосфере земли в виду слабого магнитного поля и отсутствия атмосферы. В следствии этих факторов, даже КЛ низких энергий могут достичь поверхности Луны, так как лунная поверхность состоит из более тяжелых материалов, то возможно образование нейтронов с участием пи-мезонов однако верхняя оценка потока «лунных» нейтронов у Земли небольшая - $2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ по сравнению с потоком нейтронов альбеда атмосферы Земли на экваторе - $10^{-1} \cdot \text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$. [2]

Потоки нейтронов от указанных источников различный, и чем меньше поток, тем меньший вклад он вносит в вероятность регистрации нейтронов в космическом эксперименте. Определяющий вклад в общий поток нейтронов вносят нейтроны альбеда атмосферы Земли.[2]

Нейтроны альбеда

Нейтронами альбеда называются нейтроны образовавшиеся при взаимодействии КЛ с атмосферой и отраженные обратно в космос.

В 1958г. Были открыты радиационные пояса земли (РПЗ). Их два – внутренний

и внешний. Внешний впервые исследован С.Н. Верновым и состоит в основном из электронов, а внутренний Дж. Ван Алленом и состоит в основном из высокоэнергетичных протонов. Модель появления внутреннего пояса предложена Верновым и Лебединским. Она состоит в образовании вторичных энергичных протонов при распаде нейтронов альбедо, возникающих в реакциях КЛ с атмосферой. Независимо от Вернова и Лебединского данный механизм предложил Зингер.[2]

Нейтроны от гроз

Эксперименты по обнаружению нейтронов от гроз

Проблема обнаружения нейтронов от гроз не нова. Экспериментально показана возможность рождения нейтронов в реакции $D(d,n)He^3$. Через тонкую полимерную нить в вакууме пропусклся мощный электрический разряд. Нить взрывалась и образовывала плотную плазму. Так получались высокоэнергетичные ионы дейтерия, которые создавали нейтронное поле. Нейтроны могли быть получены в результате нескольких реакций. Реакция $D(d,n)He^3$ образует нейтроны с энергией 2,45 МэВ. Наряду с этим возможна реакция $D(d,p)T$, тритий образующийся в этой реакции, может вступить в реакцию с дейтерием $T(D,n)\alpha$ и дать нейтрон с энергией 14 МэВ. Нейтроны с энергией меньше 0,5 МэВ могут образоваться в результате реакции дейтрона и углерода нити $C^{12}(d,n)N^{13}$. Измерения показывают, что 95% нейтронов обладают энергией 2,45 МэВ. Следовательно, основной поток нейтронов порождается дейтрон-дейтронным взаимодействием.[2]

Группа индийских ученых в 1985 году впервые получила экспериментальное подтверждение генерации нейтронов грозами. Нейтроны регистрировались с помощью газоразрядных счетчиков наполненных BF₃, количество нейтронов за один разряд оценили в 10^7 - 10^{10} , причина генерации нейтронов осталась неясной, однако предположили, что ответственно за генерацию нейтронов дейтрон-дейтронное взаимодействие.[2]

Другое экспериментальное подтверждение было получено индийскими учеными в 1997 году. Они оценили количество в 10^9 нейтронов за один разряд. Кроме этого, предположительно, нейтроны были зарегистрированы в НИИЯФ МГУ на установке ДЯИЗА .[2]

Теория образования нейтронов в стволе молнии

Во время разрядов молний может выделяться колоссальная энергия и одним из каналов выхода этой энергии может быть образование нейтронов

Во время грозы в облаках накапливается электрический заряд, который достигает значений в 300-380 Кл, что создает в атмосфере сильные электрические поля. В средних широтах сила тока в разряде молнии достигает 10 в 5 А в 1,5% случаев и 10 в 4 А в 65% случаев. Длительность одного электрического разряда 10 в 4 с, а количество разрядов может достигать несколько десятков. Полное время жизни молнии 1,5-2 с.[2]

В водяном паре имеются молекулы тяжелой воды, которые могут участвовать в реакции



Руководствуясь изложенной выше теорией, получается, что в одном, достаточно мощном разряде, может генерироваться 10^9 - 10^{10} нейтронов с энергией 2,45 МэВ. Высота генерации может быть от поверхности Земли до 10 км, фактически – это высота разряда молнии.

Нейтроны от убегающих электронов

Механизм образования нейтронов описанный выше в 2006 году был подставлен под сомнение. В своей работе Бабич привел теоритические выкладки, которые показали невозможность ядерного синтеза в грозовой атмосфере. В этой же работе он привел механизм образования нейтронов с участием фотоядерных реакций, протекающих вне канала молнии в восходящих гигантских атмосферных разрядах, развивающихся над грозowymi облаками в объемах до тысяч кубических километров. Такие явления возникают в результате пробоя стратосферы на релятивистских убегающих электронах.[2]

Восходящие атмосферные разряды возникает вследствие генерации лавин релятивистских убегающих электронов (ЛРУЭ), инициируемых космическими лучами. Подобные явления сопровождаются импульсами жесткого гамма излучения, которое в дальнейшем будет называться « γ -вспышками» или « γ -излучением». Считается, что γ -вспышка – это тормозное излучение ЛРУЭ. Такие вспышки регистрировались в различных экспериментах. Спектр типичной вспышки доходил до 10-20 МэВ. Простая модель на основе тормозного излучения электронов предполагает, что большинство электронов, породивших излучение, должны обладать энергией от 20 до 40 МэВ.[2]

Поскольку измеренный спектр γ -вспышки простирается до 20 МэВ (по некоторым работам до 50 МэВ), а рассчитанная средняя энергия фотонов тормозного излучения ЛРУЭ ≈ 1 МэВ, то возможна генерация нейтронов в фотоядерной реакции вне канала молнии:

$$\gamma + N^{14} \rightarrow N^{13} + n \quad (4)$$

Бабич оценил количество нейтронов в приближении изотропного точечного источника тормозного излучения в $N_n = 10^{15}$. [2]

Возникновение γ -вспышек во время гроз

Двигаясь под действием электромагнитного поля в атмосфере, электроны испытывают действия силы торможения, обусловленной ионизационными потерями. Величина силы торможения имеет минимум энергии при 1 МэВ. При наличии в атмосфере достаточно высокого электрического поля E_c электрон начинает ускоряться. Необходимая энергия для инициализации процесса убегания электронов составляет примерно 0,1-1 МэВ. Электроны таких энергий присутствуют в составе ШАЛ КЛ. Вследствие ионизации атмосферы ускоренными электронами будут генерироваться вторичные электроны. В результате образуется экспоненциально нарастающая лавина убегающих электронов. Стоит отметить, что критическое значение электрического поля E_c , при котором начинается пробой на убегающих электронах, примерно на порядок ниже значения, необходимого для обычного пробоя. Впервые γ -вспышки были обнаружены в космическом эксперименте BATSE в 1994 году. В дальнейшем было установлено, что вспышки появляются в пределах нескольких миллисекунд после молниевых разрядов, происходящих в радиусе 300 км от точки надира спутника. Географическое распределение γ -вспышек, полученное на эксперименте RHESSI лишний раз указывает на связь этого явления с грозовой активностью. Вспышки наблюдаются в основном в полосе широт до 30° над материками. В районе этих областей наблюдается повышенная грозовая активность. [2]

Однако до настоящего времени окончательно не разрешены разногласия относительно сценария ускорения электронов. Фактически вопрос о природе возникновения γ -вспышек остается открытым. Возможным поиском ответа на этот вопрос является изучение генерации нейтронов от гроз и их регистрации на борту КА.

Детекторы тепловых нейтронов

В качестве детекторов тепловых нейтронов в приборе ДЕПРОН, рассматриваемом в данной работе, используются гелиевые газоразрядные счетчики СИ13Н, регистрация нейтронов в нем происходит по вторичным заряженным частицам, образованным в реакции захвата нейтрона ядром гелия-3 в результате реакции $He^3(n,p)T$ при этом образуются протон и тритон с суммарной энергией 0,76 МэВ, а наиболее вероятные энергии 0,19 и 0,54 МэВ соответственно, для тепловых нейтронов сечение $\delta = 5400$ б. Эффективность регистрации тепловых нейтронов указанными счетчика-

ми достигает $\epsilon = 80\%$ при прохождении нейтрона в направлении, перпендикулярном оси счетчика.[3]

Детектор состоит из 12 счетчиков медленных нейтронов СИ-19Н, разбитых на 4 группы параллельно включенных счетчиков по 3 в каждой группе - триаде. Размер счетчика – 18х3 см. Две триады расположены таким образом, что их окружает слой органического замедлителя толщиной 15 мм со всех сторон, две других триады с одной стороны открыты. Нейтрон после замедления до тепловой энергии мог попасть в рабочий объем любого из счетчиков и в результате реакции $\text{He}^3 (n,p)\text{T}$ вызвать электрический импульс на выходе соответствующей триады.[2],[3]

С увеличением энергии эффективность сильно падает по закону $\delta = \frac{1}{\sqrt{(E_n)}}$, где E_n – энергия нейтрона. [2]

Постановка задачи

Как видно из анализа литературных источников существует проблема анализа потока нейтронов от гроз на низких орбитах. Научная общественность пока не пришла к единому мнению модели источника нейтронов во время грозовой активности. Кроме того, остается неясным возможно ли наблюдение этих нейтронов на борту низкоорбитальных космических аппаратов.

Чтобы ответить на эти вопросы необходимо обработать данные космических экспериментов по измерению потоков нейтронов на низких орбитах. Выделить данные потенциально относящиеся к грозовой активности от потока от остальных источников

В данной работе проводится первичный анализ данных детектора ДЕПРОН, находящегося на спутнике "Ломоносов" – изучение распределения нейтронов по поверхности земли, первичная обработка данных и оценка возможностей по их анализу.

Эксперимент

Язык программирования R хорошо подходит для работы с большими массивами данных. Он имеет много подключаемых библиотек позволяющих с большим удобством обрабатывать данные и строить множество различных видов графиков и карт. С его помощью в данной работе были обработаны данные эксперимента ДЭПРОН и построены планетарные карты распределения нейтронов и графики счета от времени. Также с помощью R были произведены усреднения треугольным средним данных поминутно.

Проведем анализ различных областей Земли с точки зрения вклада различных источников в поток нейтронов:

а) В полярных областях основной вклад в поток нейтронов будет связан с потоком нейтронов альбедо и с рождение нейтронов в корпусе космического аппарата при его взаимодействие с частицами внешнего радиационного пояса Земли

б) В области Южной Америки основной вклад в поток нейтронов внесет южно-атлантическая магнитная аномалия, область где внутренний радиационный пояс земли ближе прилегает к поверхности Земли и при взаимодействии его частиц с материалом космического аппарата будут рождаться нейтроны

в) В области низких широт не будет столь значительных источников нейтронов и поток нейтронов будет там намного ниже Так как не представляется возможным выделить поток нейтронов от гроз, который будет невелик, в полярных и южно-атлантической областях, то их необходимо вырезать. Лучше всего это сделать по

геомагнитным координатам, в которых области с малыми значениям геомагнитной широты будут соответствовать южно-атлантической магнитной аномалии, а области с большими геомагнитной широты, будут соответствовать полярным областям. Также необходимо отделить нейтроны альбедо от возможных нейтронов от гроз, по тому что нейтроны альбедо будут иметь определенное распределение по широтам

По данным детектора ДЕПРОН были построены зависимость счета нейтронов от времени и распределение нейтронов по поверхности Земли для двух газоразрядных гелиевых детекторов (рис.1 и рис.2, рис. 3 и рис. 4) находившихся на борту космического аппарата. Области южно-атлантической магнитной аномалии и частично полярные области были вырезаны описанным выше образом.

Размер точек пропорционален счету нейтронов за одну секунду, а для лучше визуализации каждому значению соответствует свой цвет точки. На графике показан счет нейтронов за одну секунду от времени за сутки.

В данных, как присутствующую участки, где счет нейтронов равен нулю, так и участки по которым данных не имеется, которые при обработке игнорируются. Видно, что счет нейтронов от первого детектора не превышает 2 (рис.2), а от второго 4(рис.4), статистики крайне немного.

В области низких широт, где поток мал, возможно отделение нейтронов от гроз и нейтронов от других источников при этом интерес вызывают области где замечен:

а) Единичный большой счет нейтронов

б) Повышенный счет нейтронов в среднем

для первого детектора (рис.1) областей б) выделить не удастся ввиду крайне малого счета нейтронов, однако единичный большой счет присутствует в области Африки и Северной Америки

Для второго детектора (рис.3) можно выделить оба типа областей при этом области, с большим счетом первого детектора, также являются областями с большим счетом для второго детектора. Для более подробного изучения областей б) необходимо усреднить данные.

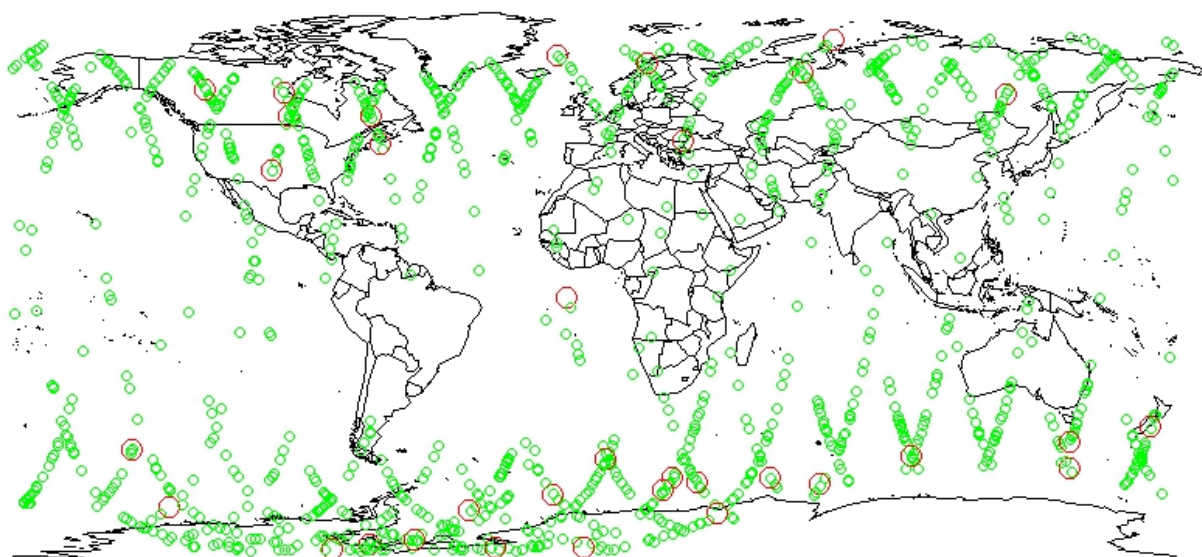


Рис. 1: распределение счета нейтронов Детектор1

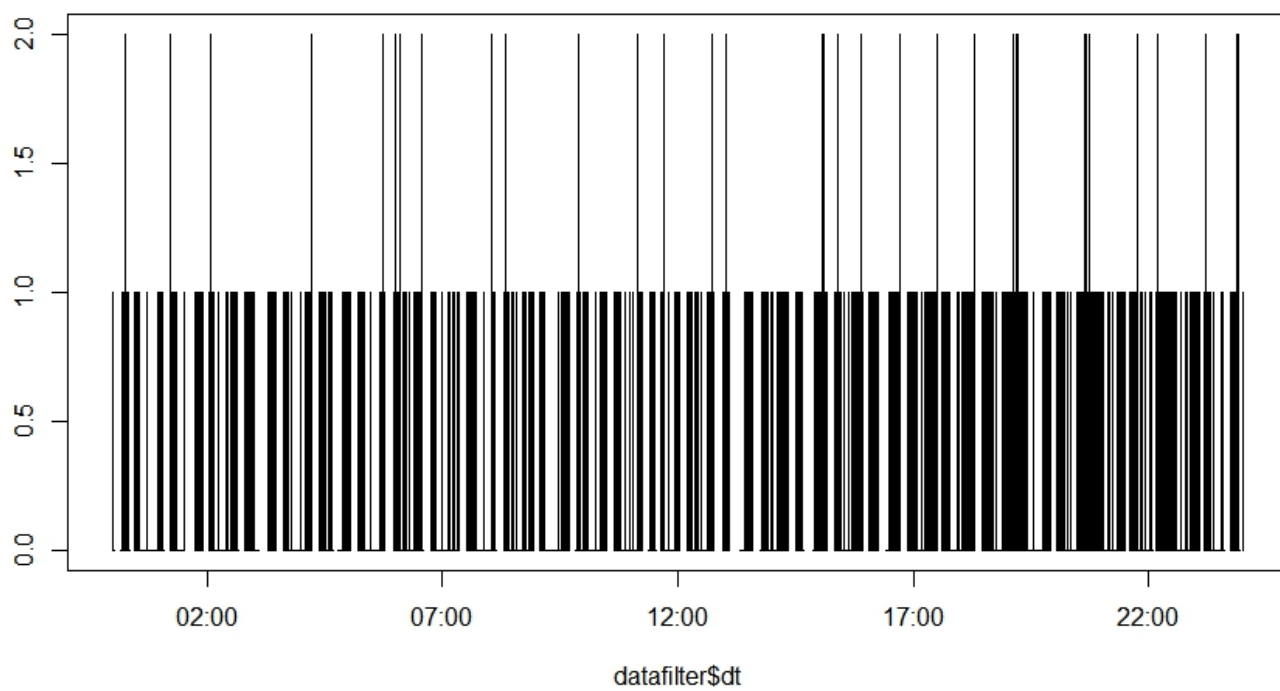
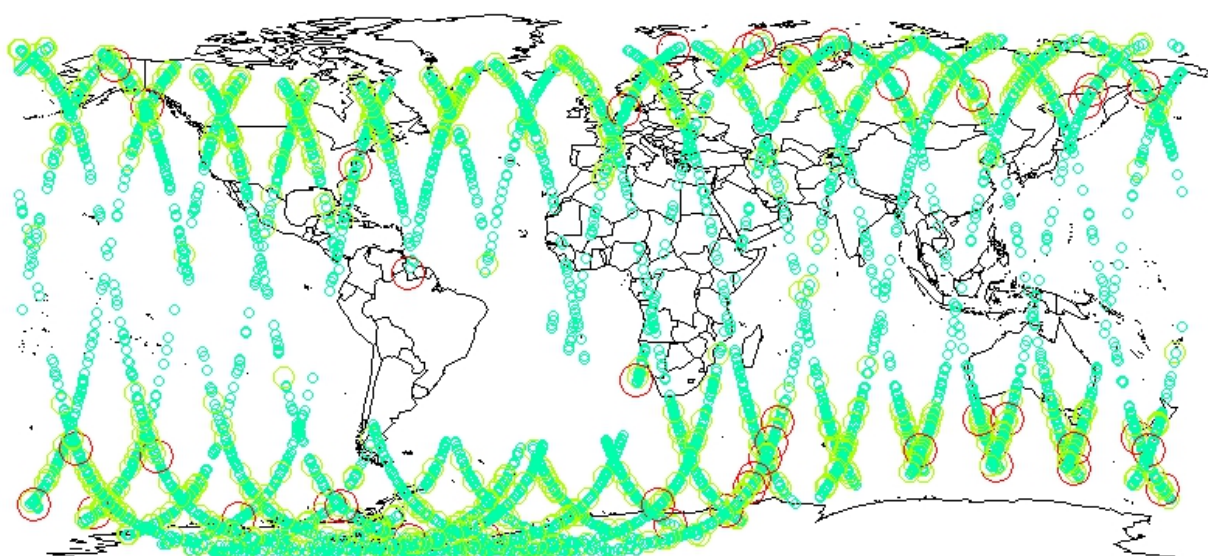


Рис. 2: зависимость счета от времени Детектор1



Распределение нейтронов детектор 2

Рис. 3:

зависимость счёта от времени Детектор2

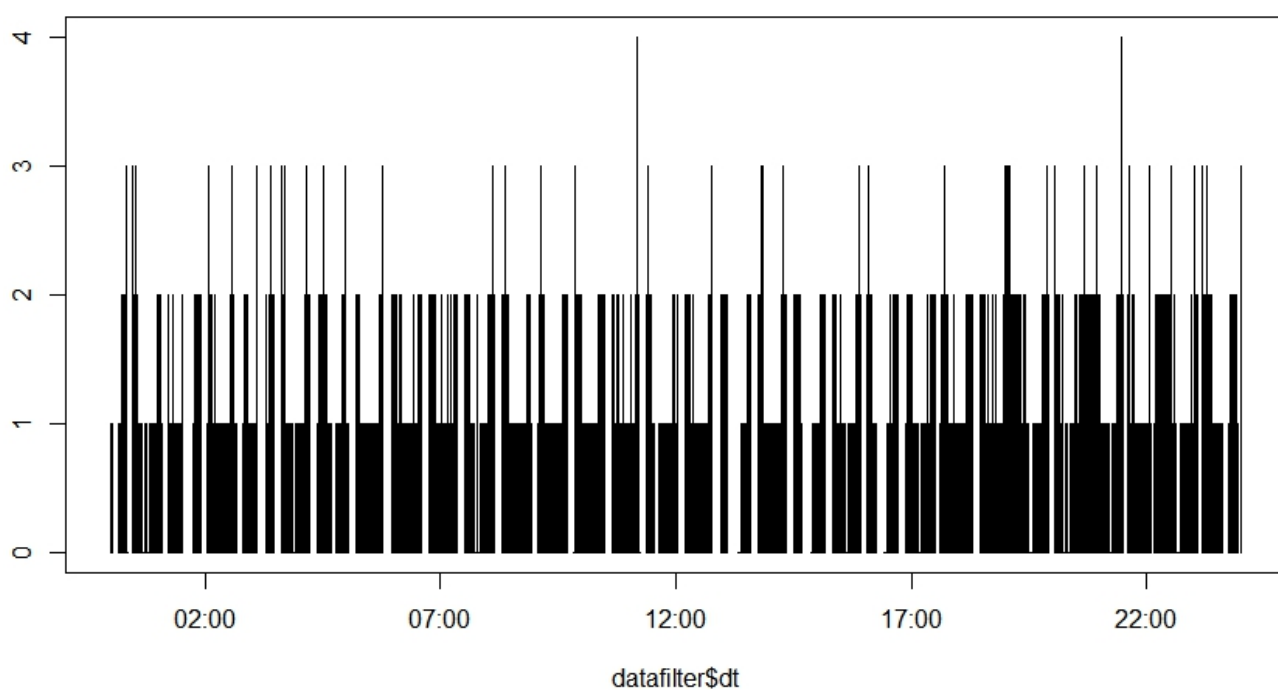


Рис. 4:

Распределение нейтронов усредненное детектор 2

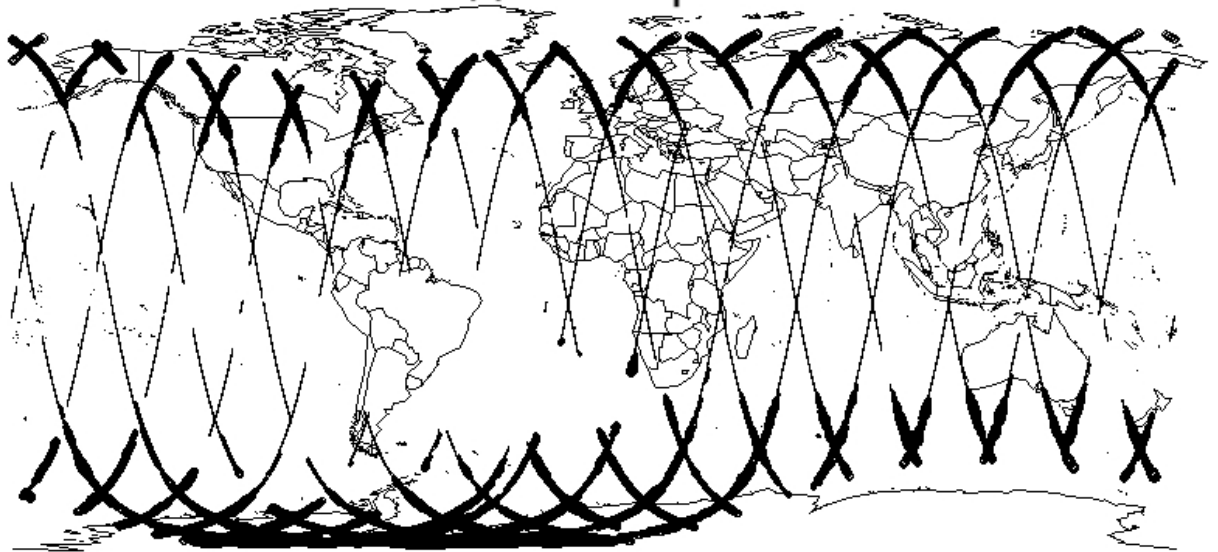


Рис. 5:
зависимость счета от времени
усредненное Детектор2

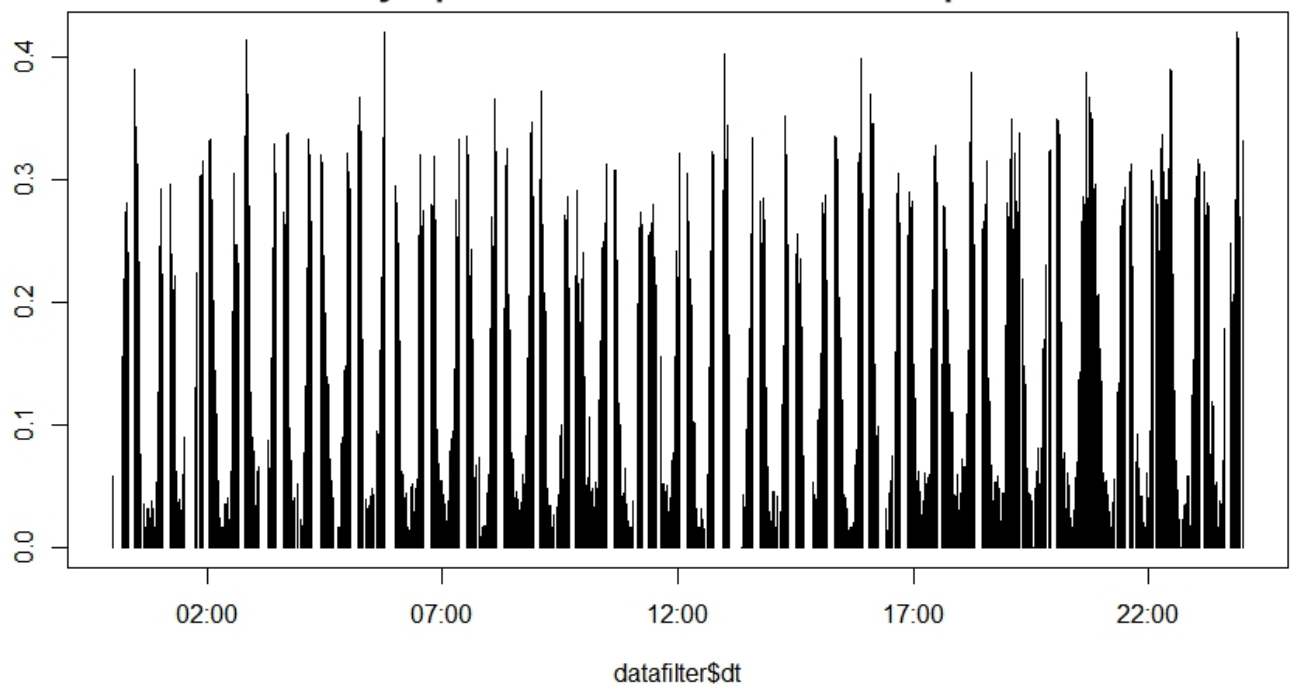


Рис. 6:

Проводя подобный анализ данных эксперимента ДЕПРОН с данными грозовой активности и карт молний возможно проверить связь подобных областей повышенного счета нейтронов с нейтронами от гроз. Было проведено сопоставление карт счета нейтронов с картами молний с ресурса Lightning.org. К несчастью, основная масса наземных станций наблюдения молний расположены в Северной Америке, Европе и Океании и не все данные получится сопоставить с этими картами молний. В ходе сопоставления были обнаружены области, в которых могли быть считаны нейтроны от грозовой активности.

Сопоставление карт молний с картами нейтронов



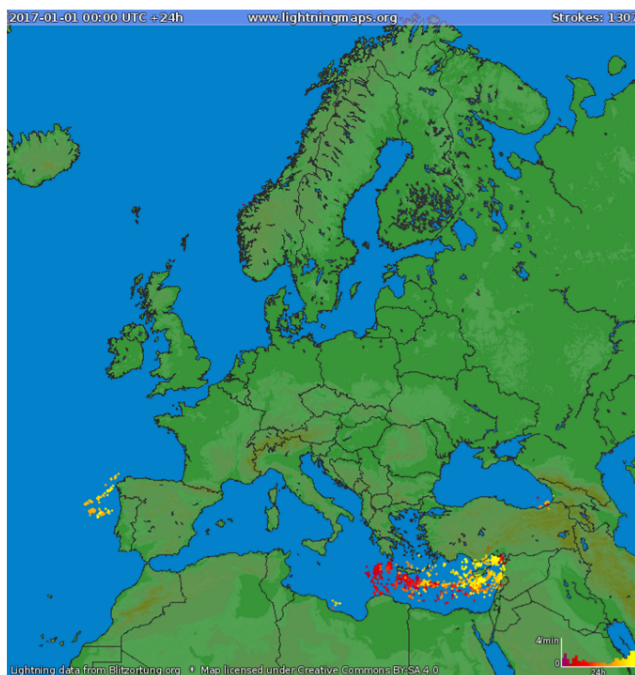
Карта молний Lightning.org



Карта счета нейтронов

Рис. 7:

Сопоставление карт молний с картами нейтронов



Карта молний Lightning.org



Карта счета нейтронов

Рис. 8:

Результаты работы

- 1) Освоены язык программирования R и среда программирования Rstudio.
- 2) Проведен первичный анализ данных с эксперимента ДЕПРОН.
- 3) Показаны возможные направления анализа этих данных.
- 4) Проведено сопоставление карт счета нейтронов с картами молний.

Литература

- [1] Власов Н А, Нейтроны. - Наука, 1955.
- [2] Дроздов А., Поток нейтронов, связанный с грозовой активностью, за пределами атмосферы., Диссертация - Москва, 2010.
- [3] М.И.Панасюк, П.И.Шаврин, О.Ю.Нечаев, Л.С.Братолобова-Цулукидзе, Т.И.Маркелова, М.А.Сараева Многоцелевой детекторный модуль для регистрации нейтронов в околоземном пространстве - Препринт НИИЯФ МГУ , Москва, 1990
- [4] Н.Н. Володичев, Б.М. Кужевский, О.Ю.Нечаев, М.И.Панасюк, П.И.Шаврин Регистрация нейтронов и гамма-квантов космического происхождения на аэростатах - Препринт НИИЯФ МГУ , Москва, 1990
- [5] Капитонов И.М., Введение в физику ядра и частиц: Учебник. Изд. 5-у, испр. и доп. - Ленанд, 2017