

ГРОЗЫ КАК ВОЗМОЖНАЯ ПРИЧИНА ПОЯВЛЕНИЯ ПОВЫШЕННОГО НЕЙТРОННОГО ФОНА ВБЛИЗИ ЭКВАТОРА

Братолобова-Цулукидзе Л. С.¹, Голубев В. Н.³, Грачев Е. А.¹, Григорян О.Р.¹, Куницын В. Е.², Лысаков Д. С.¹, Кужевский Б. М.¹, Нечаев О. Ю.¹, Усанова М. Е.²

¹НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия

²Московский государственный университет им М. В. Ломоносова, физический факультет, Россия

³РКК «ЭНЕРГИЯ», г. Королев МО, Россия

Приведен результат анализа экспериментальных данных по потокам тепловых нейтронов, полученных на борту орбитального комплекса «Мир» (1991 г.) и ИСЗ «Коллибри» (2002 г.) на высоте 400 км. Получено, что распределение приэкваториальных потоков нейтронов имеет долготную зависимость. Повышенные фоновые значения потоков нейтронов с энергией 0.25 эВ–1.9 МэВ, так и отдельные всплески нейтронов с энергией 0.1–1.0 МэВ наблюдаются преимущественно в двух секторах: Тихоокеанском и Африканском. В качестве возможного источника наблюдаемых вблизи экватора явлений рассматриваются грозы.

1. Введение

На роль молниевых разрядов в динамике радиационных поясов Земли обратили внимание еще в начале 1960-х годов. За последовавшие годы исследований был накоплен огромный экспериментальный материал об эффектах в ионосфере, напрямую связанных с грозами, которые были зарегистрированы космическими средствами на различных широтах и в различных высотных диапазонах. К ним относятся: аномально высокие квазипостоянные электрические поля, низкочастотное электромагнитное излучение, высокочастотное радиоизлучение, рентгеновское (гамма) излучение, излучение в оптическом диапазоне, потоки электронов различных энергий.

Связь потоков электронов с молниями экспериментально и теоретически подтверждена на $L > 1.8-2.0$ [1, 2]. Однако на орбитальном комплексе «Мир» вблизи геомагнитного экватора (на $L < 1.2$) были также зарегистрированы всплески электронов с энергией в сотни кэВ, появление которых авторы связали с распределением глобальных грозовых систем в районе экватора [3, 4]. Механизмы, определяющие эту связь, пока еще не совсем ясны.

Особое место занимает вопрос о возможности регистрации на спутниках нейтронов, которые могут генерироваться во время молниевых разрядов. Во время разряда в высоковольтных проводах в наземных условиях регистрировалось до $2 \cdot 10^{10}$ нейтронов [5]. Согласно некоторым оценкам при разряде молнии может генерироваться до 10^{15} нейтронов [6, 7]. В 1998 г. в наземном эксперименте по регистрации нейтронов от молний системой нейтронных детекторов, расположенной на уровне моря, были получены всплески до 10^8-10^9 частиц. Предполагается, что механизм их образования связан

с ускорением протонов и ядер дейтерия и последующим образованием нейтронов в ядерных реакциях с другими составляющими атмосферы [8]. Аналогичный результат был получен на нейтронной установке площадью около 1 м^2 в НИИЯФ МГУ, когда на расстоянии 1000 м от места возникновения молнии регистрировались всплески нейтронов с энергией $E_n < 0.5 \text{ эВ}$ (рис. 1). Исходя из полученных данных полное количество нейтронов, генерированных во время молнии, оценивается как $2.5 \cdot 10^{10}$.

2. Аппаратура

Представленные экспериментальные данные были получены приборами «Рябина-2» на борту орбитального комплекса «Мир» (наклонение 51.6° , высота 400 км, масса 137 тонн) в 1991 г., «Скорпион-1» на борту МКС (наклонение 51.6° , высота 450 км, масса 140 тонн) и анализатором частиц и полей (АЧП) на ИСЗ «Колибри-2000» (наклонение 51.6° , высота 450 км, масса 20 кг) в 2002 г. Приборы предназначены для измерения проникающей радиации: нейтронов, гамма-квантов, энергичных заряженных частиц.

Детекторный модуль аппаратуры «Рябина-2», регистрирующий нейтронное излучение, был установлен снаружи станции. Он состоял из 12 счетчиков медленных нейтронов типа СИ-19Н, разбитых на 4 группы параллельно включенных счетчиков по 3 в каждой группе — триаде. Размер счетчика — $22 \text{ см} \times \text{Ø}3 \text{ см}$. Две триады были расположены таким образом, что их окружает слой органического замедлителя толщиной 15 мм со всех сторон, две других триады с одной из сторон были открыты. Нейтрон с произвольной энергией в диапазоне от 0.25 эВ до 1.9 МэВ после замедления до тепловой энергии мог попасть в рабочий объем любого из счетчиков и в результате реакции ${}^3\text{He}_2(n,p){}^3\text{T}$ вызвать электрический импульс на выходе соответствующей триады. Счетчики СИ-19Н были наполнены изотопом гелия ${}^3\text{He}$ под давлением 4 атм. Поскольку сечение реакции захвата тепловых нейтронов ядром ${}^3\text{He}$ велико ($\sigma_{\text{захв}} = 5400 \text{ барн}$), эффективность регистрации тепловых нейтронов указанными счетчиками достигает 80 % при прохождении нейтрона в направлении, перпендикулярном оси счетчика. Площадь установки составляла 310 см^2 .

Нейтронный модуль аппаратуры «Скорпион-1» состоит из двух счетчиков, включенных параллельно, и установлен внутри герметичного отсека станции. Счетчики работают без замедлителя и регистрируют нейтроны с энергиями от 0.1 эВ до 1 МэВ. Нейтронная часть аппаратуры АЧП, идентична аппаратуре «Скорпион-1» и работала в негерметичном отсеке микроспутника «Колибри-2000», запущенном в апреле 2002 г. Эффективная площадь приборов составляет 100 см^2 .

Частота опроса приборов «Рябина-2», «Скорпион-1» и АЧП составляла соответственно 1.5, 0.1 и 0.05 Гц.

3. Экспериментальные данные и обсуждение результатов

В настоящей работе представлены результаты анализа потоков нейтронов, зарегистрированных на ОК «Мир» в 1991 г. (аппаратура «Рябина-2»), МКС («Скорпион-1»),

2002 г.), микроспутнике «Колибри-2000» (АЧП, 2002 г.). На рис. 2 приведен пример регистрации нейтронов на ОК «Мир».

Временной ход распределения потоков нейтронов отражает структуру радиационных поясов Земли. Скорость счета достигает максимальных значений в областях внешнего и внутреннего радиационных поясов и минимальна вблизи геомагнитного экватора. Минимальные потоки, отмечаемые в области геомагнитного экватора, определяются как фоновые. В дальнейшем анализируется фоновый счет детекторов, определяемый в основном собственными шумами электроники, потоками альбедных нейтронов и «локальными» нейтронами, рожденными в теле космического аппарата. Видно, что потоки сильно флуктуирующие. В интервалах минимального счета наблюдаются некоторые неперіодические возрастания потоков нейтронов, которые и анализируются в дальнейшем.

Выбор для рассмотрения области низких широт связан с тем, что для нее характерно отсутствие в спокойных геомагнитных условиях естественных электромагнитных излучений, а потоки частиц радиационных поясов, как правило, крайне незначительны и ниже порога регистрации детекторов; вклад в счет нейтронных детекторов энергичных частиц галактических космических лучей минимален.

На рис. 3 представлена совокупность данных, полученных примерно при 60 пересечениях области экватора микроспутником «Колибри-2000» за период с 19.03.02 по 03.05.02, при этом около 30 витков спутника практически равномерно покрыли все долготные интервалы.

Одной из основных составляющих фонового счета детекторов нейтронов являются потоки нейтронов, образующиеся в конструкции аппарата под воздействием галактических космических лучей. Поэтому фоновый счет может зависеть от массы аппарата. На рис. 4 приведены полученные практически одновременно при пролете аппаратов через одну и ту же область пространства данные «Колибри-2000» (масса 20 кг) и МКС (масса 140 тонн). Видно, что в области геомагнитного экватора фоновый счет детекторов микроспутника в 2–3 раза ниже. Таким образом, с использованием малых космических аппаратов с малой массой мы можем перейти от статистического анализа фоновых возрастаний к анализу индивидуальных событий.

Во всех трех экспериментах аппаратура позволила одновременно с регистрацией нейтронов определять также потоки протонов галактических космических лучей с энергиями $E_p > 50$ МэВ. На рис. 5 приведены примеры такой регистрации на ИСЗ «Колибри-2000». Хорошо видно, что возрастания потоков нейтронов на минимальных L-оболочках не связаны с возможной генерацией их в конструкции спутника частицами галактических космических лучей.

4. Механизмы

Как видно из рис. 2, потоки нейтронов, измеренные на ОК «Мир» сильно флуктуируют. Для выделения возрастаний был использован вейвлет-анализ — метод, позволяющий разложить исходный сигнал на составляющие различного масштаба [9]. С

помощью вейвлет–преобразования были найдены средние фоновые значения потоков нейтронов и выделены возрастания фоновых потоков нейтронов.

На рис. 6 представлена последовательность применения вейвлет–анализа к экспериментальному ряду данных. На рис. 6,а показана крупномасштабная составляющая сигнала, значения которой в областях минимального счета интерпретируются нами как средние фоновые значения потоков нейтронов. Интересующие нас события – возрастания фонового счета нейтронных детекторов — группы, состоящие по крайней мере из трех точек (рис. 6,б). По структуре они отличаются от случайных флуктуаций, состоящих из меньшего числа точек. На рис. 6,с представлены вейвлет–реконструкция и среднее значение сигнала в выделенном интервале. При дальнейшем анализе экспериментальных данных в каждой точке было найдено отношение значения реконструированного сигнала к среднему значению.

На рис. 6,с пунктирными линиями обозначены уровни, соответствующие превышению вейвлет–реконструированного сигнала относительно среднего значения сигнала в 1.3 и 1.5 раза соответственно.

Области наиболее сильных возрастаний фонового счета детекторов нейтронов с энергией 0.25 эВ–1.9 МэВ по данным ОК «Мир» (более чем в 2 раза относительно средних значений) представлены на рис. 7 в географических координатах. Видно, что области повышенного фонового счёта тепловых нейтронов вблизи геомагнитного экватора имеют долготное распределение и появляются в основном над Африкой и Тихим океаном. Долготные интервалы регистрации выделены на рисунках пунктирными линиями. В этих же областях наблюдаются всплески нейтронов с энергией 0.1 эВ–1.0 МэВ по данным с ИЗС «Колибри-2000» (рис. 7,с положение всплесков нейтронов показано точками). Полученные результаты были сопоставлены с распределением плотности молниевых разрядов, регистрировавшихся на ИСЗ [10], в приэкваториальной зоне (рис. 7,а). Наибольшая плотность молниевых разрядов отмечается над сушей и занимает три сектора: Азиатский (Индонезийский), Африканский и Американский (Центральная Америка и северная часть Южной Америки). Также с большой частотой вспышки молний наблюдались и над водной поверхностью. Видно, что наиболее заметное повышение, как фонового счета, так и всплесков тепловых нейтронов, наблюдается как раз в областях с большой плотностью молниевых разрядов. Таким образом возможна связь появления повышенного фонового излучения нейтронов с грозовыми явлениями.

Известно, что грозовые облака являются аккумуляторами электрических зарядов, величина которых достигает сотен кулон. Это приводит к тому, что электрическое поле земной атмосферы сильно деформируется, то есть появляются сильные локальные электрические поля.

С другой стороны известно, что при достижении определенных условий между грозовыми облаками или между облаком и поверхностью земли, происходит электри-

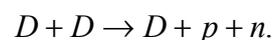
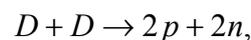
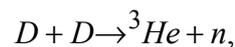
ческий разряд (молния). Величина электрического тока в молнии достигает иногда сотен тысяч ампер даже для средних широт.

Сведения об электрофизических параметрах молний довольно разноречивы. Согласно различным источникам можно выделить следующие характеристики.

При потенциале облака $U = 7 \cdot 10^8$ В длина ветвей «импульсной короны» $l = 3$ м. Диаметр канала ступенчатого лидера составляет от 0.2 см. до 5 см. Число повторных молний может достигать несколько десятков, общая длительность многократной молнии до 1.5 сек. За время $t = 10^{-6}$ с протекает ток $I = 4.5 \cdot 10^4$ А. При этом полный заряд, переносимый в импульсной фазе, может составить от 0.1 до нескольких Кл.

Используя это, получим, что полная энергия молнии составит $E = UIt = 31.5 \cdot 10^6$ Дж, а плотность энергии для различных геометрических параметров молнии составит $W = E/V = (3.5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^3)$ Дж/см³.

При таких плотностях энергии (с учётом того, что в водяном паре грозового облака есть молекулы тяжелой воды) в стволе молнии вполне может развиваться термоядерный процесс. В стволе молнии могут протекать следующие реакции:



Во всех случаях испускаются нейтроны, энергия которых составляет 2–3 МэВ. Такие нейтроны от молнии могут быть зарегистрированы как на уровне земной поверхности, так и в околоземном космическом пространстве. Оценки показывают, что для регистрации потока тепловых нейтронов на высоте 400 км после их рассеяния и поглощения в атмосфере необходимо, чтобы на тропосферных высотах во время разряда молнии образовалось порядка 10^{10} нейтронов.

5. Выводы

Таким образом, основные выводы данной работы:

- в области геомагнитного экватора отмечены как повышенные фоновые значения потоков нейтронов с энергией 0.25 эВ–1.9 МэВ, так и отдельные всплески нейтронов с энергией 0.1–1.0 МэВ, распределение которых имеет четко выраженную долготную зависимость;
- наиболее заметное повышение фоновых потоков и отдельные всплески нейтронов наблюдаются над Африкой и Тихим океаном;
- регистрация тепловых нейтронов может быть связана с генерацией нейтронов в молниевых разрядах.

1. Inan U. S., Burgess W. C., Wolf T. G., Shater D. C. Lightning-Associated Precipitation of MeV Electrons From the inner Radiation Belt. // *Geophys. Res. Lett.* vol.15, No 2, pages 172–175, February 1988.
2. Inan U. S., Carpenter D. L., Lightning-Induced Precipitation Events Observed at $L \sim 2.4$ as Phase and Amplitude Perturbations on Subionosphere VLF Signals. // *J. Geophys. Res.* Vol 92, No A4, pages 3293–3303, April 1, 1987.
3. Grigoryan, O. R., Sinyakov, A. V., Klimov, S. I., Energetic Electrons on $L < 1.2$. Connection to Lightning Activity // *Adv. Space Res.*, 1997, vol. 20, no 3, pp. 389–392.
4. Bratolyubova-Tsulukidze, L. S., Grachev, E. A., Grigoryan, O. R., Nechaev, O. Yu. Near-Equatorial Electrons as Measured onboard the Mir Space Station // *Cosmic Res.*, Vol. 39, No. 6, 2001, pp. 602–612.
5. Stephankis, S. J., Levine, L. S., Mosher D., et al. Neutron production in exploding wire discharges // *Phys. Rev. Lett.*, 29, 568–569, 1972.
6. Libby L. M., Luken H. R. Production of radiocarbon in tree rings by lightning bolts // *J. Geophys. Res.*, 78, 5902–5903, 1973
7. Libby L. M., Luken H. R. Comments on ‘Are neutrons generated by lightning by R.L. Fiescher, J.A. Plumer, and K. Crouch // *J. Geophys. Res.*, 80, 3505, 1975
8. Shyam A., Kaushik T. C. Observation of neutron bursts associated with atmospheric lightning discharge // *J. Geophys. Res.*, Vol. 104, No. A4, p.6867–6869 (1999).
9. Daubechies I. *Ten lectures on Wavelets*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992: 357 pp.
10. Christian H. J., Blakeslee R. J., Boccoppio D. J., et al. Global frequency and distribution of lightning as observed by the optical transient detector (OTD) // Proceeding of the 11th international conference on atmospheric electricity, Guntersville, Alabama, June 7-11, 1999. P. 726–729.

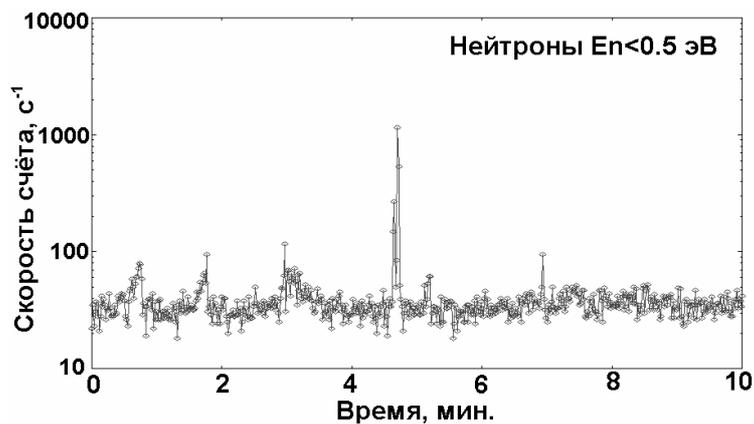


Рис. 1. Пример наземной регистрации нейтронов

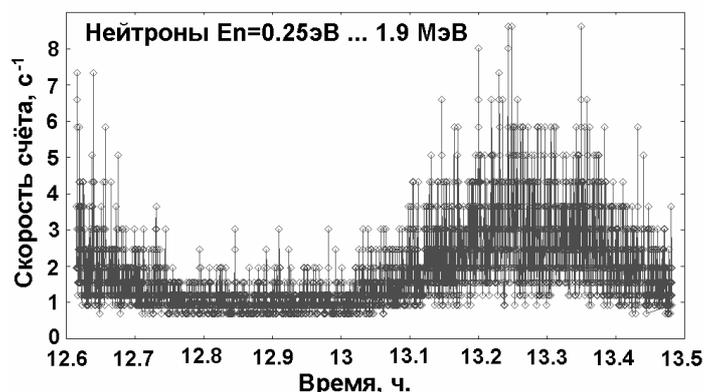


Рис. 2. Пример регистрации потоков нейтронов аппаратурой «Рябина-2», ОК «Мир» (1991 г.)

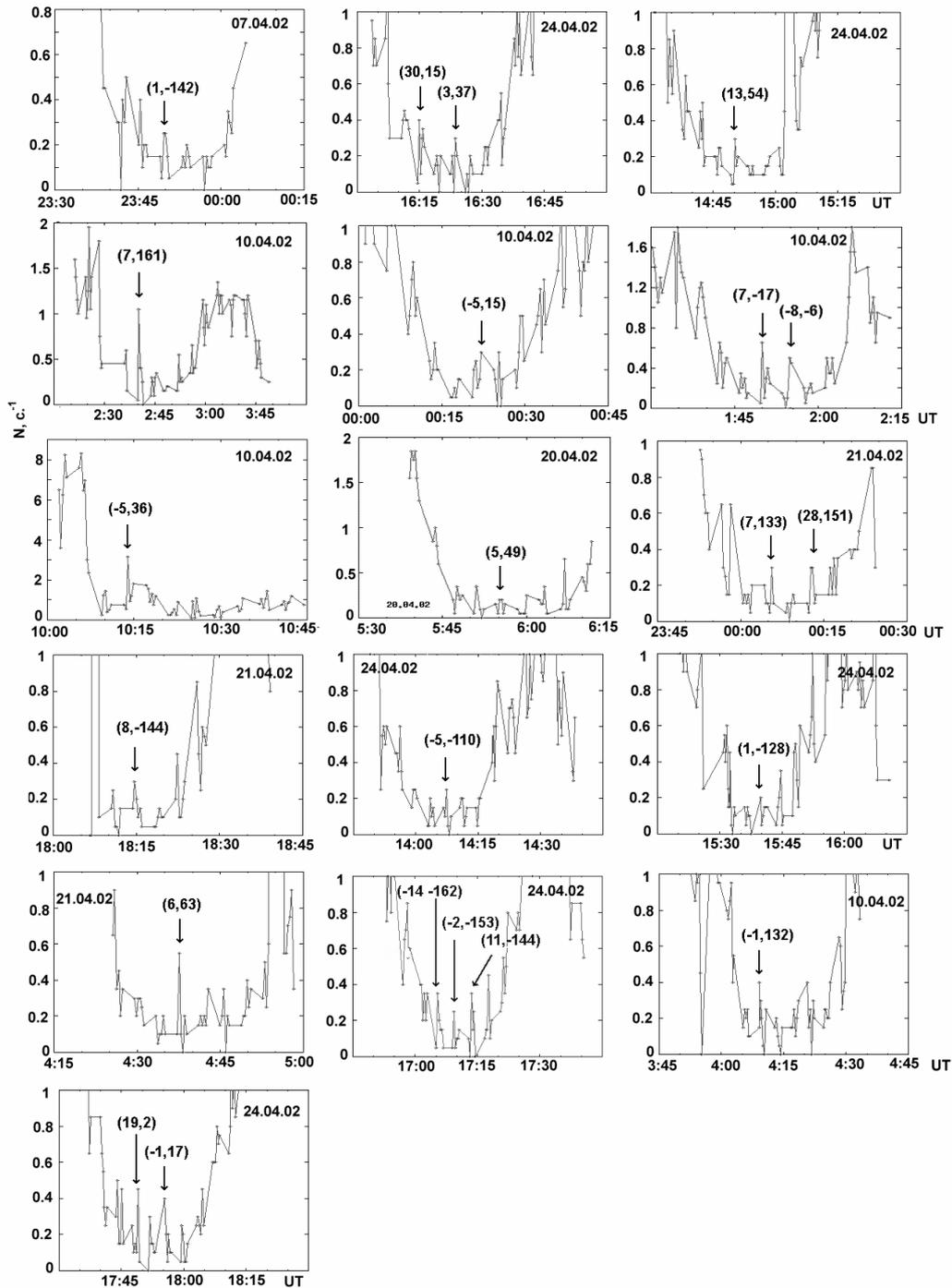


Рис. 3. Пример возрастания скорости счета нейтронных детекторов по данным ИСЗ "Колибри-2000", 2002 г.

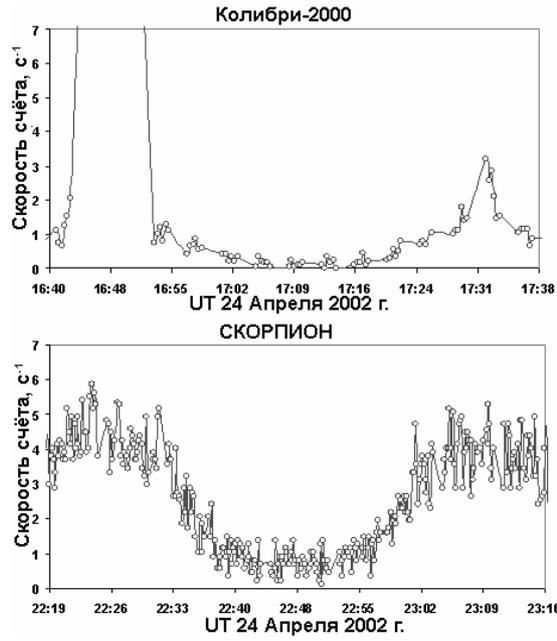


Рис. 4. Примеры регистрации тепловых нейтронов на Колибри-2000 и МКС

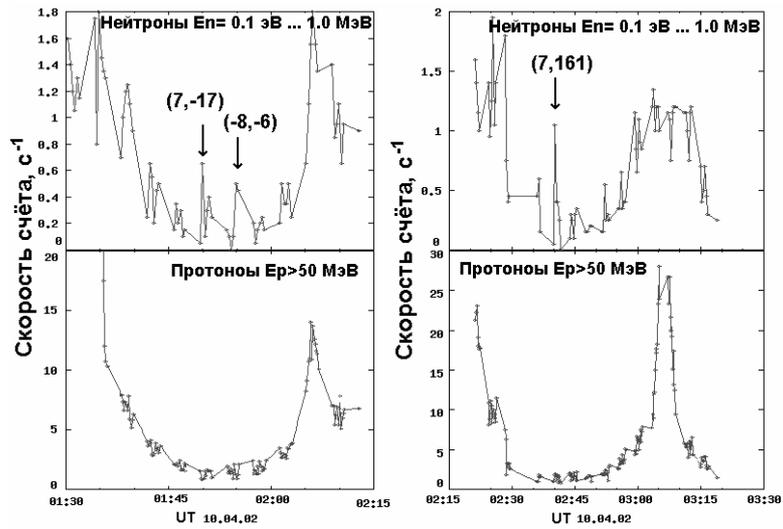


Рис. 5. Примеры одновременной регистрации тепловых нейтронов и протонов с энергиями больше 50 МэВ

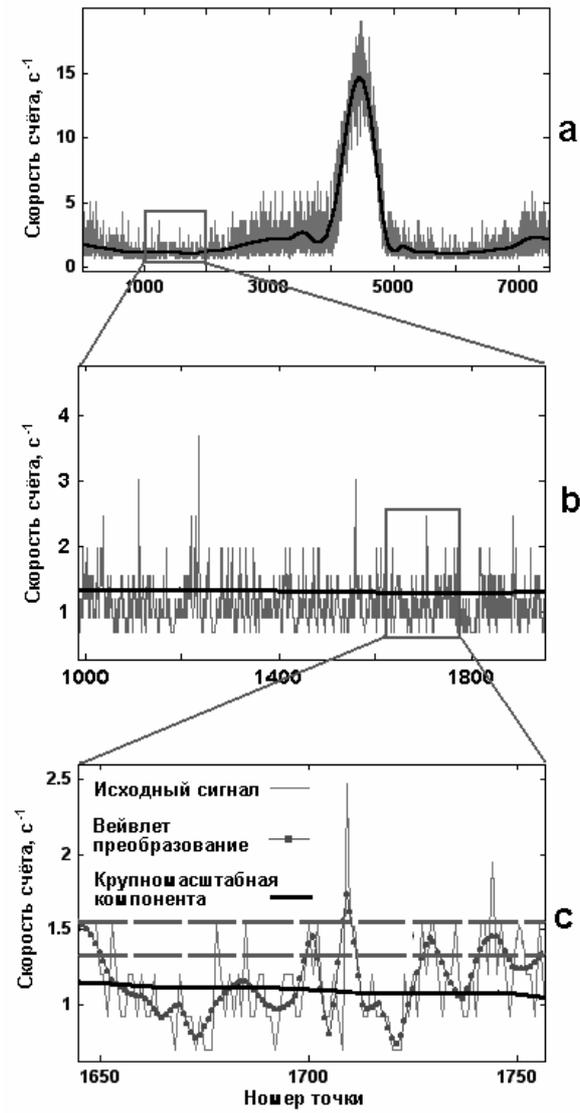


Рис. 6. Пример применения вейвлет-анализа к ряду экспериментальных данных

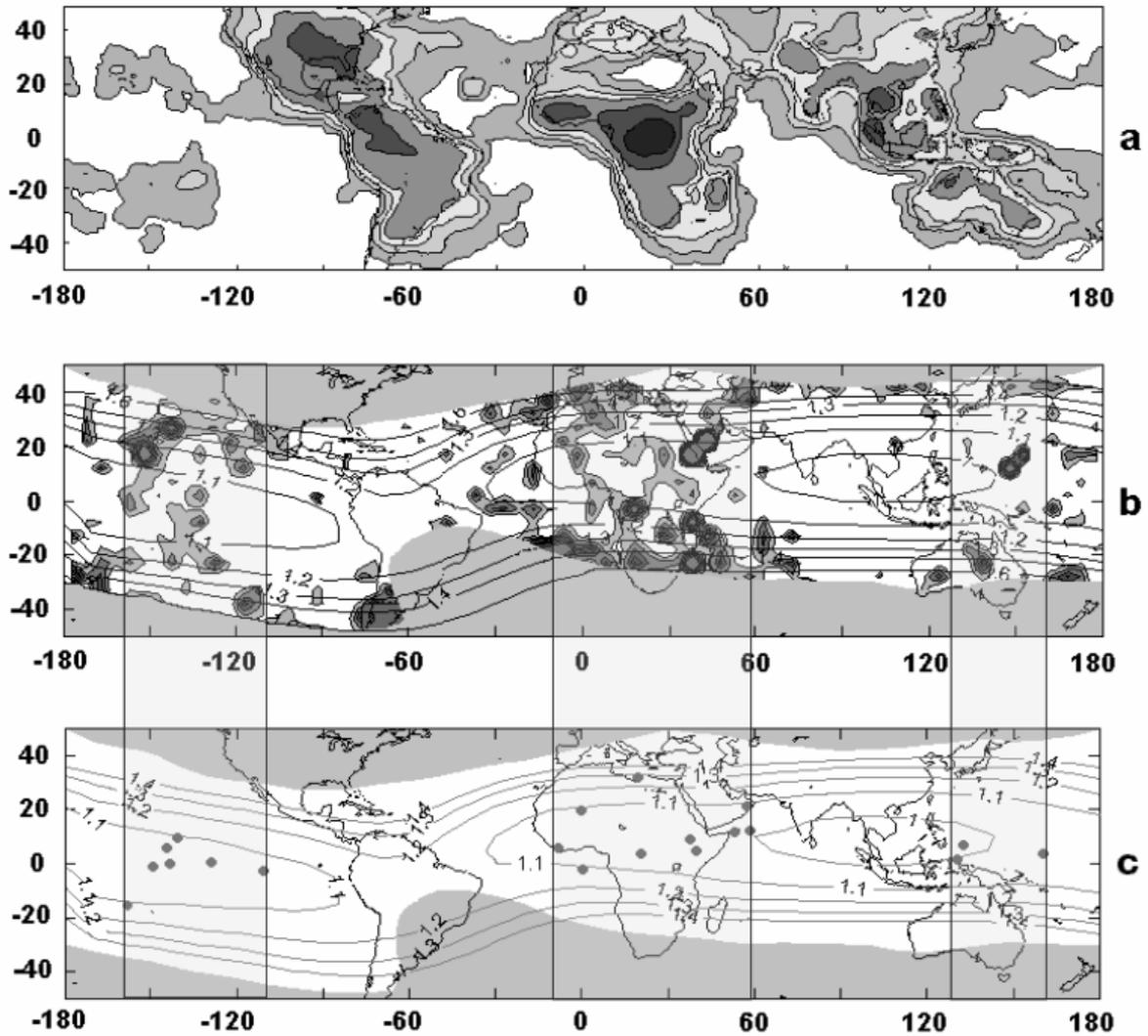


Рис. 7. а) Распределение плотности молниевых разрядов по данным ИСЗ.

б) Распределение возрастания фонового счета нейтронных детекторов по данным аппаратуры "Рябина-2", 1991 г.

в) Распределение возрастания счета нейтронных детекторов по данным аппаратуры АЧП, 2002 г.

На рисунке показаны границы радиационных поясов и изолинии параметра L