

ПРОЯВЛЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ВАРИАЦИЯХ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА ВЫСОКОГОРНОЙ СТАНЦИИ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

Антонова В.П.¹, Крюков С.В.¹, Луценко В.Ю.¹, Чубенко А.П.²

¹*Институт ионосферы Национального Центра космических исследований и технологий,
г.Алматы, Казахстан, valanta@rambler.ru*

²*Физический институт Российской академии наук, г.Москва, Россия*

Введение

Регистрация нейтронной компоненты космических лучей на мировой сети станций осуществляется преимущественно нейтронными мониторами на основе пропорциональных счетчиков, в состав газового наполнения которых входит трехфтористый бор, обогащенный изотопом ¹⁰B. Эффективность счета определяется вероятностью захвата нейтрона ядрами бора. Она максимальна для нейтронов тепловых энергий. Нейтронные мониторы предназначались главным образом для исследования космического пространства за пределами земной атмосферы. Для отражения тепловых и замедления быстрых нейтронов счетчики окружены полиэтиленом, а для увеличения скорости счета за счет локальной генерации нейтронов, - свинцом [1].

Измерения нейтронов тепловых энергий до недавнего времени носили эпизодический характер. Интерес к ним возрос после обнаружения всплесков нейтронов тепловых энергий на Памире во время экстремального гравитационного воздействия на земную кору со стороны Луны и Солнца (новолуние, полнолуние, солнечные затмения) [2-4]. Полагается, что земная кора, испытывая механическое воздействие, вытесняет накопившееся запасы радиоактивных газов изотопов радона. В процессе радиоактивного распада образуются альфа-частицы, которые активно взаимодействуют с ядрами элементов земной коры и воздуха с возникновением нейтронов. С другой стороны, при механических воздействиях на материалы происходит нарушение связей между молекулами вещества, образование микротрещин, возникновение сильного электрического поля между разъединяемыми поверхностями с эмиссией различных излучений (механоэмиссия). В сейсмически активных районах, к которым относится Тянь-Шань, обнаруженное явление можно использовать для разработки методов прогноза землетрясений. Однако сведения о величине вариаций тепловых и медленных нейтронов и источниках, вызывающих их, далеко неоднозначны.

Нами на высокогорной станции космических лучей (3340 м над уровнем моря, 43.2N; 76.6E) вблизи разлома земной коры была создана стационарная установка по регистрации тепловых нейтронов, которая была запущена в эксплуатацию в ноябре 2006 г. В настоящей работе представлены некоторые результаты исследования природы вариаций интенсивности тепловых нейтронов, регистрируемых созданной установкой в различных гелиогеофизических условиях, включая периоды активизации сейсмических процессов на Северном Тянь-Шане.

Экспериментальная установка

Детектор тепловых нейтронов, DTN, состоит из двух модулей. Каждый модуль содержит 6 пропорциональных счетчиков He2, наполненных смесью газов гелия-3 и аргона под давлением 2 атм. Собственный фон счетчиков составляет не более 0.2 имп/с. Длина счетчиков ~ 1 м, диаметр трубки – 3 см. Рабочее напряжение 1600 В подается на счетчики через высоковольтные фильтры. Счетчики заземлены через корпус модуля, выполненного из листового алюминия толщиной 1мм. Эффективность регистрации тепловых нейтронов ~ 60%. Как показала практика эксплуатации счетчиков, они стабильны в работе. Один модуль, DTN-1, установлен в одном помещении с нейтронным супермонитором 18NM64. Второй модуль, DTN-2, установлен в 10 м от здания в легком фанерном контейнере на высоте ~ 30 см от грунта. Модули разделены по питанию и являются независимыми. Банк данных формируется на жестком диске компьютера с однопольным временным разрешением отдельно по каждому каналу (счетчику), что позволяет эффективно отслеживать аппаратурные погрешности. Скорость счета модуля, установленного внутри здания, ~6.8·10⁴ имп/час, а внешнего ~ 4.9·10⁴ имп/час.

Принципиальное отличие установки по регистрации тепловых нейтронов от нейтронного монитора заключается в отсутствии поглотителя (полиэтилена) и свинца. Размещение установок на одной площадке дает возможность сравнивать изменения потока тепловых нейтронов с хорошо

изученными вариациями высокоэнергичных нейтронов, регистрируемых стандартным нейтронным монитором 18NM64. Данные монитора имеют высокую статистическую точность, скорость счета $\sim 5 \cdot 10^6$ имп/час. Вариации интенсивности высокоэнергичных нейтронов отражают главным образом возмущения межпланетного происхождения и изменения атмосферного давления. Рассмотрим последовательно отклик гео- и космофизических событий в вариациях потока тепловых нейтронов и сравним с вариациями данных стандартного нейтронного монитора.

Вариации атмосферного давления

Барометрический коэффициент, применяемый при коррекции данных нейтронного монитора на изменение атмосферного давления, составляет 0.72 %/мб. Такой же коэффициент должен быть и у тепловых нейтронов атмосферного происхождения.

Среднее атмосферное давление на Тянь-Шаньской высокогорной станции равно 675 мб, что на одну треть меньше, чем на уровне моря. На рис. 1 (сверху вниз) представлены часовые значения за период с 16 марта по 13 апреля 2015 г. атмосферного давления, данных нейтронного супермонитора 18NM64, интенсивности тепловых нейтронов от детекторов DTN2 и DTN1. На левой панели интенсивность нейтронов не исправлена на изменения давления, а на правой панели исправлена. Интенсивность нейтронов приведена в процентах к среднему значению.

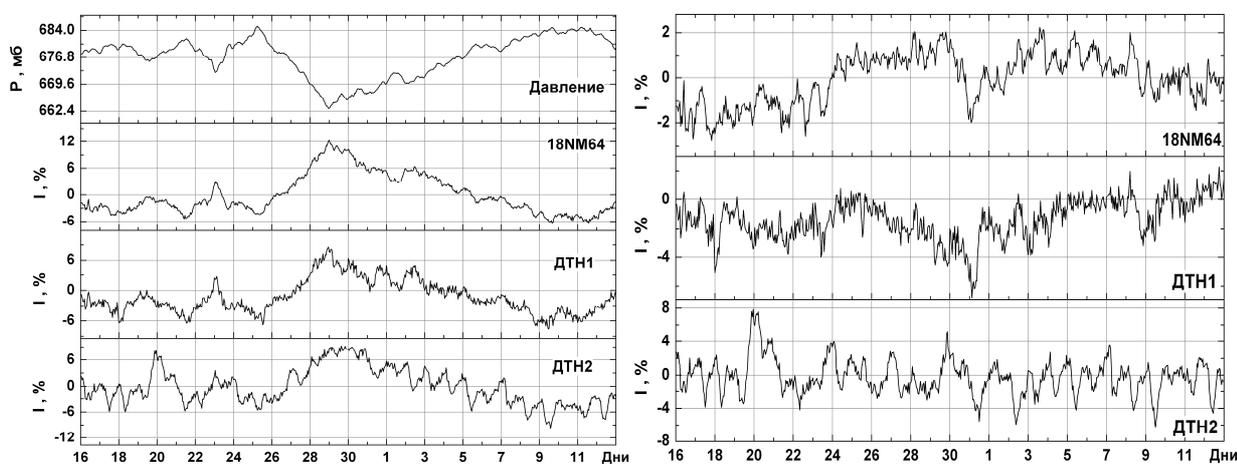


Рис.1 Часовые значения атмосферного давления, нейтронного монитора 18NM64, внутреннего детектора тепловых нейтронов DTN1, наружного детектора тепловых нейтронов DTN2 за период с 16 марта по 13 апреля 2015г. Интенсивность нейтронов не исправлена на изменения давления на панели слева и исправлена на панели справа.

Явно видно, что вариации интенсивности подобны на всех графиках, соответствующих детекторам 18NM64, DTN2 и DTN1 независимо от энергии регистрируемых нейтронов. Одинаковым образом все детекторы реагируют на изменение атмосферного давления; рост давления приводит к уменьшению скорости счета как высокоэнергичных нейтронов, так и тепловых нейтронов внутри и снаружи здания. Уменьшение давления приводит к обратному эффекту в интенсивности нейтронов. Нами были рассчитаны коэффициенты корреляции между рядами данных детекторов тепловых нейтронов и нейтронного супермонитора. Для детекторов внутри здания коэффициент корреляции $K = 0.97$ и $K = 0.84$ для наружного модуля DTN2 и нейтронного монитора.

Высокие коэффициенты корреляции и подобие отклика на изменение атмосферного давления дают основания сделать заключение об атмосферном происхождении регистрируемых нейтронов и использовать известную формулу коррекции данных нейтронного монитора на давление также и для данных детекторов тепловых нейтронов.

Вариации межпланетного происхождения

Известно, что выброс солнечной плазмы с вмороженным магнитным полем образует ударную волну в межпланетном пространстве, которая действует как гигантский поршень «выметая» галактические космические лучи. Наземные нейтронные мониторы регистрируют в это время понижение интенсивности космических лучей, форбуш-эффект. На рисунке 2 представлены значения скорости солнечного ветра, межпланетного магнитного поля, нейтронного монитора 18NM64, детектора тепловых нейтронов DTN2, детектора тепловых нейтронов DTN1 в декабре 2006 г. (левая

панель) и феврале 2011 г. (правая панель). Значения интенсивности высокоэнергичных нейтронов (18NM64) и тепловых (DTN1, DTN2) откорректированы на изменения атмосферного давления.

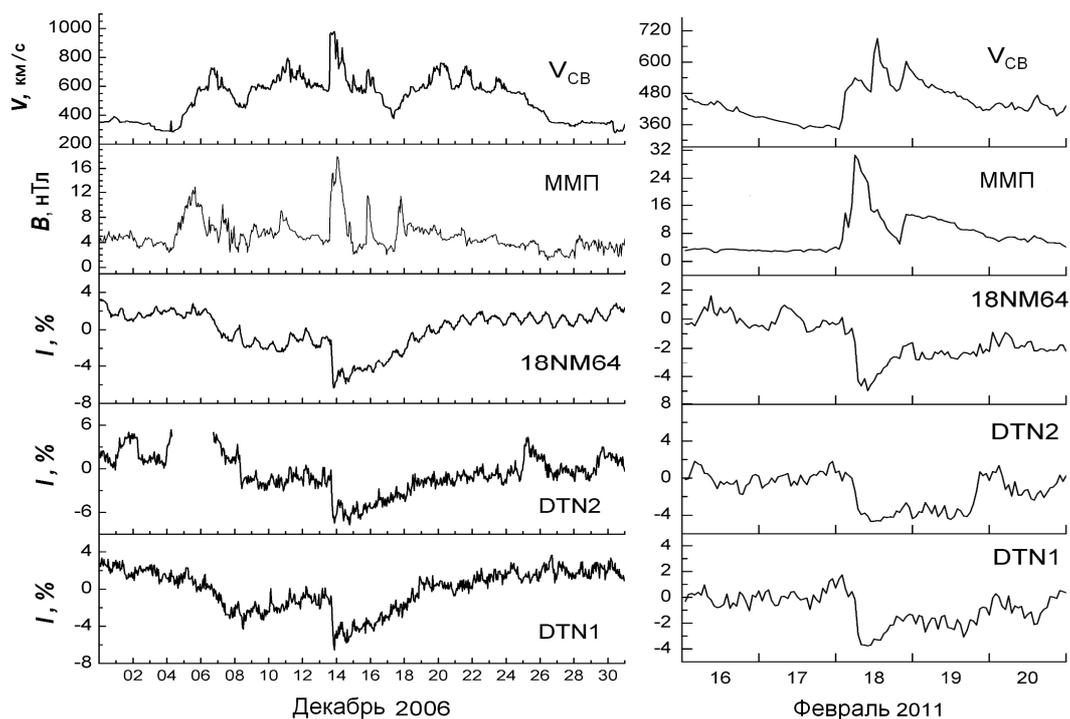


Рис.2. Часовые значения скорости солнечного ветра, межпланетного магнитного поля, нейтронного монитора 18NM64, детекторов тепловых нейтронов DTN2 и DTN1

Вспышка 5 декабря 2006 г. класса X9.0/2N произошла на восточном лимбе в 10:35 UT. Она сопровождалась выбросом корональных масс (ВКМ) и возмущением межпланетного магнитного поля. Понижение интенсивности нейтронной компоненты на высокогорной Алма-Атинской станции начинается 7-го декабря. Максимальная величина понижения $\sim 3\%$. Понижение интенсивности нейтронной компоненты наблюдается во всех детекторах, регистрирующих нейтроны разных энергий. Во время вспышки 13 декабря в 02:40 UT с координатами S06W24 класса X3.4/4b все высокоширотные нейтронные мониторы зафиксировали возрастание интенсивности. На Тянь-Шаньской станции из-за высокого значения жесткости геомагнитного обрезания возрастание не превысило уровня шумов. Вспышка произошла на западной части солнечного диска и также сопровождалась выбросом корональных масс типа «полного гало». Ударная волна достигла окрестности Земли 14 декабря. Космическими аппаратами зарегистрированы в это время высокие значения скорости солнечного ветра, ~ 1000 км/с, рис. 2 (верхний на левой панели), а также значительное увеличение (скачком) значений межпланетного магнитного поля. На рисунке наблюдается одинаковый отклик и на это возмущение в межпланетном пространстве во всех представленных детекторах резким падением интенсивности $\sim 6\%$. Медленное восстановление интенсивности происходит также синхронно во всех детекторах. Характер отклика интенсивности нейтронов на возмущение в межпланетном пространстве в феврале 2011 г., правая панель рис.2, идентичен рассмотренным.

Рассчитаны коэффициенты корреляции между рядами данных детекторов тепловых нейтронов и нейтронного супермонитора за периоды, включающие события ВКМ. Коэффициент корреляции $K = 0.98$ для детекторов внутри здания и $K = 0.89$ для наружного модуля DTN2. Столь высокие значения коэффициента корреляции говорят о том, что источники модуляции интенсивности тепловых нейтронов и интенсивности, регистрируемой нейтронным супермонитором, в этот период одни. Полученный результат подтверждает наше заключение, что тепловые нейтроны, регистрируемые детекторами DTN1 и DTN2, генерированы главным образом в атмосфере галактическим космическими лучами, а не в земной коре. Однако обратим внимание на всплеск интенсивности 25 декабря во внешнем детекторе на рисунке 2, который мы рассмотрим подробнее в следующем разделе.

Анализ результатов измерений во время сейсмической активности

Двадцать пятого декабря 2006 г. в 20:01 по Гринвичу (UT) произошло землетрясение в 146 км на юго-запад от Алматы. По данным Казахстанского Национального Центра сейсмических данных (KNDC) магнитуда землетрясения 5.95, энергетический класс $K=14.2$. В Алматы землетрясение ощущалось с интенсивностью 4-5 баллов. На рис. 3 пунктирной линией на графиках отмечено время землетрясения.

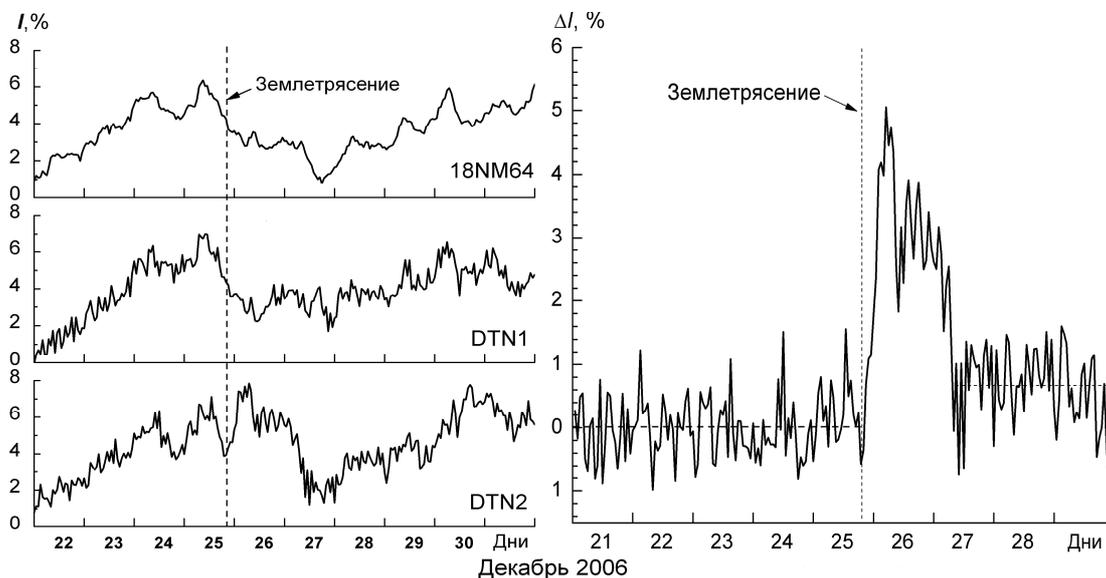


Рис.3. Интенсивность высокоэнергичных (18NM64) и тепловых нейтронов без коррекции на атмосферное давление до и после землетрясения в декабре 2006 г. (слева), выделенный поток тепловых нейтронов литосферного происхождения (справа)

На всех детекторах до момента землетрясения вариации интенсивности независимо от энергии нейтронов совершенно аналогичны, левая панель рис.3, что подтверждается очень высокими коэффициентами корреляции. Для, DTN1 – 18NM64 он равен **0.98**, а для DTN2 - 18NM64 – **0.97**. В данных гейтронного монитора 25 декабря наблюдается спад интенсивности, обусловленный подъемом атмосферного давления, который продолжается до 27 декабря. Межпланетное поле в этот период совершенно спокойно, а скорость солнечного ветра низкая. На нижнем графике, где представлены данные наружного детектора тепловых нейтронов, совершенно иная ситуация; точно в момент землетрясения начинается подъем интенсивности на 5-6%. После землетрясения нарушается корреляция данных внешнего детектора с нейтронным монитором, $K = 0.57$. Следует отметить, что коэффициент корреляции внутреннего детектора DTN1 с нейтронным монитором стал также несколько ниже, $K = 0.74$, чем до землетрясения.

Точное совпадение времени землетрясения с увеличением потока тепловых нейтронов на внешнем детекторе, нарушение корреляции с данными нейтронного монитора, увеличение в фазе с атмосферным давлением при отсутствии возмущений межпланетной среды говорят о принципиальном различии источника дополнительного потока нейтронов в детекторе DTN2 во время землетрясения с источниками вариаций, рассмотренных выше. Нами предполагается, что источником дополнительного потока тепловых нейтронов является земная кора. Предполагается, что землетрясение 25 декабря 2006 г. вызвало значительный выход радона за счет деформаций разломов в земной коре или образование микротрещин. И то и другое приведет к генерации дополнительного потока тепловых нейтронов от земной коры.

Выделение потока тепловых нейтронов литосферного происхождения от вариаций нейтронов, образованных в атмосфере. Учитывая, что вероятность регистрации нейтронным монитором тепловых нейтронов крайне мала, меньше 0.01, а вариации атмосферного и межпланетного происхождения аналогичны во всех детекторах, вычтем из данных детектора тепловых нейтронов DTN2 данные нейтронного монитора. Таким образом мы исключаем общие вариации. На рис.3 справа представлен результат этой операции с данными без их коррекции на атмосферное давление. Отметим, что нет разницы в том, используем мы данные, исправленные на давление или без коррекции потому, что процедура вычитания исключает вариации атмосферного происхождения. На рис. 3 справа в интенсивности отсутствуют низкочастотные тренды, суточные вариации нейтронов, которые видны на рисунке рядом в этот период. Однако очевидно возрастание

более чем на 5% потока тепловых нейтронов в первые часы после землетрясения. Дополнительный поток нейтронов поступал в течение ~1.5 суток. На способ выделения тепловых нейтронов литосферного происхождения получен инновационный патент.

Рассмотренное событие не уникально. За период работы детекторов тепловых нейтронов, 2006 – 2015 гг., на основе наблюдений Казахстанского Национального Центра сейсмических данных (сайт:www.kndc.kz), были выбраны 24 события с землетрясениями в окрестности Алматы интенсивностью $\geq 3б$. Рассмотрены изменения интенсивности потока тепловых и быстрых нейтронов в периоды активизации сейсмических процессов для выбранных событий. Отмечается увеличение потока тепловых нейтронов для более 60% событий.

На рис. 4 представлены вариации потока тепловых нейтронов и высокоэнергичных для периода активизации сейсмической активности 1-2 ноября 2008 г. (левая панель) и серии землетрясений 1-2 мая 2011 г. (правая панель). В обоих событиях наблюдается увеличение потока тепловых нейтронов по сравнению с интенсивностью высокоэнергичных нейтронов, регистрируемых нейтронным монитором. В мае 2011 г. вариации тепловых нейтронов отличные от высокоэнергичных начинаются за 2 суток до серии землетрясений, а в ноябре 2008г. - сразу после первого толчка. Событий с увеличением потока тепловых нейтронов накануне землетрясений гораздо меньше 50%.

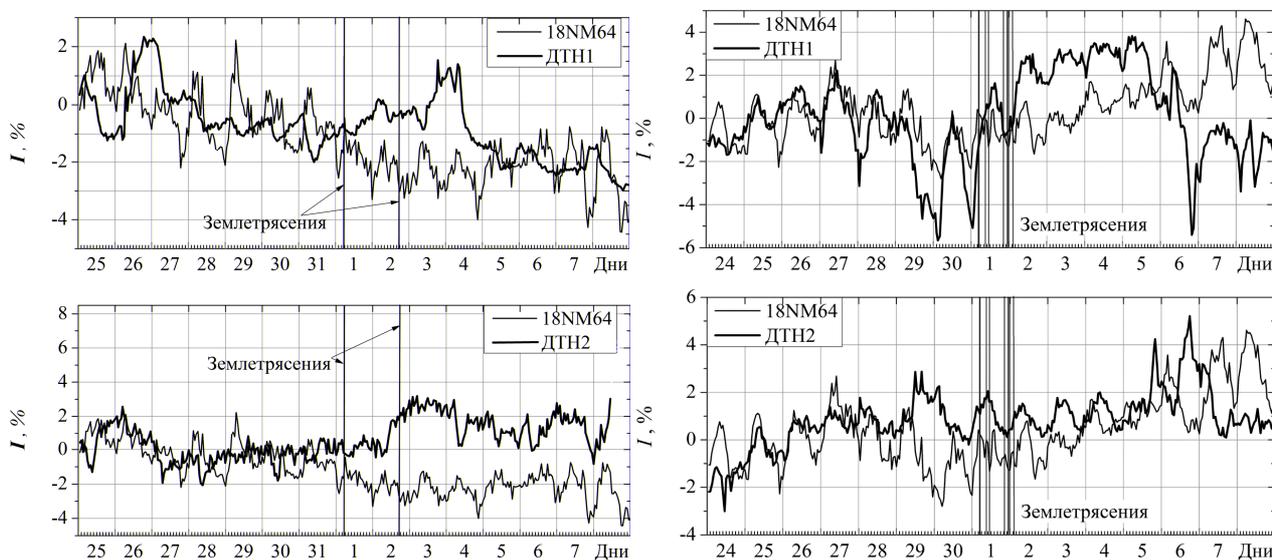


Рис.4. Интенсивность высокоэнергичных (18NM64) и тепловых нейтронов во время сейсмической активности 1-2 ноября 2008 г. (слева), 1-2 мая 2011 г. Вертикальные линии соответствуют моментам землетрясений.

Заключение

Таким образом установлено, что в отсутствие сейсмической активности вариации тепловых нейтронов на поверхности земли имеют ту же природу, что и высокоэнергичные, регистрируемые нейтронным супермонитором. Подтвержден вывод о возможности регистрации тепловых нейтронов литосферного происхождения во время активизации сейсмических процессов. Величина потока нейтронов литосферного происхождения на высокогорной Тянь-Шаньской станции не превышает 5-7% от фона. Предложен способ выделения потока тепловых нейтронов от земной коры с использованием одновременной регистрации высокоэнергичных нейтронов. Использование способа в целях поиска краткосрочных предвестников землетрясений нуждается в дальнейшем развитии.

Список литературы

1. Дорман Л.И. Вариации галактических космических лучей. //М.: Изд-во МГУ, 1975.
2. Володичев Н.Н., Кужевский Б.М., Нечаев О.Ю., Панасюк М.И., Шаврин П.И. Явление возникновения всплесков интенсивности нейтронов во время фаз новолуний и полнолуний // Космические исследования. 1977. Т.35. №2. С. 144-154..
3. Антонова В.П., Володичев Н.Н., Крюков С.В., Чубенко А.П., Щепетов А.Л. Отклик солнечных затмений в вариациях потока нейтронов на Земле //Известия РАН, Сер. Физическая. 2007. № 7. С. 1082-1085.
4. Volodichev N.N., Zakharov V.A., Kuzhevskij B.M., Nechaev O.Yu., Podorolski A.N., Chubenko A.P., Shepetov A.L. and V.P. Antonova. The flows of neutrons of space radiation and from terrestrial crust. // Proc. of 27th ICRC. 2001. Germany. Hamburg. С. 4204-4207.