

УДК 53.082

## НАЗЕМНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ГОРОДЕ НУР-СУЛТАН

© 2020 г. Е. А. Тулеков<sup>1, \*\*\*</sup>, В. С. Махмутов<sup>2, \*\*</sup>, Г. А. Базилевская<sup>2</sup>, Ю. И. Стожков<sup>2</sup>,  
А. К. Морзабаев<sup>1</sup>, М. В. Филиппов<sup>2, \*</sup>, В. И. Ерхов<sup>2</sup>, А. С. Дюсембекова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,  
г. Нур-Султан, Республика Казахстан

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАИ), г. Москва, Россия

\*e-mail: mfilippov@frtk.ru

\*\*e-mail: mahmutovvs@lebedev.ru

\*\*\*e-mail: yerzhan\_ta@mail.ru

Поступила в редакцию 01.03.2020 г.

После доработки 07.04.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

Космические лучи, в частности, являются основным фактором ионизации атмосферы, влияют на образование облаков, определяют свойства глобальной электрической цепи. Механизмы атмосферных процессов с участием космических лучей очень сложны и далеки от понимания. Для их исследования необходимы экспериментальные установки, распределенные по всему миру. С этой целью в 2015 г. в Евразийском национальном университете им. Л.Н. Гумилева, в содружестве с Физическим институтом им. П.Н. Лебедева РАН, был создан космофизический комплекс, состоящий из установки CARPET, нейтронного детектора и электростатического флюксметра EFM-100. В данной статье представлены краткие характеристики установки CARPET и экспериментальные данные, полученные в период 2016–2019 гг. Приведены отдельные результаты анализа характеристик вариаций потоков космических лучей, зарегистрированных на этом комплексе, и сопутствующих условий в земной магнитосфере и в межпланетной среде.

DOI: 10.31857/S0016794020060139

### 1. ВВЕДЕНИЕ

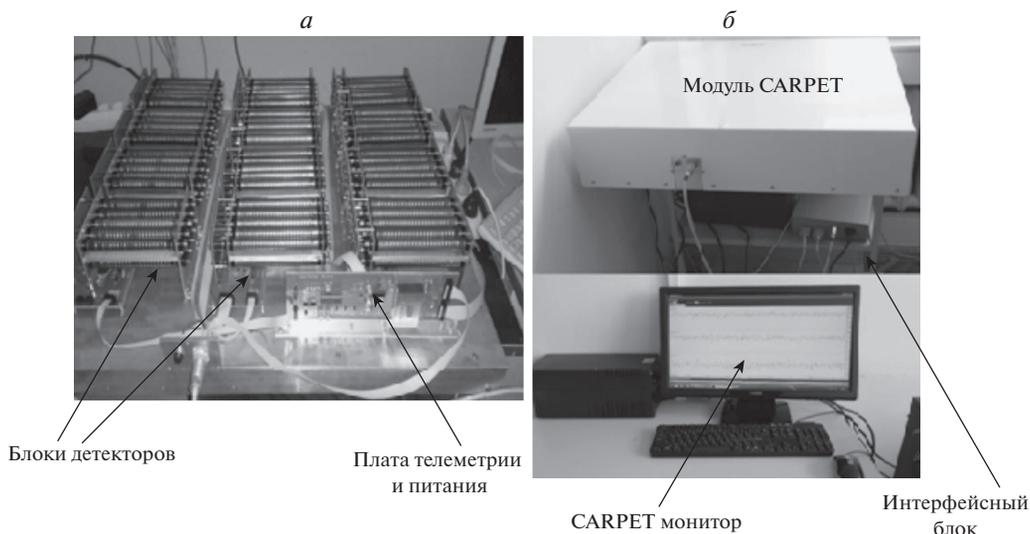
Исследование физической природы модуляции потоков космических лучей в околоземном пространстве и гелиосфере является фундаментальной задачей современной науки. Следует отметить также, что космические лучи определяют свойства глобальной электрической цепи, играют существенную роль в атмосферных процессах, связанных с погодой и климатом. Поэтому изучение физической природы вариаций потоков вторичных космических лучей на разных временных масштабах (суточных, 27-дневных, сезонных, годовых и т.д.) является крайне актуальным. Применение экспериментальных комплексов является необходимым условием для проведения таких исследований. Наземная установка CARPET запущена в конце 2015 г. на Физико-техническом факультете Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева в городе Нур-Султан, Республика Казахстан (51°10'48" N, 71°26'45" E, высота 358 м, жесткость геомагнитного обрезания  $R_c \sim 2.9$  ГэВ) [Morzabaev et al., 2018, Philippov et al., 2020]. Она предназначена для непрерывного

мониторинга потока вторичных космических лучей (КЛ) на уровне Земли.

Основу установки CARPET (рис. 1) составляют газоразрядные цилиндрические счетчики Гейгера типа СТС-6, которые объединены в 12 детектирующих блоков. Каждый блок содержит 10 счетчиков, в котором между 5 верхними и 5 нижними счетчиками расположен алюминиевый поглотитель (фильтр) толщиной 7 мм [Mizin et al., 2011; Philippov et al., 2020]. Число частиц, прошедших через фильтр и зафиксированное одновременно верхними и нижними счетчиками, регистрируются в канале совпадений – TEL.

Верхний (UP) и нижний (LOW) каналы регистрируют электроны и позитроны с энергиями  $E > 200$  кэВ, протоны с  $E > 5$  МэВ, мюоны с  $E > 1.5$  МэВ и фотоны  $E > 20$  кэВ (эффективность счета фотонов менее 1%). Канал совпадений записывает более энергичные частицы: электроны с энергией  $E > 5$  МэВ, протоны с  $E > 30$  МэВ и мюоны с  $E > 15.5$  МэВ.

Помимо детектирующих блоков, в состав установки CARPET входит плата питания и телемет-



**Рис. 1.** Общий вид установки CARPET: (а) – внутренняя компоновка составляющих установки; (б) – внешний вид установки с кожухом, интерфейсный блок, компьютер с запущенным программным обеспечением “CARPET монитор”.

рии и интерфейсный блок. Плата питания и телеметрии служит для обеспечения необходимых для работы установки напряжений (5 В, 12 В, 380 В), их контроля, а также для сбора метеорологической информации (телеметрия): об атмосферном давлении и температуре. Интерфейсный блок служит для передачи данных и телеметрии на компьютер. С помощью программного обеспечения “CARPET монитор” на компьютере производится визуализация в реальном времени текущих данных, а также запись суточных файлов с временным разрешением 1 мс.

## 2. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

### 2.1. Определение барометрической поправки

Наземные установки для исследования КЛ являются детекторами вторичных частиц, образующихся в атмосфере при взаимодействии первичных КЛ с веществом. Следовательно, при анализе экспериментальных данных необходимо учитывать вариации атмосферного давления и температуры, влияющие на показания приборов [Дорман и Фейнберг, 1956]. В данной работе приводятся результаты определения барометрической поправки для установки CARPET. Влияние температурного эффекта будет обсуждаться в будущих работах авторского коллектива.

Методология расчета барометрической поправки для детектора CARPET описана в работах [DeMendonca et al., 2011; Maghrabi et al., 2020; Philippov et al., 2020]. Барометрический коэффициент определяется методом регрессионного ана-

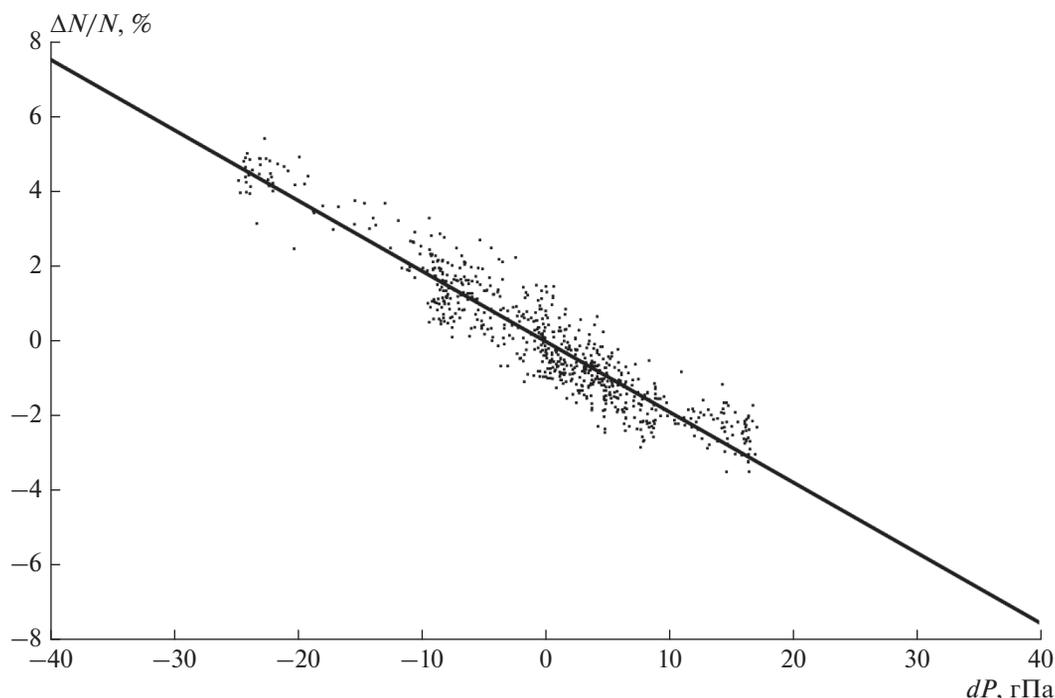
лиза с использованием часовых данных темпа счета установки CARPET и среднечасовых данных по атмосферному давлению.

На сегодняшний день (с 2017 г.) на территории ЕНУ функционируют два модуля (комплекта аппаратуры) CARPET. На рисунке 2 приведен график зависимости относительного отклонения темпа счета в канале TEL первого модуля установки от изменения давления по данным за декабрь 2019 г., так как этом месяце не наблюдались активные процессы на Солнце и в межпланетной среде, а также отсутствовали сильные перепады приземной температуры.

Наклон данной аппроксимирующей прямой является искомым барометрическим коэффициентом. Для канала TEL:  $\beta_1 = -0.1870 \pm 0.0025\%/гПа$ ;  $R^2 = 0.8826$  для первого модуля и  $\beta_2 = -0.1826 \pm 0.0025\%/гПа$ ;  $R^2 = 0.8702$  для второго модуля. Для канала UP:  $\beta_1 = -0.0658 \pm 0.0026\%/гПа$ ;  $R^2 = 0.4653$  для первого модуля и  $\beta_2 = -0.0618 \pm 0.0017\%/гПа$ ;  $R^2 = 0.6280$  для второго модуля. Для канала LOW:  $\beta_1 = -0.0652 \pm 0.0022\%/гПа$ ;  $R^2 = 0.5490$  для первого модуля и  $\beta_2 = -0.0600 \pm 0.0015\%/гПа$ ;  $R^2 = 0.6636$  для второго модуля. Эти коэффициенты использовались далее для поправки исходных экспериментальных данных.

### 2.2. Вариации космических лучей в период с 2016 по 2019 гг.

На рисунке 3 представлены данные по темпу счета заряженных частиц, зарегистрированных двумя модулями (CARPET1 и CARPET2) назем-



**Рис. 2.** График зависимости относительного отклонения темпа счета от изменения давления для модуля CARPET1 по данным за декабрь 2019 г.

ной установки в сентябре 2017 г. Вариации космических лучей, наблюдавшиеся с 6 сентября 2017 г., были вызваны повышенной солнечной активностью и появлением активной области AR 12673 на солнечном диске, в которой произошел ряд солнечных вспышек (включая вспышки 6 и 10 сентября класса X9.3 и X8.2 соответственно) [Makhmutov et al., 2019]. Анализ форбуш-понижения космических лучей, зарегистрированного в этот период на двух модулях установки CARPET, приведен в следующем разделе.

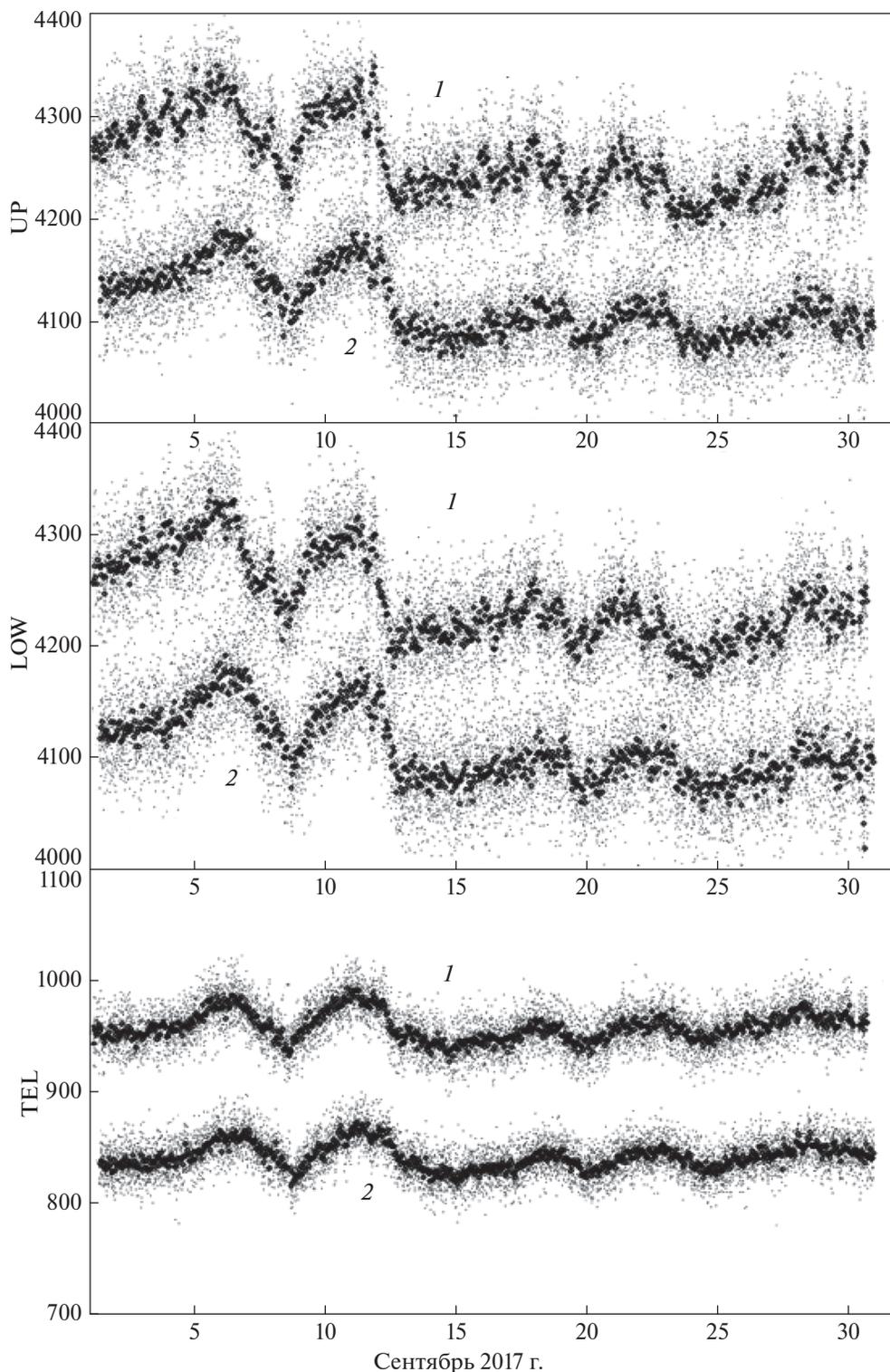
Для исследования временных вариаций потоков космических лучей, зарегистрированных на установке CARPET за весь период наблюдений 2016–2019 гг., был использован вейвлет-анализ [Vendjoia et al., 1993]. На рисунке 4 (верхняя панель) представлена временная динамика скорости счета в канале TEL первого модуля CARPET. В первичные данные введены барометрические поправки. Среднечасовые значения минутного темпа счета показаны точками, сплошной кривой показаны среднесуточные значения. На нижней панели изображены скейлограммы (*scalograms*) вейвлет-преобразования временного ряда среднесуточных данных верхней панели. Сбоку (справа) приведена вертикальная шкала мощности (амплитуды) вариаций: наибольшая амплитуда соответствует черным участкам шкалы и скейлограммы. Горизонтальная белая линия соответ-

ствует периодичности 27 сут. В целом, для всего представленного ряда данных измерений на установке CARPET характерно наличие годовой волны (не показана на скейлограмме) и ~26–29-дневных вариаций.

### 2.3. Форбуш-понижения потоков космических лучей в июле и сентябре 2017 г.

В данном разделе обсуждаются результаты измерений потоков КЛ модулями CARPET1 и CARPET2 детектора в июле и сентябре 2017 г., когда ряд форбуш-понижений интенсивности КЛ был зарегистрирован мировой сетью наземных нейтронных мониторов.

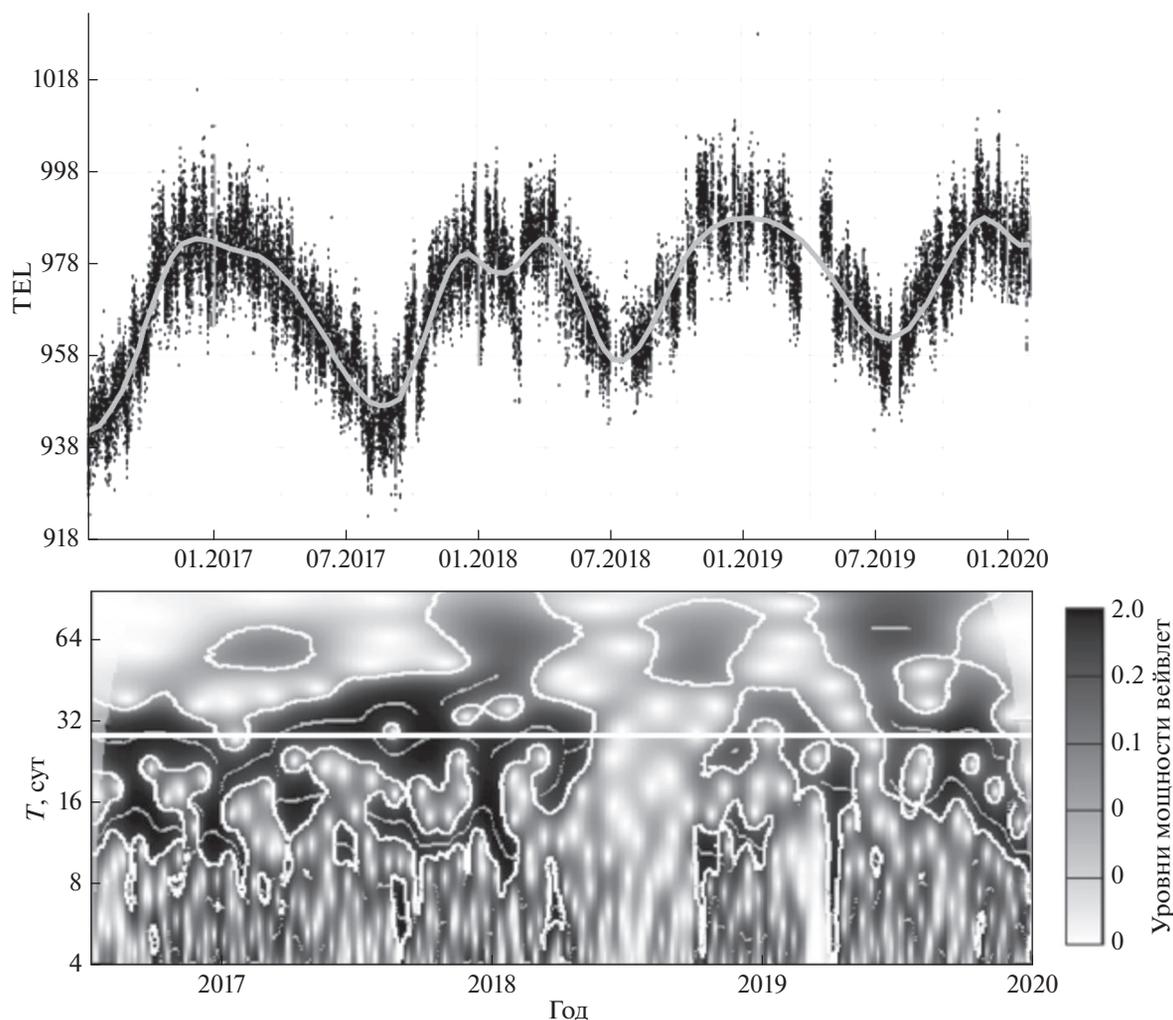
В активной области на Солнце NOAA 2665 (S06 W29) с 14 по 16 июля 2017 г. произошла серия солнечных вспышек, самой мощной из которых была вспышка рентгеновского балла M2.4 14 июля в ~02:15 UTC. По данным измерений на спутнике GOES-13 приход потоков малоэнергичных солнечных протонов (<100 МэВ) зарегистрирован 14 июля в ~03:00 UTC. Эта вспышка вызвала появление межпланетной ударной волны, скорость которой 16 июля составила 625 км/с. Ударная волна вызвала геомагнитное возмущение, начавшееся в ~06–09 UTC 16 июля и продолжившееся до 17 июля.



**Рис. 3.** Вариации темпа счета для модулей CARPET1 и CARPET2 по данным за сентябрь 2017 г.: верхняя панель – данные канала UP; средняя панель – данные канала LOW; нижняя панель – данные канала TEL. Точки соответствуют данным за минуту (без поправки на давление).

Начало понижения потоков КЛ, зарегистрированное двумя модулями установки CARPET, приходится на первую половину 16 июля (рис. 5,

верхняя панель слева), что согласуется с данными измерений на наземных нейтронных мониторах Апатиты ( $R_c = 0.65$  ГВ), Юнгфрау (*Jungfraujoch*



**Рис. 4.** Верхняя панель: временная динамика темпа счета модуля CARPET1 за период с 2016 по 2019 гг. Представлены исправленные на давление данные темпа счета в канале TEL за 1 мин с усреднением за 1 ч, сплошная кривая – данные с усреднением за сутки. Нижняя панель: скейлограммы (*scalograms*) вейвлет-преобразования временного ряда данных, представленного на верхней панели. Горизонтальная белая линия соответствует периодичности 27 сут.

IGY;  $R_c = 4.49$  ГВ) и Алматы ( $R_c = 6.69$  ГВ), приведенными на нижней панели рис. 5 (слева).

Форбуш-понижение потоков космических лучей также наблюдалось в сентябре 2017 г. (рис. 5, справа). Оно было вызвано высокой солнечной вспышечной активностью в области NOAA 12673 (S11 W16) с 4 сентября по 10 сентября. Солнечные вспышки сопровождалась потоками высокоскоростного солнечного ветра и увеличенного межпланетного магнитного поля на орбите Земли. Геомагнитное возмущение в земной магнитосфере наблюдалось с конца 7 сентября по 8 сентября, при этом в течение длительного времени значение планетарного  $kp$ -индекса находилось на уровне 8–9, а величина  $Dst$ -индекса уменьшалась до  $-142$  нТл.

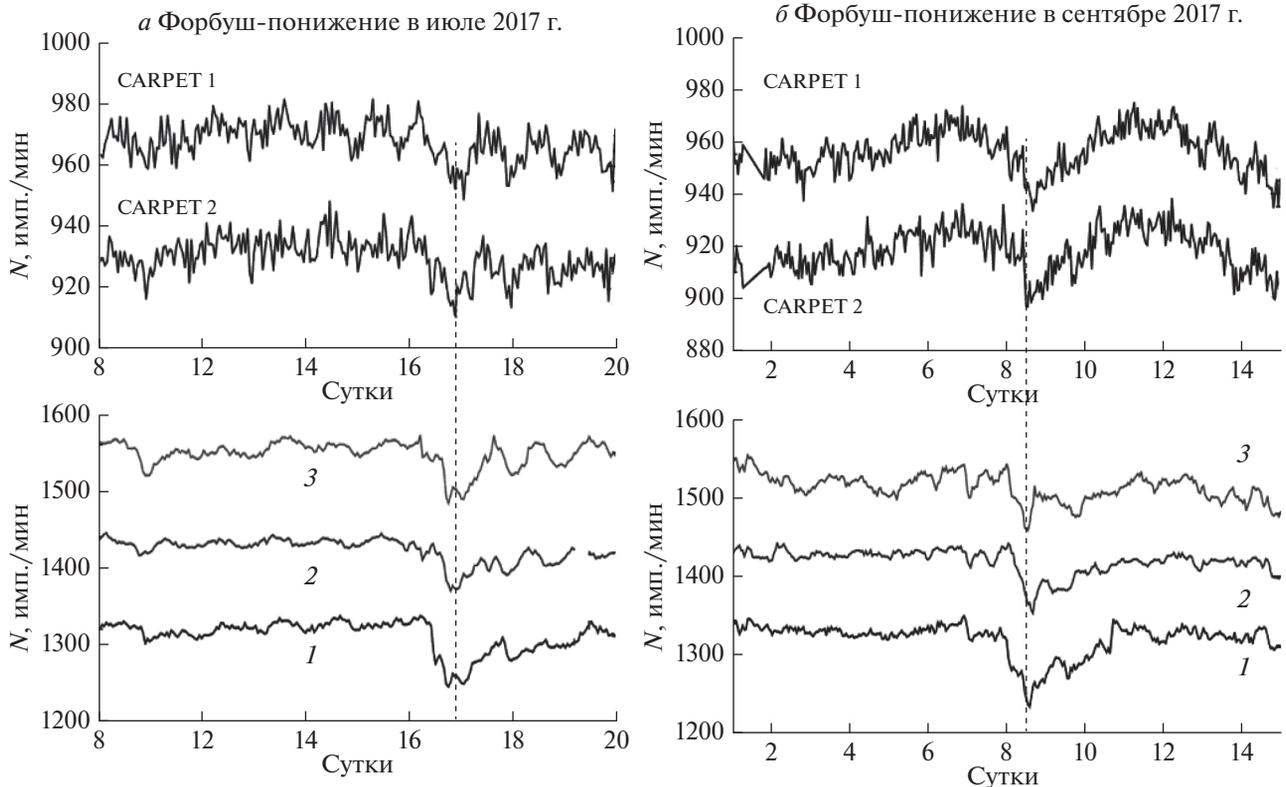
По измерениям на установке CARPET и по данным сети наземных нейтронных мониторов

заметное понижение потоков КЛ началось в первой половине 8 сентября 2017 г. На рисунке 5 (справа) приведены данные измерений на двух модулях установки CARPET (верхняя панель) и нейтронных мониторах Апатиты, Юнгфрау и Алматы.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлено краткое описание и технические характеристики наземной установки для детектирования заряженной компоненты космических лучей CARPET, которая была разработана на Долгопрудненской научной станции ФИАН и установлена в Евразийском национальном университете им. Л.Н. Гумилева в конце 2015 г.

Приведены результаты определения барометрического коэффициента для данной установки, представлен исходный ряд данных с 2016 по 2019 гг., для которого с помощью вейвлет-анализа



**Рис. 5.** Верхние графики: темп счета в канале TEL для модулей CARPET1 и CARPET2 для форбуш-понижений потоков КЛ: (а) – в июле 2017 г.; (б) – в сентябре 2017 г. Нижние графики представляют темп счета на нейтронных мониторах: 1 – Апатиты, 2 – Алматы и 3 – Юнгфрау (*Jungfrauoch IGY*).

за предварительно определен характерный период вариаций (27 дней).

Проанализированы первые случаи наблюдений форбуш-понижений потоков космических лучей, произошедших в июле и сентябре 2017 г.

#### 4. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают свою признательность коллективу NMDB ([www01.nmdb.eu](http://www01.nmdb.eu)) за предоставление данных наземной сети нейтронных мониторов и NOAA (<https://www.ngdc.noaa.gov/ngdc.html>) за публикацию результатов наблюдений солнечной и геомагнитной активности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Дорман Л.И., Фейнберг Е.Л. Вариации космических лучей // УФН. Т. 59. № 2. С. 189–228. 1956.  
 – Bendjoya Ph., Petit J.-M., Spahn F. Wavelet analysis of the Voyager data on planetary Rings. I. Description of the method // *Icarus*. V. 105. № 2. P. 385–399. 1993. <https://doi.org/10.1006/icar.1993.11351993>  
 – De Mendonca R.R.S., Raulin J.-P., Bertoni F.C.P., Echer E., Makhmutov V.S., Fernandez G. Long-term and transient time variation of cosmic ray fluxes detected in Argentina by CARPET cosmic ray detector // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*

V. 73. № 11–12. P. 1410–1416. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.09.034>

– Maghrabi A., Makhmutov V.S., Almutairi M., Aldosari A., Altilasi M., Philippov M.V., Kalinin E.V. Cosmic ray observations by CARPET detector installed in central Saudi Arabia – preliminary results // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 200. 105194. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.1051942020>

– Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Stozhkov Y.I., Philippov M.V., Kalinin E.V. Solar activity and cosmic ray variations in September 2017 // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* V. 83. P. 543–546. 2019. <https://doi.org/10.3103/S1062873819050228>

– Mizin S.V., Makhmutov V.S., Maksumov O.S., Kvashnin A.N. Application of multithreading programming to physical experiment // *Kratk. Soobshch. Fiz.* V. 38. № 2. P. 9–17. 2011. <https://doi.org/10.3103/S1068335611020023>

– Morzabaev A.K., Giniyatova Sh.G., Shakhanova G.A., Makhmutov V.S. Evaluation of CARPET hardware and software potentialities // *Bull. Univ. Karaganda. Phys.* V. 2. № 90. P. 81–87. 2018.

– Philippov M.V., Makhmutov V.S., Stozhkov Yu.I., Maksumov O.S., Bazilevskaya G.A., Morzabaev A.K., Tulekov Ye.A. Characteristics of the ground-based “CARPET-ASTANA” instrument for detecting charged component of cosmic rays and preliminary analysis of the first experimental data // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A.* V. 959. 163567. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.163567>