

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

Филиппов Максим Валентинович

**НАЗЕМНЫЙ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАЦИЙ НИЗКОЭНЕРГИЧНОЙ
КОМПОНЕНТЫ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
Махмутов Владимир Салимгереевич

Москва – 2021

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Литературный обзор	15
1.1 Происхождение и состав первичных космических лучей.....	15
1.2 Ядерно-каскадные процессы в атмосфере.....	16
1.3 Регистрация заряженных частиц.....	17
1.3.1 Пропорциональные счётчики и счётчики Гейгера-Мюллера.....	17
1.3.2 Измерения потоков заряженных частиц в ФИАН.....	18
1.3.3 Мюонные телескопы и годоскопы.....	18
1.4 Регистрация нейтронов.....	19
1.4.1 Нейтронные мониторы.....	20
1.5 Регистрация γ -квантов.....	21
Выводы к главе 1.....	21
Глава 2. Экспериментальный комплекс CARPET	22
2.1 Принципы работы аппаратно-программного комплекса CARPET.....	22
2.2 Протокол обмена данными между интерфейсным блоком установки CARPET и компьютером.....	32
2.2.1 Формат сообщения данных.....	32
2.2.2 Формат сообщения телеметрии.....	32
2.2.3 Формат команд протокола выбора режима ALL-ONE.....	32
2.2.4 Программное обеспечение установки CARPET.....	34
2.3 Точность детектирования потоков КЛ установкой CARPET.....	37
2.4 Расчёт барометрического коэффициента для установок CARPET.....	39
2.5 Расчёт температурного коэффициента для установок CARPET.....	46
2.5.1 Метод эффективного уровня генерации.....	47
2.5.2 Интегральный метод.....	51
2.6 Корреляция с нейтронными мониторами.....	53
2.7 Оценка геометрического фактора установки CARPET.....	57
Выводы к главе 2.....	59
Глава 3. Экспериментальный комплекс «Нейтронный детектор»	61
3.1 Устройство аппаратно-программного комплекса НД.....	61
3.2 Протокол обмена данными между интерфейсным блоком установки НД и компьютером.....	68
3.2.1 Формат сообщения данных.....	68
3.2.2 Формат сообщения телеметрии.....	68
3.2.3 Программное обеспечение для визуализации и формирования файлов данных.....	69
3.3 Калибровка нейтронных счётчиков.....	72
3.4 Точность детектирования потоков КЛ установкой НД.....	73

3.5	Расчёт барометрического коэффициента установки НД	74
3.6	Исследование суточной волны темпа счёта нейтронной компоненты КЛ	77
3.7	Расчёт температурного коэффициента для установки НД	78
3.8	Фурье-анализ суточной волны	80
3.9	Корреляция с нейтронными мониторами	82
	Выводы к главе 3	83
Глава 4. Экспериментальный комплекс «Гамма-спектрометр»		85
4.1	Устройство аппаратно-программного комплекса «Гамма-спектрометр»	85
4.2	Калибровка «Гамма-спектрометра»	89
	Выводы к главе 4	94
Глава 5. Некоторые экспериментальные результаты		95
5.1	Форбуш-эффекты	95
5.1.1	События в июле и сентябре 2017 г.	96
5.1.2	События в мае 2019 г.	102
5.2	Вариации КЛ и приземного электрического поля в январе 2016 г. в CASLEO	105
	Выводы к главе 5	108
Заключение.....		109
Литература		112

Введение

Актуальность работы

Одним из важнейших направлений исследований в физике космических лучей (КЛ) является изучение вариаций потоков КЛ на разных временных масштабах (суточные, 27-дневные, сезонные, годовые и т.д.) и определение физической природы таких вариаций [1,2]. В последние десятилетия вызывают интерес исследования процессов, происходящих в земной атмосфере, которые сопровождаются вариациями потоков КЛ и электромагнитного излучения. Особый класс таких событий представляют световые вспышки и γ -всплески (TLE - и TGF-события), кратковременные возрастания потоков заряженных частиц, охватывающие высоты от приземной атмосферы до ионосферы [3–11]. Последние годы эти явления активно исследуются на наземных установках и с помощью аппаратуры, установленной на спутниках.

В данной работе описаны принципы работы новой наземной научной аппаратуры, для изучения вариаций потоков КЛ. При проектировании аппаратуры основополагающим принципом являлась модульность. Были разработаны 3 типа детекторов: детектор заряженной компоненты КЛ CARPET, детектор нейтронной компоненты КЛ «Нейтронный детектор» и «Гамма-спектрометр». В зависимости от поставленных задач, количество модулей каждой установки может изменяться.

Каждый модуль установок CARPET и «Нейтронный детектор» (НД) был оснащён дополнительным каналом передачи метеорологической (атмосферное давление и температура внутри корпуса прибора) и служебной информации (питающие напряжения), что позволяет проводить оценки барометрического и температурного эффектов, а также, исключать возможные аппаратурные эффекты, влияющие на качество ряда данных.

В 2015 – 2017 гг. была создана новая международная сеть установок. На сегодняшний день установки функционируют в непрерывном режиме в 4 научных центрах: ДНС ФИАН (Долгопрудненская научная станция; Московская область, Долгопрудный, N55.56°, E37.3°; жёсткость геомагнитного обрезания $R_c = 2,12$ ГВ), международный астрономический комплекс CASLEO (Complejo Astronomico el Leoncito; Аргентина, S31.47°, W69.17°, высота 2550 м над уровнем моря, жёсткость геомагнитного обрезания $R_c = 9,8$ ГВ), ЕНУ (Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева; Нур-Султан, Республика Казахстан, N51.10°, E71.26°; $R_c = 2,9$ ГВ) и Национальный научный центр KACST (King Abdulaziz City for Science and Technology; Саудовская Аравия, Эр-Рияд, N24.39°, E46.42°; $R_c = 14,4$ ГВ).

На территории ДНС ФИАН функционируют один модуль CARPET и два модуля НД. В CASLEO: 1 модуль CARPET, 3 модуля НД и 4 модуля «Гамма-спектрометра». В ЕНУ установлены 2 модуля CARPET и 1 модуль НД. В KACST функционируют 2 модуля CARPET.

В данной работе был проведён сравнительный анализ рекуррентных и спорадических (Форбуш-эффектов) вариаций КЛ для установок CARPET и нейтронных мониторов. Показано, что установки CARPET и НД чувствительны к вариациям первичных КЛ. Также в работе проведено исследование возможных корреляций между вариациями потоков КЛ и грозовой активностью.

Цели и задачи работы

Разработка и изготовление модульного наземного комплекса для регистрации заряженной компоненты, нейтронной компоненты и γ -излучения КЛ;

Проверка аппаратуры, разработка методов учёта метеорологических и аппаратурных эффектов в рядах данных;

Первичный анализ данных за 2015-2020 гг.

Научная новизна

Впервые разработана и создана научная аппаратура, ставшая основой для новой международной наземной сети установок для детектирования заряженной компоненты вторичных КЛ (электроны и позитроны с энергией $E > 200$ кэВ, протоны с $E > 5$ МэВ, мюоны с $E > 1,5$ МэВ), нейтронной компоненты, а также γ -излучения с $E > 20$ кэВ. Модули новых установок расположены в четырёх научных центрах северного и южного полушарий, в широком диапазоне жёсткости геомагнитного обрезания (R_c) от 2 до 14 ГВ.

Практическая и научная значимость

Научная значимость работы заключается в том, что данный аппаратно-программный комплекс предназначен для изучения физической природы периодических и спорадических вариаций вторичной компоненты КЛ. В том числе, появляется принципиальная возможность определения причин зарегистрированных изменений потоков КЛ и γ -квантов, сопровождающиеся вариациями атмосферного электрического поля, а также установить причинно-следственные связи между грозовой активностью в приземной атмосфере и световыми вспышками, γ -всплесками (т.н. TLE - и TGF-события), происходящими на высотах свыше 50-70 км.

Практическая значимость работы состоит в том, что данный аппаратно-программный комплект осуществляет оперативный контроль потоков заряженных частиц, γ -квантов и радиоактивности (естественной и искусственной) в приземном слое атмосферы. Всесторонний анализ полученных новых экспериментальных данных позволит разработать методы прогноза сильных геомагнитных возмущений и землетрясений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработана и введена в эксплуатацию новая международной сеть научных установок, которая в непрерывном режиме функционируют в четырёх научных центрах в разных частях мира: на Долгопрудненской научной станции (ДНС) ФИАН (Московская область, Долгопрудный, N55.56°, E37.3°; жёсткость геомагнитного обрезания $R_c = 2,12$ ГВ), в международном астрономическом комплексе CASLEO (Complejo Astronomico el Leoncito; Аргентина, S31.47°, W69.17°, высота 2550 м над уровнем моря, жёсткость геомагнитного обрезания $R_c = 9,8$ ГВ), в Евразийском национальном университете имени Л.Н. Гумилева (ЕНУ); Нур-Султан, Республика Казахстан, N51.10°, E71.26°; $R_c = 2,9$ ГВ) и в Национальном научном центре KACST (King Abdulaziz City for Science and Technology; Саудовская Аравия, Эр-Рияд, N24.39°, E46.42°; $R_c = 14,4$ ГВ).

Для измерения потоков вторичных КЛ и γ -квантов в этих научных центрах разработаны три типа приборов:

- Установка «CARPET», чувствительная к заряженной компоненте КЛ;
 - Установка «Нейтронный детектор» (НД), чувствительная к нейтронной компоненте КЛ;
 - Установка «Гамма-спектрометр», чувствительная к γ -излучению.
2. Вывод о наличии корреляции измерений установок CARPET-МОСКВА и НД МОСКВА с данными московского нейтронного монитора. Для установки CARPET-МОСКВА коэффициент корреляции $R \approx 0,4$, для модулей установки НД МОСКВА $R \approx 0,4-0,5$;
 3. Результаты проведённого сравнительного анализа данных установок CARPET и НД с Каталогом Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (ИЗМИРАН), свидетельствующие о том, что установки CARPET надёжно детектируют Форбуш-эффекты (ФЭ) с параметром «MagnM» $\geq 0,7$. Установки НД надёжно детектируют ФЭ с параметром «MagnM» $\geq 1,2$;

4. На примере анализа ряда ФЭ показана чувствительность установок к вариациям межпланетной и магнитосферной активности;
5. Результаты разработанной методики калибровки «Гамма-спектрометра» с использованием естественных фоновых источников γ -излучения и полученные калибровочные характеристики.

Достоверность

Достоверность полученных экспериментальных результатов подтверждается корреляцией данных, полученных на независимых однотипных модулях установки. Достоверность данных установок CARPET и НД, в целом, подтверждена корреляцией с результатами долговременных измерений на нейтронных мониторах ($R \approx 0,4$, для модулей НД, $R \approx 0,4-0,5$ для модулей CARPET), а, также, корреляцией данных установок CARPET и НД с данными Каталога Форбуш-эффектов.

Апробация работы

Материалы диссертации многократно докладывались и обсуждались на семинарах Лаборатории физики Солнца и космических лучей им. акад. С. Н. Вернова (г. Долгопрудный).

По материалам работы представлены доклады на 14 научных конференциях:

- 33-я Всероссийская конференция по космическим лучам (Россия, Дубна; 11 – 15 августа 2014);
- 40th COSPAR Scientific Assembly (Russia, Moscow; 2 – 10 August 2014);
- 24th European Cosmic Ray Symposium (Germany, Kiel, 1 – 5 September 2014);
- 34th International Cosmic Ray Conference (Netherlands, The Hague; 30 July – 6 August 2015);
- 34-я Всероссийская конференция по космическим лучам (Россия, Дубна; 15 – 19 августа 2016);
- 25th European Cosmic Ray Symposium (Italy, Turino, 4-9 September 2016);
- 12-я ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Россия, Москва; 6 – 10 февраля 2017);
- 26th Extended European Cosmic Ray Symposium / 35th Russian Cosmic Ray Conference (Russia, Barnaul/Belokurikha; 6 – 10 July 2018);
- EGU General Assembly 2019 (Austria, Vienna; 7-12 April 2019);
- 36th International Cosmic Ray Conference (U.S.A., Madison, WI; 24 July – 1 August 2019);
- 62-я научная конференция МФТИ (Россия, Москва – Долгопрудный – Жуковский, 18-23

- ноября 2019);
- 15-я ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Россия, Москва; 10 – 14 февраля 2020);
 - 36-я Всероссийская конференция по космическим лучам (Дистанционная; 28 сентября – 2 октября 2020);
 - 16-я ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (Россия, Москва; 8 – 12 февраля 2021).

Публикации

Всего по теме диссертации опубликованы 30 работ [А1-А11; Б1-Б15; В1-В4], включая 15 тезисов докладов конференций [Б1-Б15]. Основные результаты диссертации [А1-А11] опубликованы в изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus и удовлетворяющих требованиям Высшей аттестационной комиссии (ВАК):

- А1. В. С. Махмутов, Г. А. Базилевская, Ю. И. Стожков, Ж.-П. Ролан, М. В. Филиппов. Анализ возрастных космических лучей, зарегистрированных в октябре – ноябре 2013 г. Изв. РАН, сер. физ., 2015, том 79, № 5, с. 626–628. DOI: 10.7868/S0367676515050312
[V. S. Makhmutov, G. A. Bazilevskaya, Y. I. Stozhkov, J.-P. Raulin, M. V. Philippov. Analysis of Cosmic Ray Variations Recorded in October–December 2013. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2015, Vol. 79, No. 5, pp. 624–626. DOI: 10.3103/S1062873815050299]
- А2. М. В. Филиппов, Ю. И. Стожков, В. С. Махмутов, О. С. Максумов, С. В. Викторов, А. Н. Квашнин, А. А. Квашнин. Разработка компактного наземного нейтронного детектора. Изв. РАН, сер. физ., 2015, том 79, № 5, с. 763–766. DOI: 10.7868/S036767651505021X
[M.V. Filippov, Yu.I. Stozhkov, V.S. Makhmutov, O.S. Maksumov, S.V. Viktorov, A.N. Kvashnin, A.A. Kvashnin. Developing a Compact Ground_Based Neutron Detector. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2015, Vol. 79, No. 5, pp. 753–756. DOI: 10.3103/S1062873815050202]
- А3. В. С. Махмутов, Ю. И. Стожков, Ж.-П. Ролан, М. В. Филиппов, Г. А. Базилевская, А. Н. Квашнин, Ж. Такза, А. Марун, Г. Фернандес, С. В. Викторов, В. М. Панов. Вариации космических лучей и приземного электрического поля в январе 2016 г. Изв. РАН, сер. физ., 2017, том 81, № 2, с. 262–265. DOI: 10.7868/S0367676517020260
[V.S. Makhmutov, Y.I. Stozhkov, J.-P. Raulin, M.V. Philippov, G.A. Bazilevskaya, A.N. Kvashnin, J. Tacza, A. Marun, G. Fernandez, S.V. Viktorov V.M. Panov.

Variations in cosmic rays and the surface electric field in January 2016. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2017, Vol. 81, No. 2, pp. 241–244. DOI: 10.3103/S1062873817020265]

- A4. М. В. Филиппов, В. С. Махмутов, Ю. И. Стожков, Ж.-П. Ролан, Е. В. Калинин. Исследование вариаций потоков нейтронов с помощью наземного нейтронного детектора. Изв. РАН, сер. физ., 2019, том 83, № 5, с. 670–672. DOI: 10.1134/S0367676519050132
[M. V. Philippov, V. S. Makhmutov, Y. I. Stozhkov, J.-P. Raulin, E. V. Kalinin. Studying variations in neutron fluxes with a ground-based neutron detector. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2019, Vol. 83, No. 5, pp. 611–613. DOI: 10.3103/S1062873819050137]
- A5. В. С. Махмутов, Г. А. Базилевская, Ю. И. Стожков, М. В. Филиппов, Е. В. Калинин, А. К. Морзабаев, В. А. Ерхов, Ш. Гиниятова. Солнечная активность и вариации космических лучей в сентябре 2017 г. Изв. РАН, сер. физ., 2019, том 83, № 5, с. 602–605. DOI: 10.1134/S0367676519050223
[V. S. Makhmutov, G. A. Bazilevskaya, Y. I. Stozhkov, M. V. Philippov, E. V. Kalinin, A. K. Morzabaev, V. A. Erkhov, S. Giniyatova. Solar activity and cosmic ray variations in September 2017. Bulletin of the Russian academy of sciences: physics, 2019, Vol. 83, No. 5, pp. 543–546. DOI: 10.3103/S1062873819050228]
- A6. M. V. Philippov, V. S. Makhmutov, Yu. I. Stozhkov, O. S. Maksumov, G. A. Bazilevskaya, A. K. Morzabaev, Ye. A. Tulekov. Characteristics of the ground-based «CARPET-ASTANA» instrument for detecting charged component of cosmic rays and preliminary analysis of the first experimental data. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, Vol. 959, 163567. DOI: 10.1016/j.nima.2020.163567
- A7. A. Maghrabi, V.S. Makhmutov, M. Almutairi, A. Aldosari, M. Altilasi, M.V. Philippov, E.V. Kalinin. Cosmic ray observations by CARPET detector installed in central Saudi Arabia-preliminary results. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2020, Vol. 200, 105194. DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105194
- A8. М. В. Филиппов, В. С. Махмутов, Ю. И. Стожков, О. С. Максумов. Наземная установка для детектирования заряженной компоненты космических лучей CARPET. Приборы и техника эксперимента, 2020, № 3, с. 109–117. DOI: 10.31857/S0032816220030039

[M. V. Philippov, V. S. Makhmutov, Yu. I. Stozhkov, and O. S. Maksumov. The CARPET Ground Facility for Detecting the Charged Component of Cosmic Rays. *Instrum Exp Tech.*, 2020, Vol. 63, № 3, pp. 388–395. DOI: 10.1134/S0020441220030033]

- A9. М. В. Филиппов, В. С. Махмутов, Ю. И. Стожков, О. С. Максумов, J.-P. Raulin, J. Tacza. Наземная установка для детектирования нейтральной компоненты космических лучей “Нейтронный детектор”. *Приборы и техника эксперимента*, 2020, № 5, с. 96–103. DOI: 10.31857/S0032816220050298

[M. V. Philippov, V. S. Makhmutov, Yu. I. Stozhkov, and O. S. Maksumov. A Neutron Detector Ground-Based Facility for Detecting the Neutral Component of Cosmic Rays. *Instrum Exp Tech.*, 2020, Vol. 63, № 5, pp. 716–723. DOI: 10.1134/S0020441220050292]

- A10. Е. А. Тулеков, В. С. Махмутов, Г. А. Базилевская, Ю. И. Стожков, А. К. Морзабаев, М. В. Филиппов, В. И. Ерхов, А. С. Дюсембекова. Наземная установка для изучения вариаций космических лучей в городе Нур-Султан. *Геомagnetизм и аэрoномия*, 2020, том 60, № 6, с. 704–709. DOI: 10.31857/S0016794020060139

[E. A. Tulekov, V. S. Makhmutov, G. A. Bazilevskaya, Yu. I. Stozhkov, A. K. Morzabaev, M. V. Philippov, V. I. Erkhov, and A. S. Dyusembekova. Ground-based Instrument for the Study of Cosmic Ray Variation in Nur-Sultan. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2020, Vol. 60, No. 6, pp. 693–698. DOI: 10.1134/S0016793220060134]

- A11. М. В. Филиппов, В. С. Махмутов, А. Н. Квашнин, О. С. Максумов, Ю. И. Стожков, J.-P. Raulin, J. Tacza. Наземная установка для детектирования космических лучей “Гамма-спектрометр” в астрономическом комплексе CASLEO. *Приборы и техника эксперимента*, 2021, № 4, с. 74–78, DOI: 10.31857/S0032816221040030

[M. V. Philippov, V. S. Makhmutov, A.N. Kvashnin, O. S. Maksumov, Yu. I. Stozhkov, J.-P. Raulin, and J. Tacza. A Gamma-Spectrometer Ground Installation for Detecting Cosmic Rays in the Casleo Astronomic Complex. *Instrum Exp Tech.*, 2021, Vol. 64, № 4, pp. 566–569. DOI: 10.1134/S0020441221040035]

Тезисы докладов в сборниках трудов конференций:

- Б1. В.С. Махмутов, Г.А. Базилевская, Ж.-П. Ролан, М.В. Филиппов, Ю.И. Стожков. Анализ возрастных космических лучей, зарегистрированных в октябре-ноябре 2013 г. // Сборник трудов 33-й Всероссийской конференции по космическим лучам, Дубна 2014, с. 10

- Б2. М.В. Филиппов, А.А. Квашнин, А.Н. Квашнин, В.С. Махмутов, О.С. Максумов, С.В. Викторов, Ю.И. Стожков. Разработка компактного наземного нейтронного детектора // Сборник трудов 33-й Всероссийской конференции по космическим лучам, Дубна 2014, с. 76
- Б3. M. Philippov, Yu. Stozhkov, A. N. Kvashnin, O. Maksumov, A. A. Kvashnin, S. Viktorov, V. Makhmutov. Ground level neutron monitoring instruments // Book of abstracts, 40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow 2014, p. 104
- Б4. V. Makhmutov, G. Bazilevskaya, Yu. Stozhkov, J. Raulin, M. Philippov. Analysis of the cosmic ray variations and solar are activity in October-November 2013 // Book of abstracts, 24th European Cosmic Ray Symposium, Kiel 2014, p. 35
- Б5. M. Philippov, O. Maksumov, S. Viktorov, Yu. Stozhkov, A. N. Kvashnin, A. A. Kvashnin, V. Makhmutov. Development of the ground-based compact neutron detector 2013 // Book of abstracts, 24th European Cosmic Ray Symposium, Kiel 2014, p. 77
- Б6. V. Makhmutov, G. Bazilevskaya, Yu. Stozhkov, M. Philippov, J. Raulin, A. Marun. Low-latitude cosmic ray increase during solar energetic particle events on 5-6 December 2006 // Book of abstracts, 25th European Cosmic Ray Symposium, Torino 2016, p. 51
- Б7. В. С. Махмутов, Ю. И. Стожков, Ж.-П. Ролан, Г. А. Базилевская, М. В. Филиппов, Ж. Такза, А. Марун, Г. Фернандес. Вариации заряженной и нейтральной Компонент космических лучей в приземной атмосфере // Сборник трудов 12-й ежегодной конференция «Физика плазмы в солнечной системе», Москва 2017, с. 179
- Б8. V. Makhmutov, G. Bazilevskaya, Yu. Stozhkov, M. Philippov, E. Kalinin, A. Morzabaev, V. Erkhov, Sh. Giniyatova. Solar activity and cosmic ray variations in September, 2017 // Book of abstracts, 25th Extended European Cosmic Ray Symposium / 35th Russian Cosmic Ray Conference, Barnaul/Belokurikha 2018, p. 41
- Б9. M. Philippov, V. Makhmutov, Yu. Stozhkov, J.-P. Raulin. Study of neutron flux variations using new ground-based neutron detector // Book of abstracts, 25th Extended European Cosmic Ray Symposium / 35th Russian Cosmic Ray Conference, Barnaul/Belokurikha 2018, p. 198
- Б10. V. S. Makhmutov, J.-P. Raulin, M. V. Philippov, S. Szpigel, Yu. I. Stozhkov, G. A. Bazilevskaya, G. Guimarães, J. Tacza, A. Kvashnin, E. V. Kalinin. Charge particle and neutral cosmic ray component variations during the surface electric field disturbances connected with thunderclouds as observed at CASLEO in 2016-2017 // Book of abstracts, EGU General Assembly 2019, Vol. 21, EGU2019-4513

- Б11. Э. О. Чиглинцев, М. В. Филиппов. Проектирование, разработка и применение прибора для измерения электрического поля Земли // Сборник трудов 62-й научной конференции МФТИ (фундаментальная и прикладная физика), Москва – Долгопрудный – Жуковский 2019, с. 272
- Б12. Е. А. Тулеков, А. К. Морзабаев, В. С. Махмутов, М. В. Филиппов. Изучение вариаций космических лучей на наземных установках города Нур-Султан, Казахстан // Сборник трудов 15-й ежегодной конференция «Физика плазмы в солнечной системе», Москва 2020, с. 147
- Б13. А.А. Орлов, В.С. Махмутов, М.В. Филиппов, Ж.-П. Ролан. Вариации заряженной и нейтральной компонент космических лучей в сейсмической зоне CASLEO // Сборник трудов 36-й Всероссийской конференции по космическим лучам, Москва 2020, с. 65
- Б14. А.А. Орлов, В.С. Махмутов, М.В. Филиппов, Ю.И. Стожков, Ж.-П. Ролан. Результаты исследований вариаций электрического поля и вторичных компонент космических лучей в сейсмоактивной зоне // Сборник трудов 16-й ежегодной конференция «Физика плазмы в солнечной системе», Москва 2021, с. 211
- Б15. Е.А. Тулеков, А.К. Морзабаев, В.С. Махмутов, В.И. Ерхов, М.В. Филиппов. Вариации космических лучей в период 2019-2020 гг. по данным наблюдений экспериментального комплекса ЕНУ, Казахстан // Сборник трудов 16-й ежегодной конференция «Физика плазмы в солнечной системе», Москва 2021, с. 159

Прочие публикации по теме диссертации:

- В1. V. Makhmutov, G. Bazilevskaya, Yu. Stozhkov, M. Philippov, J.-P. Raulin, A. Morzabaev, Sh. Giniyatova. Unusual cosmic ray increases observed during several solar flares in 2011-2013. Proceedings of The 34th International Cosmic Ray Conference PoS(ICRC2015), 2016, Vol. 236, 65. DOI: 10.22323/1.236.0065
- В2. V. Makhmutov, G. Bazilevskaya, Yu. Stozhkov, M. Philippov, Y. Yair, R. Yaniv, G. Harrison, K. Nicoll, K. Aplin. Cosmic ray measurements in the atmosphere at several latitudes in October, 2014. Proceedings of The 34th International Cosmic Ray Conference PoS(ICRC2015), 2016, Vol. 236, 392. DOI: 10.22323/1.236.0392
- В3. A. Maghrabi, V. Makhmutov, A. Aldosari, M. Almutairi, M. Altilasi, M. Philippov, E. Kalinin, A. Alshehri, R. Alfadhel, B. Almshari, J. Alrashied, E. Almutairi, B. Alrashide. Preliminary Results from CARPET charge particles detector located in high cut off rigidity. Proceedings of The 36th International Cosmic Ray Conference PoS(ICRC2019), 2019, Vol. 358, p. 1115. DOI: 10.22323/1.358.1115

- В4. Е. А. Тулеков, А. К. Морзабаев, В. С. Махмутов, В. И. Ерхов, М. В. Филиппов. Вариации космических лучей в период 2016-2019 гг. по данным наблюдений экспериментального комплекса ЕНУ. Вестник ЕНУ им. Л. Н. Гумилёва. Физика. Астрономия, 2020, том 133, № 4, с. 79-85. DOI: 10.32523/2616-6836-2020-133-4-79-85
 [Ye. Tulekov, A. K. Morzabaev, V. S. Makhmutov, V. I. Yerkhov, M. V. Philippov. Variations of cosmic rays in the period 2016-2019 according to observations of the ENU experimental complex. Bulletin of L.N. Gumilyov ENU. PHYSICS. ASTRONOMY Series, 2020, Vol. 133, №4, pp. 79-95. DOI: 10.32523/2616-6836-2020-133-4-79-85]

Работы автора отмечены:

Премией Учебно-научного комплекса ФИАН по второй секции конкурса молодёжных работ 2013 года за разработку и создание электронного модуля установки для лабораторной работы МФТИ «Измерение абсолютной активности препарата Co-60 методом γ - γ совпадений».

Личный вклад автора

Представленные в диссертационной работе оригинальные результаты получены автором лично или при его определяющем участии.

1. Автор лично разработал и изготовил следующие модули научной аппаратуры:
 - Интерфейсный блок, плату телеметрии и питания для детектора заряженных частиц CARPET [A6 - A8];
 - Интерфейсный блок, плату телеметрии и питания для научной аппаратуры «Нейтронный детектор» [A2, A4, A9];
2. Автор лично разработал внутрисхемное программное обеспечение для научной аппаратуры CARPET и «Нейтронный детектор»;
3. Автор лично разработал протоколы обмена данными с персональным компьютером для научной аппаратуры CARPET и «Нейтронный детектор»;
4. Автор произвёл установку и ввёл в эксплуатацию всю научную аппаратуру, представленную в данной работе;
5. Автор лично разработал и испытал программное обеспечение для обработки и анализа научной информации установок CARPET, «Нейтронный детектор» и «Гамма-спектрометр» [A9, A6 - A8, A11];

6. Автор произвёл первичную обработку экспериментальных данных, полученных на созданных установках CARPET и «Нейтронный детектор», «Гамма-спектрометр» [А6, А8, А9, А10, А11];
7. Автор определил величины барометрических коэффициентов для установок CARPET и «Нейтронный детектор» [А8, А9, А10];
8. Автор определил величину температурного коэффициента для установки CARPET-МОСКВА;
9. Автор лично разработал и испытал методику учёта аппаратурного температурного эффекта для установок «Гамма-спектрометр»;
10. Автор выполнил первичный анализ зарегистрированных Форбуш-понижений КЛ, провёл анализ суточной волны, годовой вариации космических лучей.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 123 страницы, включая 79 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 121 наименование.

Глава 1. Литературный обзор

1.1 Происхождение и состав первичных космических лучей

Источниками первичных КЛ являются взрывы сверхновых звёзд (галактические космические лучи – ГКЛ) и Солнце (солнечные космические лучи – СКЛ). Есть указания, что КЛ с энергией до нескольких ГэВ могут быть ускорены ударными волнами в гелиосфере [12]. С помощью механизма ускорения на ударных волнах при взрыве сверхновых, первичные КЛ могут достигать энергии выше $3 \cdot 10^{15}$ эВ [13,14].

ГКЛ лежат в области энергий 10^6 - 10^{21} эВ, СКЛ – 10^5 - 10^{11} эВ. При этом, поток ГКЛ до входа в атмосферу составляет, приблизительно, $3 \text{ см}^{-1}\text{с}^{-1}$, а поток СКЛ во время солнечных вспышек может достигать $10^6 \text{ см}^{-1}\text{с}^{-1}$ [14].

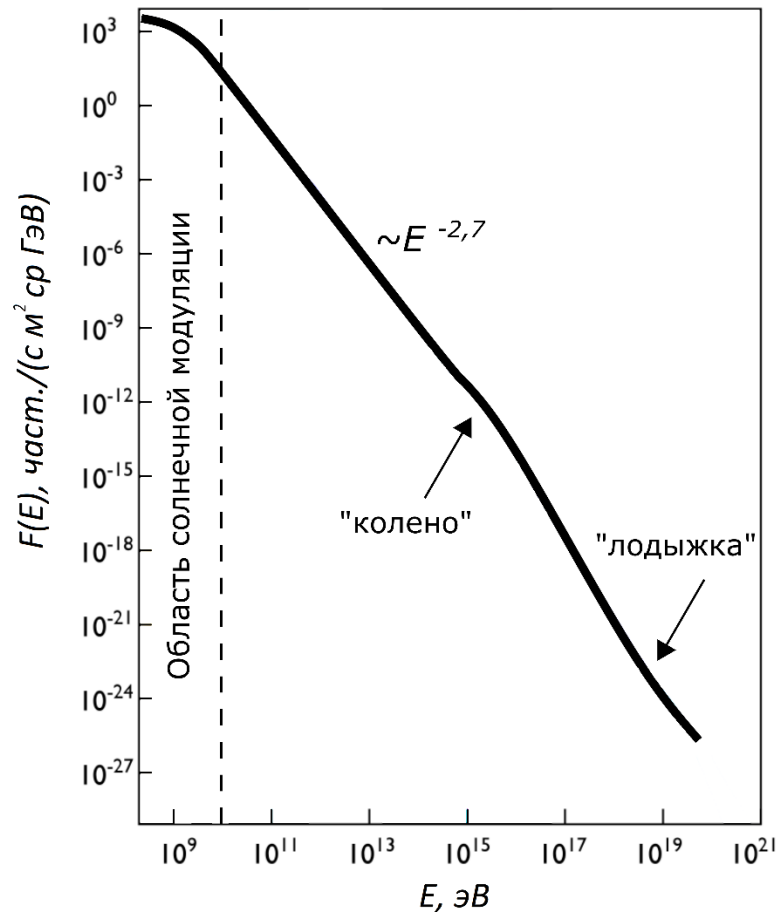


Рис. 1.1 – Схематичное изображение дифференциального энергетического спектра ядерной компоненты первичных КЛ в двойном логарифмическом масштабе.

Первичные КЛ на ~85% состоят из протонов (ядра водорода), ~12% - альфа-частицы (ядра гелия), вклад остальных частиц не превышает ~3% [15]. Дифференциальный

энергетический спектр первичных КЛ (рис. 1.1) имеет степенной вид и аппроксимируется соотношением:

$$dN/dE \sim E^{-\gamma} \quad (1.1)$$

где

γ – показатель дифференциального спектра КЛ.

Для ядерной компоненты первичных КЛ $\gamma \approx 2,7$. При энергиях $E < 10^9$ эВ и $E > 10^{19}$ эВ показатель спектра уменьшается [17]. Отдельный интерес представляют диапазоны энергий 10^{15} - 10^{16} эВ [16], т.н. «колени» (knee) и 10^{18} - 10^{19} эВ – «лодыжка» (ankle), в которых наблюдаются аномальные изменения спектра (рис. 1.1) [15]. Для дифференциального энергетического спектра электронов $\gamma \approx 3,1$ [17].

1.2 Ядерно-каскадные процессы в атмосфере

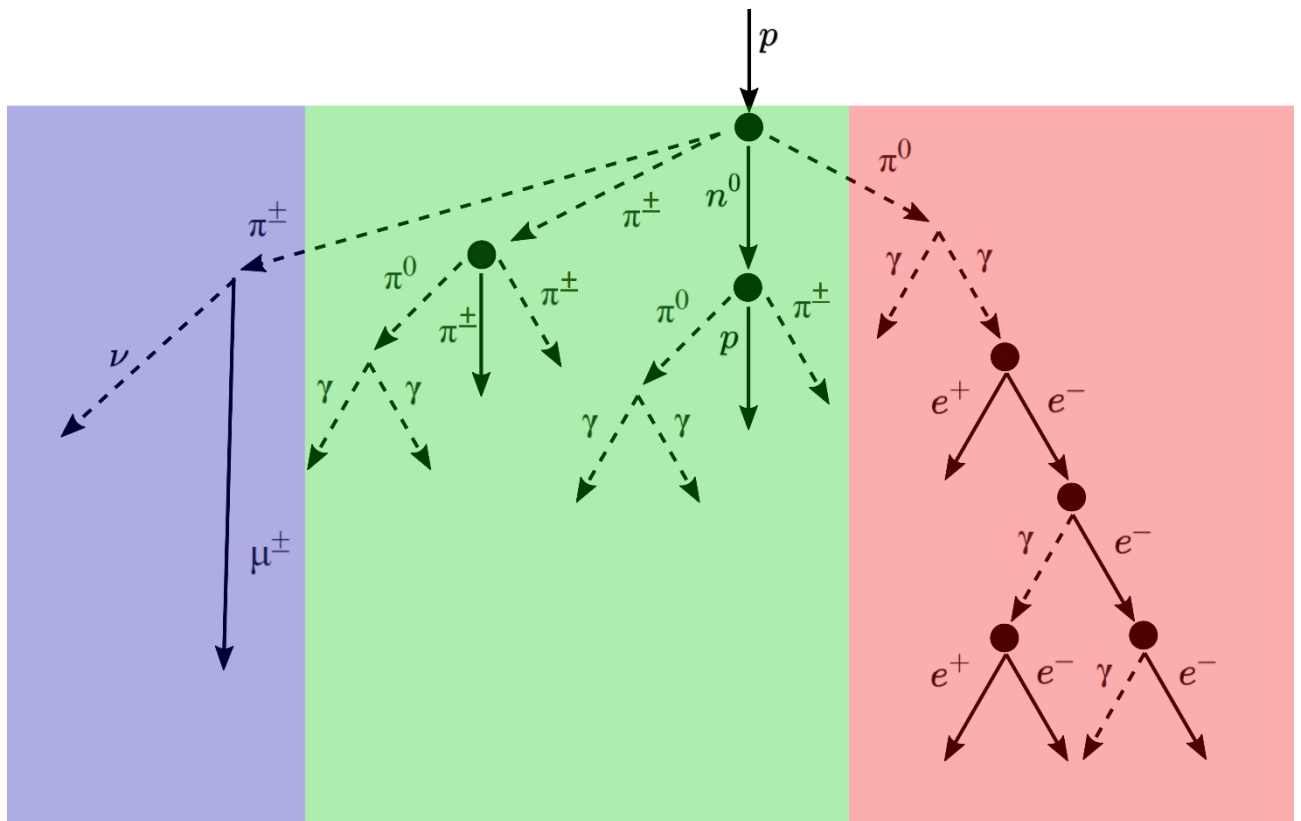


Рис. 1.2 – Схема ядерно-каскадного процесса, происходящего в атмосфере: синяя область – мюонная (проникающая) компонента вторичных КЛ, зелёная область – ядерно-активная компонента вторичных КЛ, красная область – электронно-фотонная компонента вторичных КЛ. Тёмными кругами обозначены ядра атомов воздуха.

Наземные установки для исследования КЛ детектируют вторичные частицы, образовавшиеся в результате взаимодействия первичных КЛ с ядрами в атмосфере (кислород

и азот) [2]. Первичный протон теряет около 50% своей энергии в каждом акте взаимодействия, в результате которых образуются, в основном, заряженные и нейтральные пионы. На рис. 1.2 приведена примерная схема ядерно-каскадного процесса в атмосфере.

Нейтральные пионы π^0 распадаются (время жизни $\sim 10^{-16}$ с) на два γ -кванта. При высоких энергиях ($h\nu > 2mc^2$) γ -квант способен образовывать в веществе электрон-позитронные пары. При меньших энергиях γ -квантов, возможны Комpton-эффект и фотоэффект. Энергия электронов, в свою очередь, расходуется на ионизационные и радиационные потери. При энергиях, выше критической ($E_{кр} = 70$ МэВ для воздуха) радиационные потери являются доминирующими [15]. Тормозное излучение электронов рождает γ -кванты высокой энергии, которые, в свою очередь, за счёт комптоновского рассеяния рождают электроны. Электроны, аналогично, за счёт тормозного излучения дают γ -кванты. Данный циклический процесс называется электронно-фотонным каскадом (красная область на рис. 1.2).

Заряженные пионы π^\pm либо распадаются (время жизни $\sim 10^{-8}$ с), образуя мюоны и нейтрино (синяя область на рис. 1.2), либо взаимодействуют с ядрами (зелёная область на рис. 1.2). В результате распада заряженных пионов появляются мюоны (время жизни $\sim 10^{-6}$ с).

Отрицательные мюоны μ^- распадаются на электрон, мюонное нейтрино и электронное антинейтрино. Положительные мюоны μ^+ , соответственно, распадаются на позитрон, мюонное антинейтрино и электронное нейтрино. Так как отношение массы мюона к массе электрона $m_\mu/m_e \approx 207$, а излучаемая энергия обратно пропорциональна квадрату массы частицы, радиационные потери мюонов в ~ 40000 раз меньше, чем для электронов на той же радиационной длине.

Мюоны слабо поглощаются атмосферой, ядерно-активная компонента, напротив, поглощается сильно. Таким образом, на уровне моря в состав КЛ, в основном входят мюоны (жёсткая компонента), электроны и γ -кванты (мягкая компонента) [2].

1.3 Регистрация заряженных частиц

1.3.1 Пропорциональные счётчики и счётчики Гейгера-Мюллера

В основу работы пропорциональных счётчиков положен принцип внутреннего усиления сигнала за счёт развития электронных лавин в электрическом поле. Пропорциональные счётчики, как-правило, обладают цилиндрической формой. Катодом является наружная цилиндрическая оболочка, анод – тонкая проводящая нить, проходящая внутри счётчика вдоль всей его длины. В этих счётчиках лавины могут развиваться только вдоль узкой области вблизи анода. Амплитуда импульсов пропорциональна энергии частиц.

Образованные в лавине фотоны, за счёт фотоэффекта на катоде и фотоионизации, могут выбить дополнительные электроны, которые, попадая в область ударной ионизации, вызывают новые лавины. В области ударной ионизации образуется пространственный заряд (положительные ионы), который нарушает пропорциональность.

Для того чтобы расширить диапазон пропорционального режима счётчика, вводят гасящие добавки, непрозрачные для ультрафиолетовых фотонов.

В отличие от пропорциональных счётчиков, в счётчиках Гейгера-Мюллера (Г-М) применяется самостоятельный газовый разряд (коронный), который не гаснет, пока сохраняется разность потенциалов. Г-М счётчики способны срабатывать от единичных электронов и их выходной сигнал практически не зависит от начальной ионизации. Существуют самогасящиеся Г-М счётчики, изготовленные с добавлением гасящих примесей к основному газу [14].

1.3.2 Измерения потоков заряженных частиц в ФИАН.

Начиная с 1957 г., силами сотрудников ДНС ФИАН проводятся регулярные измерения потоков заряженной компоненты КЛ в атмосфере. Измерения выполняются в полярных (Апатиты, Мурманская область и Мирный, Антарктида) и средних широтах (Долгопрудный, Московская область) на высотах от уровня земли до 30–35 км.

В основе стратосферного зонда лежит Г-М счётчик СТС-6. Каждый зонд укомплектовывается одним или двумя (телескоп) счётчиками. Телескоп состоит из двух счётчиков, разделённых алюминиевым поглотителем, толщиной 7 мм. Электроника зонда регистрирует и передаёт импульсы, полученные по каналу совпадений (логическое «И» сигналов обоих счётчиков) и каналу одиночных импульсов (от одного счётчика).

Основными целями наблюдений являются исследования модуляции галактических космических лучей с энергией 0,1–20 ГэВ [18-24], генерации солнечных космических лучей [25], высыпаний магнитосферных электронов [26-31], изучение роли заряженных частиц в атмосферных процессах [32-35].

1.3.3 Мюонные телескопы и годоскопы

Мюонные телескопы (МТ) являются наземными детекторами для регистрации пространственно-углового распределения жёсткой компоненты КЛ [36].

Один из первых отечественных МТ создан в ИКФИА СО РАН (Якутск) в 1954 г. Каждый МТ состоит из 52 газоразрядных счётчиков СГМ-16, расположенных в 3

вертикальных слоя: по 18 счётчиков в верхнем и нижнем рядах и 16 счётчиков в среднем ряду. Направление прихода частиц определяется схемой тройных совпадений [37].

Многонаправленные мюонные телескопы (ММТ) способны выделять потоки КЛ в заданных направлениях в пределах апертуры детектора. Один из первых ММТ запущен в г. Нагоя (Япония) в 1970 г. Этот прибор состоит из двух слоёв по 36 сцинтилляционных детекторов в каждом слое. Для фильтрации мягкой компоненты КЛ, между слоями расположены свинцовые пластины. Эффективная площадь детектора – 36 м² [38-40].

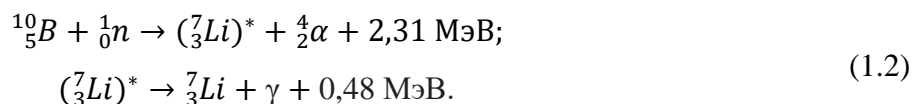
ММТ MuSTAnG (Muon Spaceweather Telescope for Anisotropies Greifswald) разработан в Университете Грайфсвальд (Германия) и состоит из двух слоёв сцинтилляторных сборок. Каждый слой состоит из 16-ти сцинтилляторов (пластины, 50 см×50 см×5 см в виде матрицы 4×4), между которыми расположены свинцовые пластины. Детектор чувствителен к мюонам с энергиями от 4 МэВ. Сбор данных проводится 13-ти направлениям с угловым разрешением 20 – 30 градусов [41-42].

В 2004-2006 гг. в УНУ «НЕВОД» (НИЯУ МИФИ) был разработан мюонный годоскоп УРАГАН (Установка для РАСпознавания Грозových АНОмалий). Годоскоп состоит из независимых супермодулей, площадь поверхности каждого 11,5 м². Супермодули расположены над водным черенковским детектором НЕВОД и состоят из 8 слоёв газоразрядных камер. Слои разделены пенопластовой пластиной-перегородкой толщиной 5 см. Каждый слой является массивом 20-ти стримерных камер, которые состоят из 16-ти трубок, наполненных трёхкомпонентной газовой смесью (аргон, углекислый газ и n-пентан). Заряженная компонента КЛ (мюоны), проходя через газовые камеры, вызывает стримерный разряд, который считывается системой внешних полосок-стрипов [43-46].

1.4 Регистрация нейтронов

Для регистрации нейтроны конвертируются в заряженные частицы. Ниже перечислены некоторые реакции захвата нейтронов ядрами.

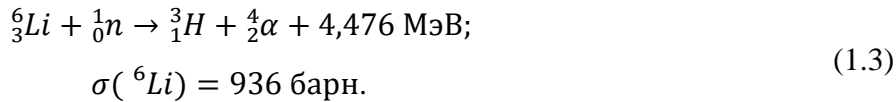
Реакция выделения α -частицы (n, α) является наиболее часто используемой при регистрации нейтронов:



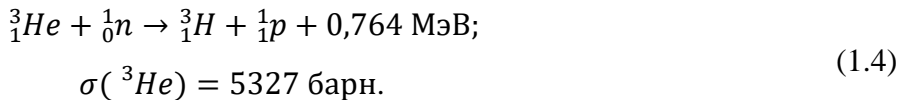
Ядро лития рождается в возбуждённом состоянии и, переходя в основное состояние, испускает γ -квант с энергией 0,48 МэВ. Ядро лития и α -частица разлетаются в противоположные стороны и делят освобождающуюся энергию в отношении: 7/11 энергии (~ 1,5 МэВ) получает α -частица, 4/11 энергии (~ 0,8 МэВ) получает ядро лития. Данная

реакция (уравнение 1.2) протекает с вероятностью 0,94. С вероятностью 0,06 ядро лития находится в основном состоянии, а суммарная кинетическая энергия продуктов реакции 2,79 МэВ. Для тепловых нейтронов сечение реакции на ядре ^{10}B составляет 3940 барн. С ростом энергии оно падает по закону $1/v$, где v —скорость нейтрона [15].

Реакция выделения α -частицы (n, α) на ядре ^6Li [15]:



Реакция выделения протона (n, p) на ядре ^3He [15]:



Нейтроны принято условно разделять на 3 группы по энергиям: медленные (тепловые) нейтроны (до 0,5 эВ), промежуточные нейтроны (0,5-10⁵ эВ), быстрые нейтроны (0,1-10 МэВ).

Для регистрации тепловых нейтронов, используются газоразрядные (коронные) счётчики, наполненные газом ^3He (уравнение 1.4), газом BF_3 (трифторид бора) или обладающие твёрдым борным покрытием (уравнение 1.2). Данные детекторы отличаются от Г-М счётчиков отсутствием гасящих примесей и большим напряжением, при котором существует непрерывный коронный разряд. Коронные счётчики дают импульсы амплитудой до сотен милливольт.

Также возможно использовать сцинтилляционные детекторы, изготовленные из боросодержащих или литийсодержащих стёкол [15].

Ядерные реакции, приведённые выше, используются и для регистрации быстрых нейтронов. Так как сечение реакции падает с ростом энергии нейтронов, одним из способов эффективной регистрации является использование замедлителя для уменьшения энергии нейтронов. В качестве замедлителя часто используется полиэтилен или парафин.

1.4.1 Нейтронные мониторы

Мировая сеть нейтронных мониторов (НМ) на сегодняшний день насчитывает более 50 станций. НМ чувствительны к потокам КЛ, находящимся в диапазоне энергий, примерно, 0,5-20 ГэВ. Стандартный НМ типа NM-64 состоит из 3 секций по 6 счётчиков. Размеры одной секции НМ составляют 315×222×52 см³, при весе около 12 т. В качестве генератора частиц используется свинец, в качестве замедлителя и рефлектора – полиэтилен. В НМ используются пропорциональные счётчики СНМ-15, заполненные газом BF_3 , (содержат 96% ^{10}B при давлении 0,27 бара), которые чувствительны к тепловым нейтронам [47-48].

1.5 Регистрация γ -квантов

Для детектирования γ -квантов используются 3 вида взаимодействия: фотоэффект, комптон-эффект, образование электро-позитронных пар.

Методика регистрации γ -квантов с энергиями порядка МэВ, не имеет существенных отличий от методов регистрации заряженных частиц, так как вследствие комптон-эффекта или фотоэффекта, рождаются энергичные электроны и последующий процесс их детектирования не отличается от детектирования заряженных частиц. Для регистрации γ -квантов чаще всего применяются сцинтилляторы NaI(Tl), так как данное вещество имеет достаточно большую плотность ($3,67 \text{ г/см}^3$) и высокий средний атомный номер, следствием чего является высокая эффективность регистрации γ -квантов. Разрешающая способность таких сцинтилляторов $dE/E \sim 5\%$ при $E \sim 1,3 \text{ МэВ}$ [15].

Выводы к главе 1

Вторичные КЛ разделяются на 3 компоненты: мюонная, ядерно-активная и электронно-фотонная. Для детектирования каждой компоненты КЛ используются различные физические методы и детекторы. В данной главе приведена общая информация о КЛ и методы их детектирования, которые используются в трёх новых установках, разработанных на ДНС ФИАН. Установки CARPET чувствительны, в основном, к мюонной компоненте КЛ, установки «Нейтронный детектор» - к ядерно-активной компоненте, установки «Гамма-спектрометр» детектируют γ -кванты в диапазоне энергий \sim до 5 МэВ. Эти установки работают в нескольких научных центрах в разных точках мира и образуют международную сеть детекторов низкоэнергичных КЛ.

Глава 2. Экспериментальный комплекс CARPET

Установки CARPET являются развитием атмосферного эксперимента ФИАН (п. 1.3.2), так как в основу взят аналогичный принцип детектирования КЛ с использованием Г-М счётчиков, разделённых алюминиевыми поглотителями (телескоп).

Первая установка данного типа «CARPET – CASLEO» с 2006 г. непрерывно работает в Астрономическом комплексе CASLEO (Эль-Леонсито, Аргентина; высота 2550 м; $R_c = 9,8$ ГВ) [49–57].

Вторая установка, CARPET – GCR используется с 2009 года в проведении экспериментальных исследований по международному проекту CLOUD в ЦЕРН [58-61].

В данной главе приводится техническое описание усовершенствованной установки CARPET, разработанной в конце 2014 года. Основные отличия новых установок от CARPET – CASLEO и CARPET – GCR: минимальное время интегрирования данных уменьшено с 500 мс до 1 мс, добавлен дополнительный канал служебной информации «телеметрия», также было разработано новое программное обеспечение (ПО) под операционную систему (ОС) Windows 7.

Первые 2 модуля данной установки были запущены в 2015 году в KACST (King Abdulaziz City for Science and Technology, Саудовская Аравия, Эр-Рияд, N24.39°, E46.42°; $R_c = 14,4$ ГВ) [62-64].

В 2015 и 2016 гг. в Евразийском национальном университете имени Л.Н. Гумилева (Нур-Султан, Республика Казахстан, N51.10°, E71.26°; $R_c = 2,9$ ГВ) запущены третий и четвёртый модули установки: CARPET-ASTANA 1-2 [65-68].

С 2017 года на территории Долгопрудненской научной станции ФИАН (Долгопрудный, Московская область, N55.56°, E37.3°; $R_c = 2,12$ ГВ) запущен в непрерывную работу пятый модуль: CARPET-МОСКВА [69].

Таким образом, на сегодняшний день существует сеть научных установок данного типа, состоящая из 5 модулей CARPET, расположенных на различных широтах.

2.1 Принципы работы аппаратно-программного комплекса CARPET

Детектирующими элементами установки CARPET (рис. 2.1) являются газоразрядные счётчики СТС - 6, объединённые в 12 (24 в CARPET-CASLEO) детектирующих блоков, по 10 счётчиков в каждом [69].

Паспортные значения основным параметров счётчика СТС-6:

длина, мм	197±2,5;
наибольший диаметр, мм	22;
рабочее напряжение, В	285-335;
наименьшая протяжённость плат, В	80;
наибольший наклон плат, %/В	0,125;
наибольший натуральный фон, имп./мин	110.

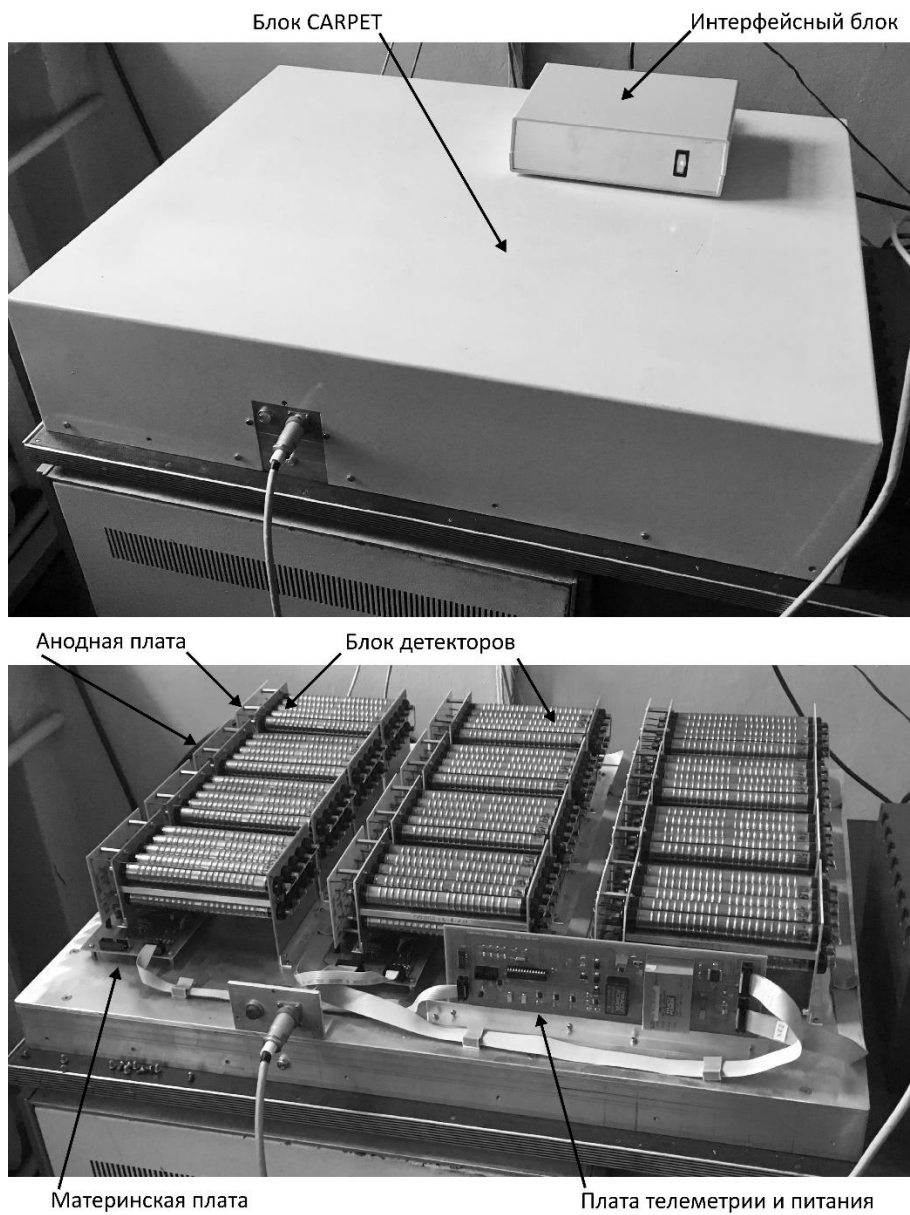


Рис. 2.1 – установка CARPET. Верхнее изображение – детектор с надетым защитным кожухом и интерфейсный блок, нижнее изображение – детектор без защитного кожуха.

Блок детекторов состоит из 5 верхних и 5 нижних счётчиков, между которыми расположен алюминиевый поглотитель (фильтр) толщиной 7 мм. Запись экспериментальных данных происходит со скважностью 1 мс по трём каналам: UP, LOW, TEL. Данные канала UP соответствуют интегральному счёту заряженных частиц, проходящих через верхний слой из 60 (120 в CARPET-CASLEO) счётчиков. Данные канала LOW соответствуют интегральному счёту заряженных частиц, проходящих через нижний слой из 60 (120 в CARPET-CASLEO) счётчиков. TEL – канал совпадений, регистрирующий частицы прошедшие через фильтр.

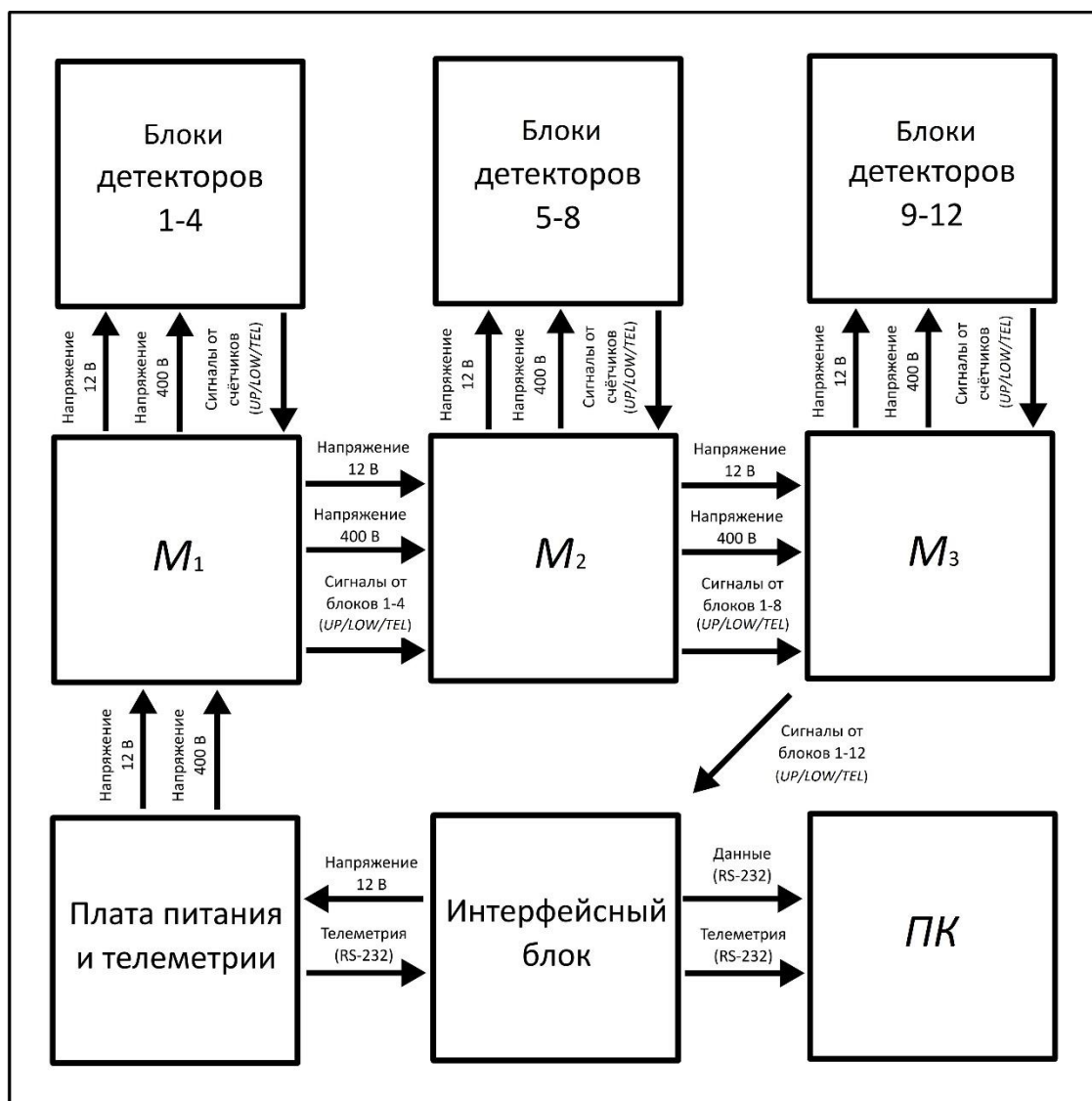


Рис. 2.2 – Блок-схема установки CARPET.

Установка CARPET регистрирует частицы следующих энергий: в каналах UP и LOW: электроны и позитроны с энергией $E > 200$ кэВ, протоны с $E > 5$ МэВ, мюоны с $E > 1,5$ МэВ,

фотоны (эффективность $< 1\%$) с $E > 20$ кэВ. В канале совпадений TEL регистрируются более энергичные частицы: электроны с энергиями $E > 5$ МэВ, протоны с $E > 30$ МэВ и мюоны с $E > 15,5$ МэВ.

Таким образом, установка CARPET чувствительна к низкоэнергичной заряженной вторичной компоненте КЛ, образуемой высокоэнергичными первичными галактическими и солнечными КЛ в земной атмосфере.

Блок-схема установки приведена на рис. 2.2.: M_1-M_3 – материнские платы установки CARPET, ПК – персональный компьютер. Электронные платы CARPET смонтированы на алюминиевой плите размером 800×640 мм.

В состав каждого блока детекторов входят 10 газоразрядных счётчиков СТС-6, алюминиевый фильтр и анодная плата (рис. 2.3 - 2.4).

Катоды счётчиков объединены между собой и заземлены. Аноды группы верхних счётчиков (UP) подключены к резисторам R_1-R_5 (470 Ом), нижние (LOW) – к резисторам R_6-R_{10} (470 Ом). Резисторы R_{11} и R_{12} служат для реализации «ИЛИ». Импульсы верхней и нижней группы счётчиков с помощью триггеров Шмитта $DD_{1.1}$ и $DD_{1.3}$ преобразуются в прямоугольные и поступают в дальнейшие цепи как UP и LOW. Одновременно эти импульсы (UP и LOW) поступают на схему совпадения $DD_{1.3}$, на которой формируются импульсы TEL.

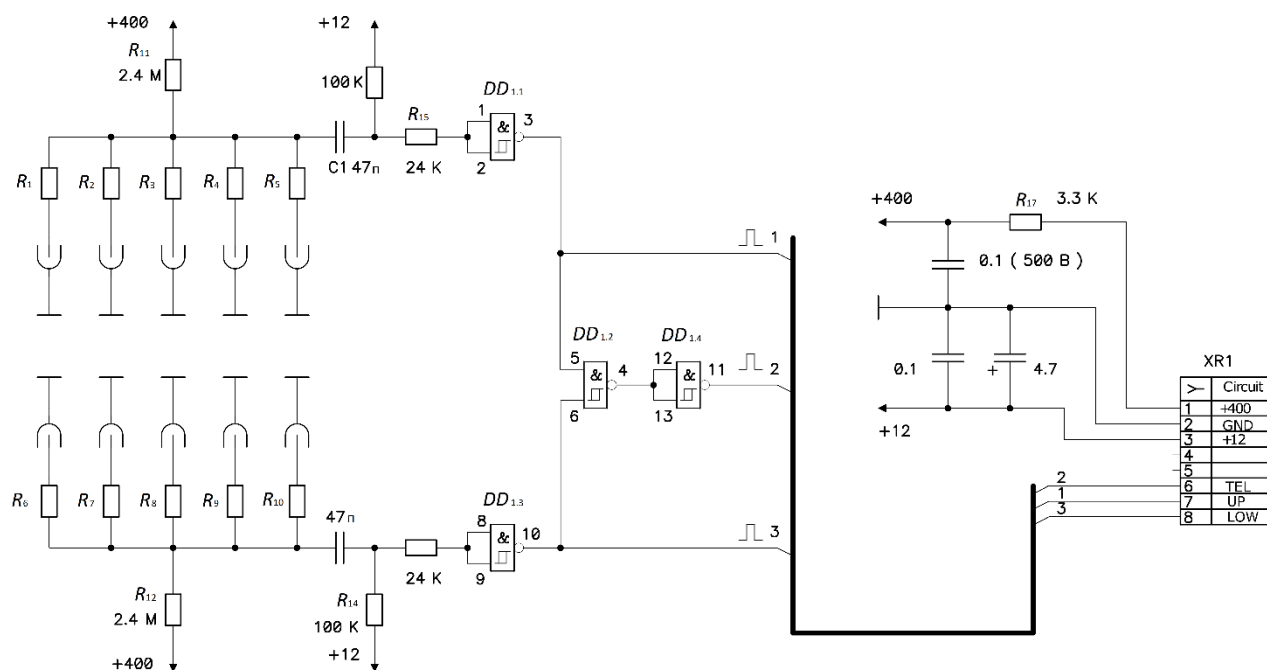


Рис. 2.3 – Принципиальная схема анодной платы установки CARPET.

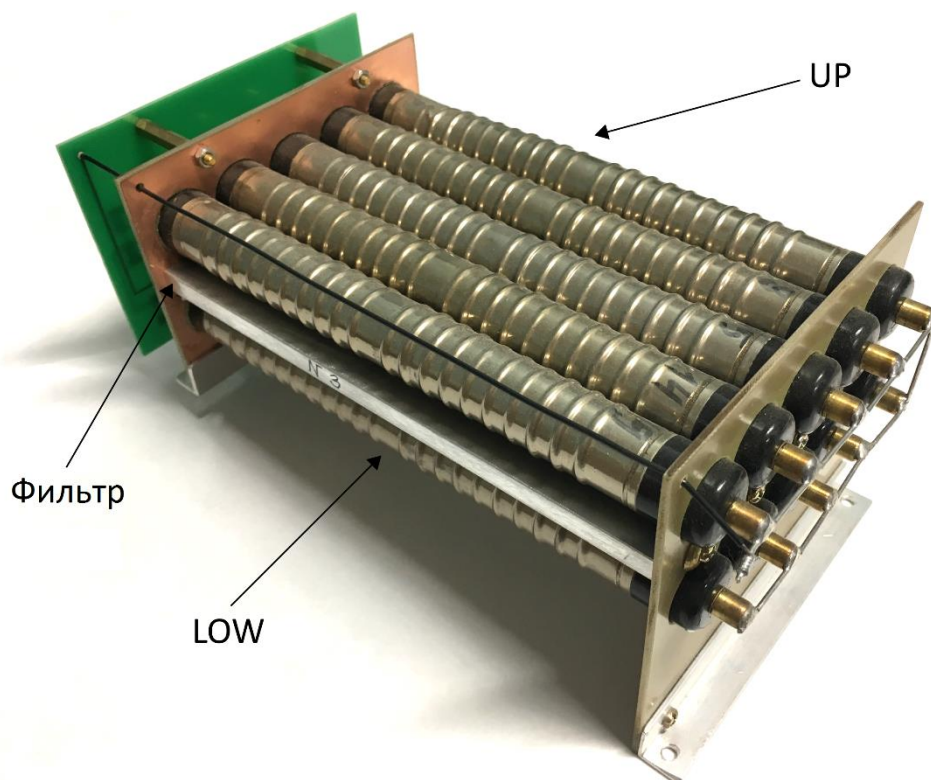


Рис. 2.4 – Блок детекторов установки CARPET.

Блоки детекторов (рис. 2.4) установлены на материнские платы (рис. 2.5) – по 4 блока на каждую плату с помощью разъемов XR5–XR8. Материнская плата питает анодные платы напряжениями +12 В и +400 В. Также на материнских платах реализовано объединение по «ИЛИ» импульсов трёх каналов (UP, LOW, TEL) с каждого блока детекторов, их передача на следующую материнскую плату и приём управляющих кодов на адресной шине для выбора режима работы установки. 12 блоков детекторов объединены в группы по четыре блока. Каждая группа из 4 блоков устанавливается на соответствующую материнскую плату: M_1 – M_3 . В режиме ALL (основной рабочий режим) разрешено прохождение на «ИЛИ» импульсов со всех блоков детекторов, в режиме ONE – только от одного блока, номер которого задается двоичным кодом.

Рассмотрим логику работы материнской платы на примере формирования сигнала в канале TEL блока, установленного в разъем XR5. Пусть на выходе элемента $DD_{4.2}$ (рис. 2.5) установлена логическая «1», тогда разрешено прохождение импульсов UP, LOW и TEL этого блока через элементы $DD_{4.1}$, $DD_{5.1}$ и $DD_{6.1}$. Импульс TEL поступает на вход $DD_{4.4}$. На второй

вход $DD_{4.4}$ поступает для суммирования инвертированный импульс канала TEL от предыдущего блока (для материнских плат M_2 и M_3).

Выходной сигнал $DD_{4.4}$ является суммой двух его входных сигналов, который инвертируется элементом $DD_{4.3}$ и поступает на следующий блок. Сигналы каналов UP и LOW суммируются аналогичным образом.

Сигналы каждого из блоков допускаются к суммированию, если на выходах элементов $DD_{4.2}$, $DD_{7.2}$, $DD_{10.2}$ и $DD_{13.2}$ установлена логическая «1». Для этого необходимо замкнуть на корпус один из двух входов. Делается это с помощью двоичных кодов, подаваемых на 5-разрядную адресную шину, подключённую к разъёму XR1. Линии A0-A3 и ALL являются сквозными и, поступив на первую плату (M_1), далее передаются к следующей плате через микросхемы-повторители DD_3 . Управляющие коды адресной шины формируются интерфейсным блоком.

Линия ALL реализует выбор режима работы установки. Если на линии ALL выставлен логический «0», то установка работает в основном режиме. В таком случае на всех материнских платах замыкаются на корпус выводы №5 элементов $DD_{4.2}$, $DD_{7.2}$, $DD_{10.2}$ и $DD_{13.2}$.

В результате на выходах этих элементов выставляется логическая «1», которая разрешает сигналам каналов TEL, UP и LOW проходить через логические элементы «2И-НЕ». Линии A0-A3 адресной шины в таком случае на работу схемы не влияют.

Если необходимо проверить работу одного из 12 блоков, на линии ALL выставляется логическая «1». В таком случае на выход поступают сигналы блока, адрес которого установлен на линиях A0-A3. Например, чтобы выбрать нулевой блок, нужно установить: $A_0 = A_1 = A_2 = A_3 = 0$.

При обращении к какому-либо блоку, его двоичный адрес устанавливается на адресной шине. Адрес дешифруется на материнской плате и разрешает прохождение сигналов только выбранного блока. В качестве дешифратора адреса применяются две микросхемы КР561КП2, которые являются мультиплексор-демультиплексорами и имеют 3-х разрядный адресный вход, восемь информационных входов и один выход. На выход микросхемы проходит тот из входных сигналов, номер которого совпадает с адресом, установленным на адресной шине. Так как в установке имеется 12 блоков, то применяются две такие микросхемы. На материнской плате M_1 к контактам X14-X17 подключены выходы X0-X3 микросхемы DD_1 . Аналогично, на материнской плате M_2 используются выходы X4-X7 микросхемы DD_1 , а на плате M_3 – выходы X0-X3 микросхемы DD_2 .

Плата питания и телеметрии (рис. 2.6), в свою очередь, необходима для обеспечения питанием материнские платы. На ней установлен высоковольтный преобразователь напряжения PHV 12-0.5k 1000p [70] на +400 В (для питания Г-М счётчиков) и преобразователь напряжения TEN 3-1211 [71] на +5 В для питания датчиков и прочих микросхем. Также плата питания и телеметрии коммутирует на материнские платы +12 В от интерфейсного блока.

Установки CARPET обеспечивают непрерывный сбор данных об атмосферном давлении и температуре, а также питающих напряжений +5 В, +12 В, +400 В со скажностью 1 с. Совокупность этих данных называется «телеметрия». Для измерения атмосферного давления и температуры использованы цифровые датчики BMP085 [72] и DS18B20 [73] соответственно. Для измерения напряжений использованы микросхемы 12-битных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) MCP3201: DD_7 – DD_9 [74].

Управление датчиками, АЦП и первичная обработка информации осуществляется микроконтроллером ATmega 168 (DD_{10}) [75]. Данные телеметрии передаются на ПК по RS-232 через интерфейсную микросхему MAX232 (DD_{12}) [76]. Кроме того, на материнскую плату поступают команды выбора режима (ALL-ONE) и адрес выбранного блока (для режима ONE).

Интерфейсный блок (рис. 2.7) используется для коммутации питающего напряжения +12 В на модули CARPET, приёма импульсов, их обработки (подсчёт числа импульсов за 1 мс) и передачу ненулевых данных на ПК: если за прошедшее время 1 мс по трём каналам (UP, LOW, TEL) установки зафиксирован нулевой темп счёта, то в целях экономии дискового пространства ПК, данные не передаются.

Для подсчёта импульсов на плате интерфейсного блока установлены микросхемы – однобайтовые счётчики DD_3 – DD_5 (ЭКФ1533ИЕ19), подключённые через регистры DD_6 – DD_8 (SN74ALS374ADW) к микроконтроллеру DD_9 (ATmega 168), который последовательно опрашивает счётчики и обнуляет их. Сообщение данных формируется микроконтроллером и отправляется на ПК по RS-232. Питающие напряжения +5 В (для питания электроники интерфейсного блока) и +12 В (для питания модуля CARPET) вырабатываются AC-DC-преобразователем напряжения TML 30252 (DD_{11}) [77].

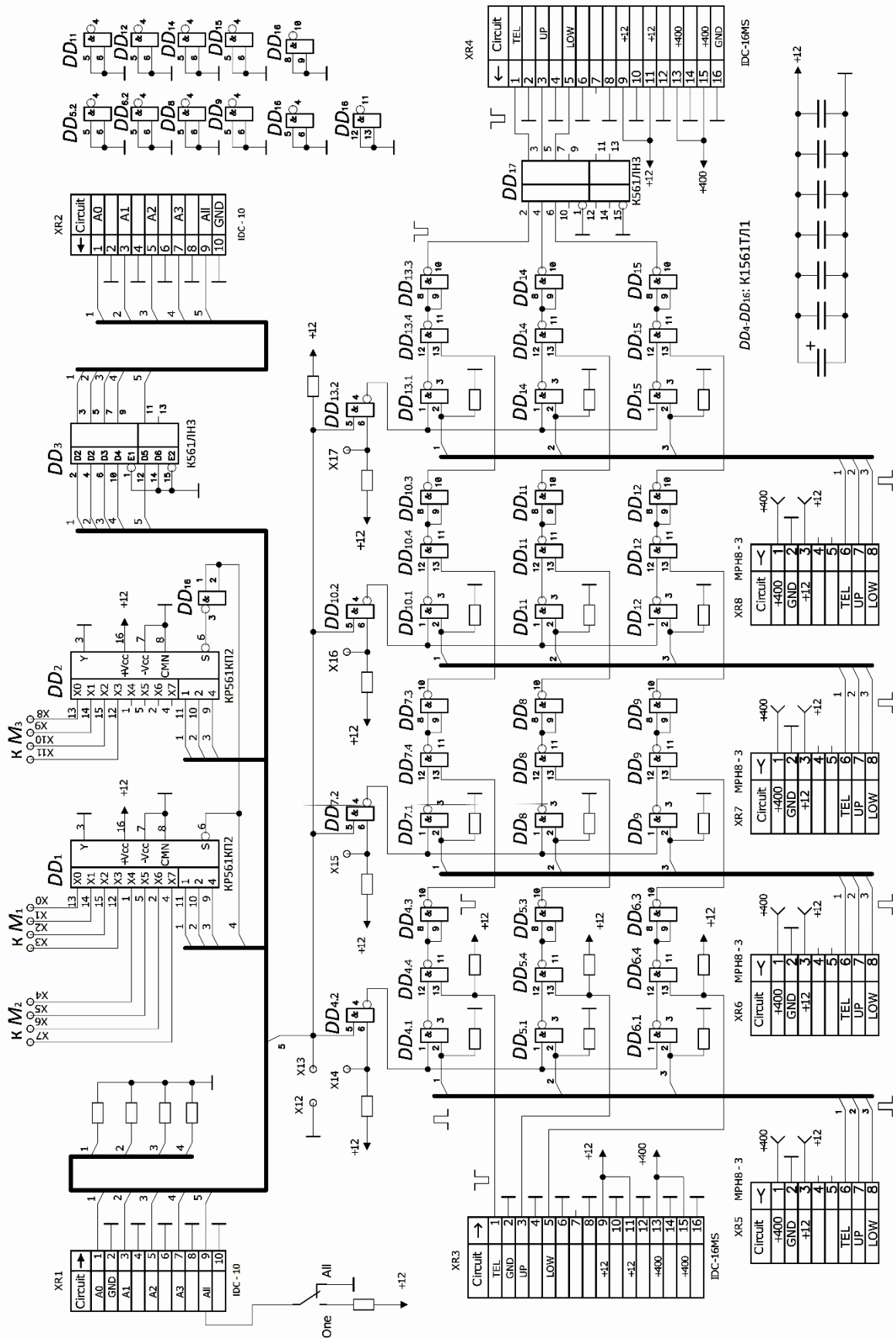


Рис. 2.5 – Принципиальная схема материнской платы установки CARPET.

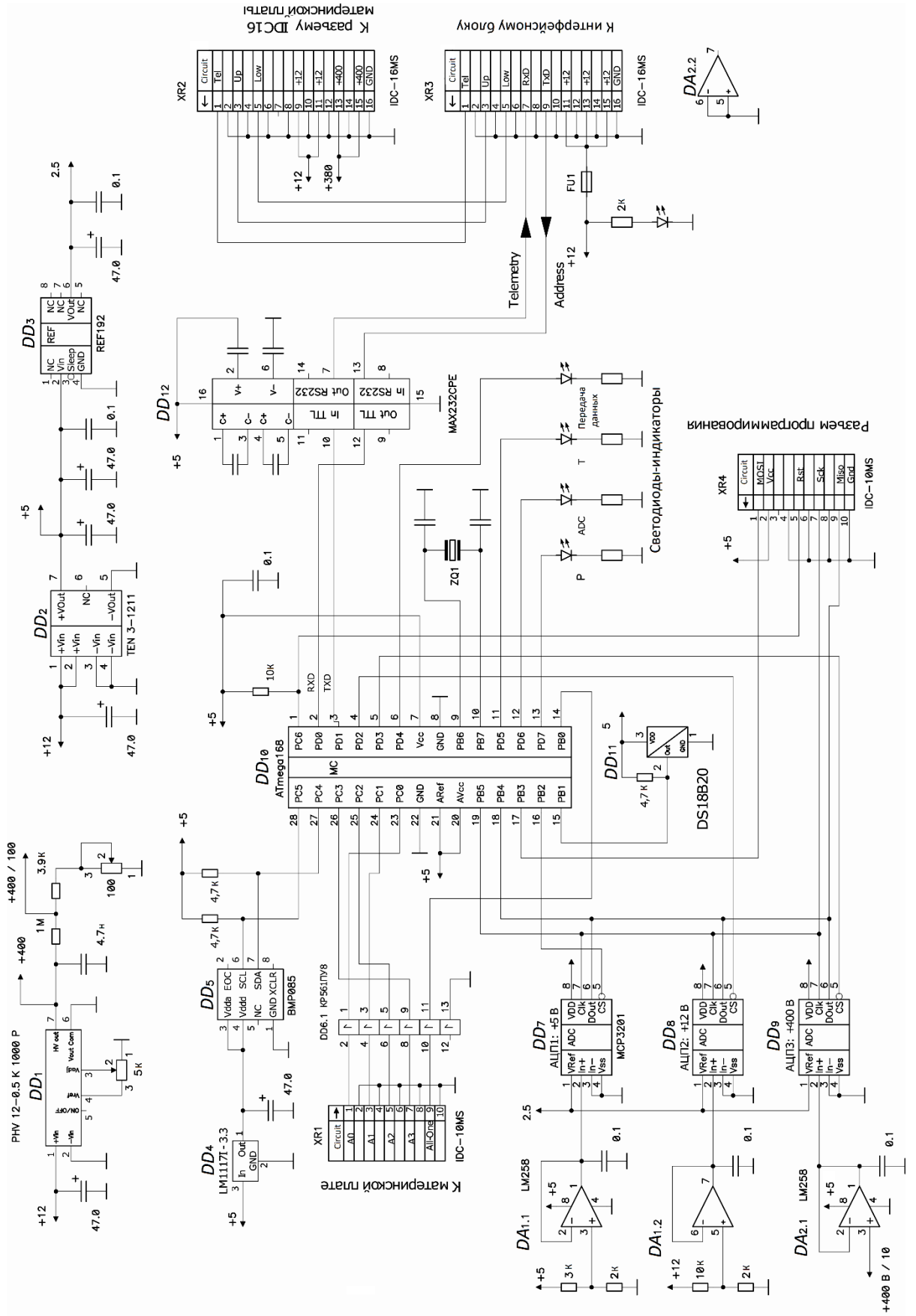


Рис. 2.6 – Принципиальная схема платы питания и телеметрии установки CARPET.

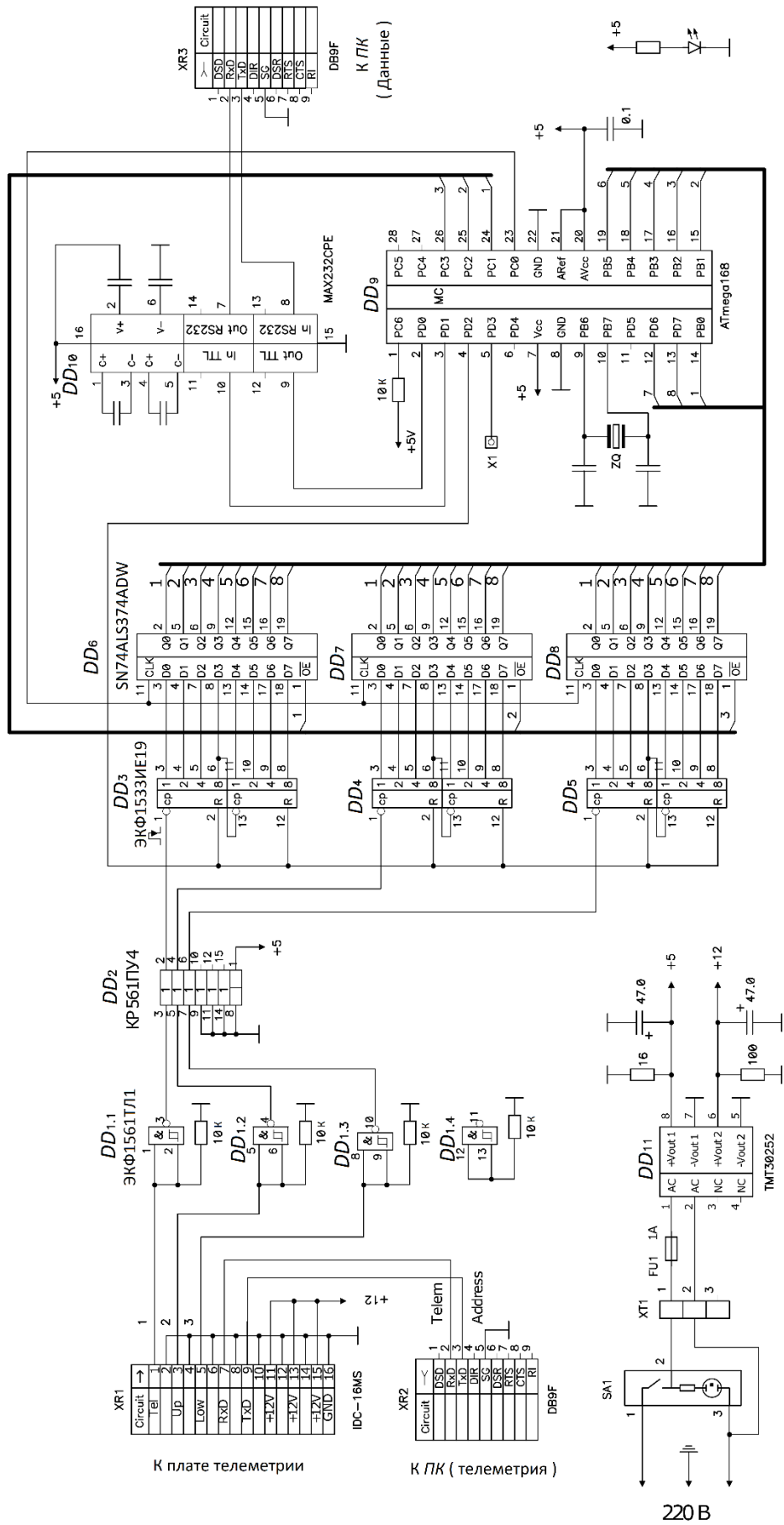


Рис. 2.7 – Принципиальная схема интерфейсной платы установки CARPET.

2.2 Протокол обмена данными между интерфейсным блоком установки CARPET и компьютером

2.2.1 Формат сообщения данных

Для получения данных и телеметрии от одного модуля CARPET используются два приёмопередатчика RS – 232 (COM-порт). Один порт для передачи данных, другой для передачи телеметрии.

Данные представляют собой совокупность сообщений, длиной 3 байта: по одному байту на счёт каждого из каналов (UP, LOW, TEL) за прошедшую миллисекунду.

2.2.2 Формат сообщения телеметрии

Сообщение телеметрии является последовательностью ASCII-символов (строкой), отправляемой раз в секунду.

«tel» temperature <SPACE> pressure <SPACE> voltage1 <SPACE> voltage2 <SPACE> voltage3 «end» <CR> <LF>

Значение полей:

- *<SPACE>* – пробел. Байт равен 0x20;
- *«tel»* – последовательность символов, флаг начала сообщения;
- *«temperature»* – температура внутри корпуса модуля CARPET, °C;
- *«pressure»* – атмосферное давление, кПа;
- *«voltage1»* – измеренное значение напряжения питания (+5 В), В;
- *«voltage2»* – измеренное значение напряжения питания (+12 В), В;
- *«voltage3»* – измеренное значение напряжения питания (+400 В), В;
- *«end»* – последовательность символов, флаг конца сообщения;
- *<CR>* – возврат каретки. Байт равен 0x0D;
- *<LF>* – перевод строки. Байт равен 0x0A.

2.2.3 Формат команд протокола выбора режима ALL-ONE

От ПК через интерфейсный блок по интерфейсу RS-232 (телеметрический канал) на плату телеметрии и питания поступают команды выбора режима ALL-ONE, а также, номер выбранного блока для режима ONE.

Команды, поступающие на плату телеметрии и питания от ПК являются однобайтовыми.

Общий вид команды:

$0B_6B_5B_4B_3B_2B_1B_0$, где B_i – i -й бит сообщения. Старший бит всегда является нулевым.

Команда изменения режима работы ALL – ONE:

$001B_4B_3B_2B_1B_0$.

Основной режим работы (ALL) включается при условии $B_4 = 0$. Комбинация битов B_0 – B_3 может быть произвольной.

Для запуска режима проверки (ONE), необходимо выставить $B_4 = 1$. Комбинацией битов B_0 – B_3 задаётся двоично-десятичный номер нужного блока (0-11).

Команда обрабатывается за время, не более 1с, после чего следует ответ, подтверждающий факт приёма:

«cmd @ ok» <0x0D> <0x0A>.

Команда запроса текущего режима работы:

$010B_4B_3B_2B_1B_0$.

Комбинация битов B_0 – B_4 может быть произвольной.

Команда обрабатывается установкой за время, не более 1с, после чего следует ответ, подтверждающий факт приёма:

«cmd» <SPACE> <Z> <SPACE> «ok» <0x0D> <0x0A>,

где

Z – ASCII-символ, несущий информацию о текущем режиме работы установки.

Z = «f» – основной режим работы.

Z = «0»-«b» – режим проверки. Передаваемое в виде ASCII-символа шестнадцатеричное число соответствует номеру включённого блока.

Для упрощения алгоритма, все незначимые биты приняты нулевыми. С учётом этого, приведена таблица команд (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Список команд протокола выбора режима ALL-ONE установки CARPET

Назначение команды	Отправляемый байт данных, бинарный код/ASCII-код	Ответ на команду
Запрос текущего режима работы	01000000 / «@»	См. 2.2.3
Все блоки включены	00100000 / SPACE	«cmd @ ok»<0x0D> <0x0A>

Назначение команды	Отправляемый байт данных, бинарный код/ASCII-код	Ответ на команду
Включён блок №0	00110000 / «0»	«cmd @ ok»<0x0D> <0x0A>
Включён блок №1	00110001 / «1»	«cmd @ ok»<0x0D> <0x0A>
Включён блок №2	00110010 / «2»	«cmd @ ok»<0x0D> <0x0A>
Включён блок №3	00110011 / «3»	«cmd @ ok»<0x0D> <0x0A>
Включён блок №4	00110100 / «4»	«cmd @ ok»<0x0D> <0x0A>
Включён блок №5	00110101 / «5»	«cmd @ ok»<0x0D> <0x0A>
Включён блок №6	00110110 / «6»	«cmd @ ok»<0x0D> <0x0A>
Включён блок №7	00110111 / «7»	«cmd @ ok»<0x0D> <0x0A>
Включён блок №8	00111000 / «8»	«cmd @ ok»<0x0D> <0x0A>
Включён блок №9	00111001 / «9»	«cmd @ ok»<0x0D> <0x0A>
Включён блок №10	00111010 / «:»	«cmd @ ok»<0x0D> <0x0A>
Включён блок №11	00111011 / «;»	«cmd @ ok»<0x0D> <0x0A>

2.2.4 Программное обеспечение установки CARPET

Программное обеспечение CARPET monitor разработано для ОС Windows. Оно служит для приёма по двум каналам RS-232 данных и телеметрии (рис.2.8).

Программа позволяет в реальном времени отображать на экране темп счёта по 3 каналам прибора, либо телеметрическую информацию (рис. 2.8). Необходимый режим визуализации выбирается переключателем в окне программы. Для удобства пользователя доступны несколько различных времён интегрирования. Следует заметить, что выбор времени интегрирования в меню программы не влияет на сохраняемые в файлах данные.

Также реализован режим поблочной проверки установки CARPET: программа последовательно включает каждый блок в отдельности, чередуя этот процесс с включением полного комплекта блоков детекторов. Таким образом происходит диагностика каждого блока по трём каналам данных.

В настройках программы (рис. 2.9) возможно выбрать число подключаемых блоков (1 или 2) и параметры используемых СОМ-портов (рис. 2.10). Суточные файлы данных и телеметрии формируются с помощью ПО. Каждому событию (данные трёх каналов за прошедшие 1 мс или сообщение телеметрии) присваивается временная метка,

формирующаяся согласно системному времени ПК, которое соответствует времени прихода данных.



Рис. 2.8 – Интерфейс программы CARPET Monitor: верхняя панель – режим отображения данных, нижняя панель – режим отображения телеметрии.

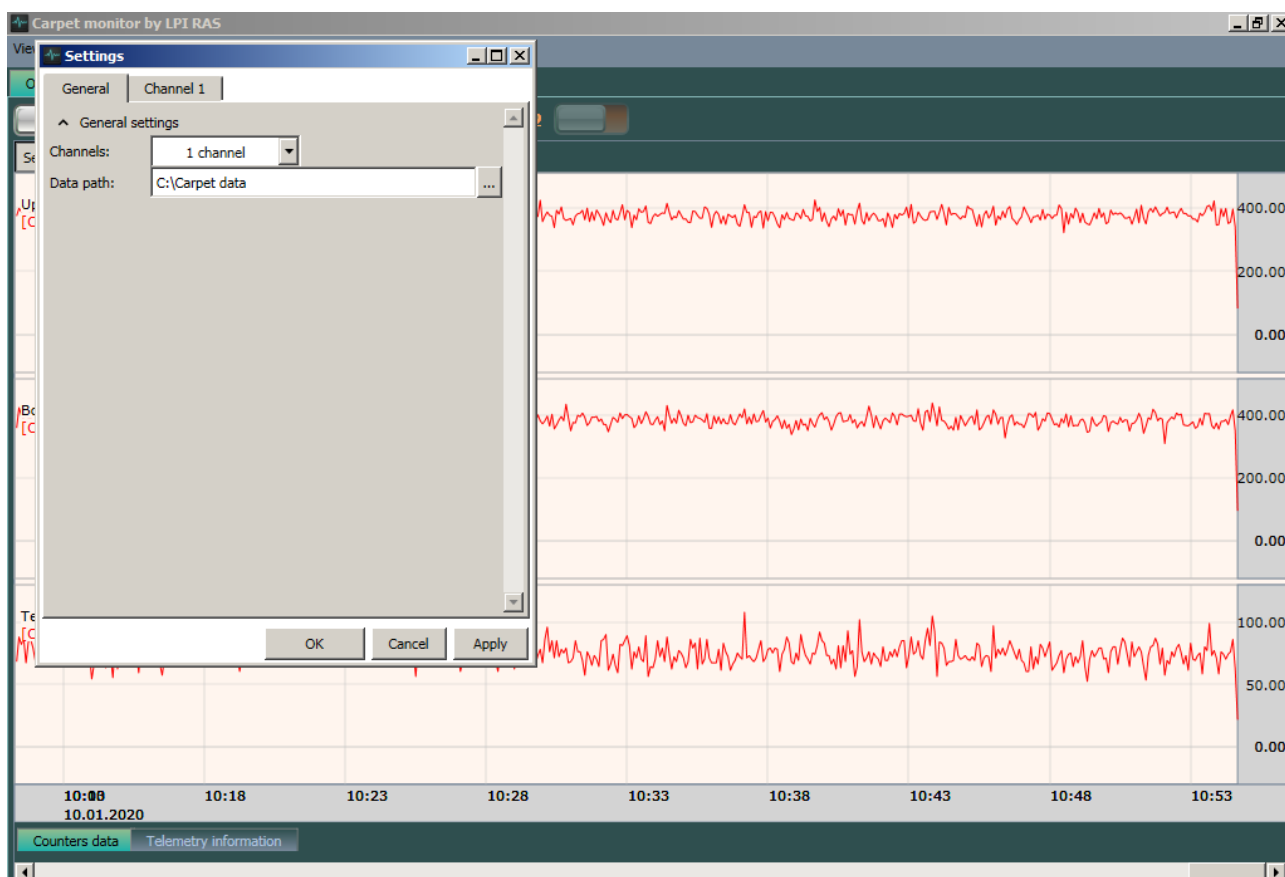


Рис. 2.9 – Окно настроек программы CARPET Monitor.

Настройка каждого канала данных производится на закладках «Channel» с соответствующим индексом (рис. 2.10). Можно указать цвет графика, название канала и соответствующие настройки приёмопередатчиков для приёма данных и телеметрии. Поле «Chart color» определяет цвет графиков для соответствующего канала. Поле «Chart legend» определяет подпись над графиком.

Разделы «Data serial settings» и «Telemetry serial settings» предназначены для настройки приёмопередатчиков. Для каждого порта задаётся следующий набор параметров из списков допустимых параметров:

- «COM port» – номер порта, отвечающий за приём соответствующих данных;
- «Port speed» – скорость порта (115200 для данных, 9600 для телеметрии);
- «Parity» – чётность (по умолчанию: None);
- «Data bits» – количество битов данных (по умолчанию: 8);
- «Stop bits» – количество стоповых битов данных (по умолчанию: 1);
- «Handshake» – параметр способа установки соединения (по умолчанию: None).

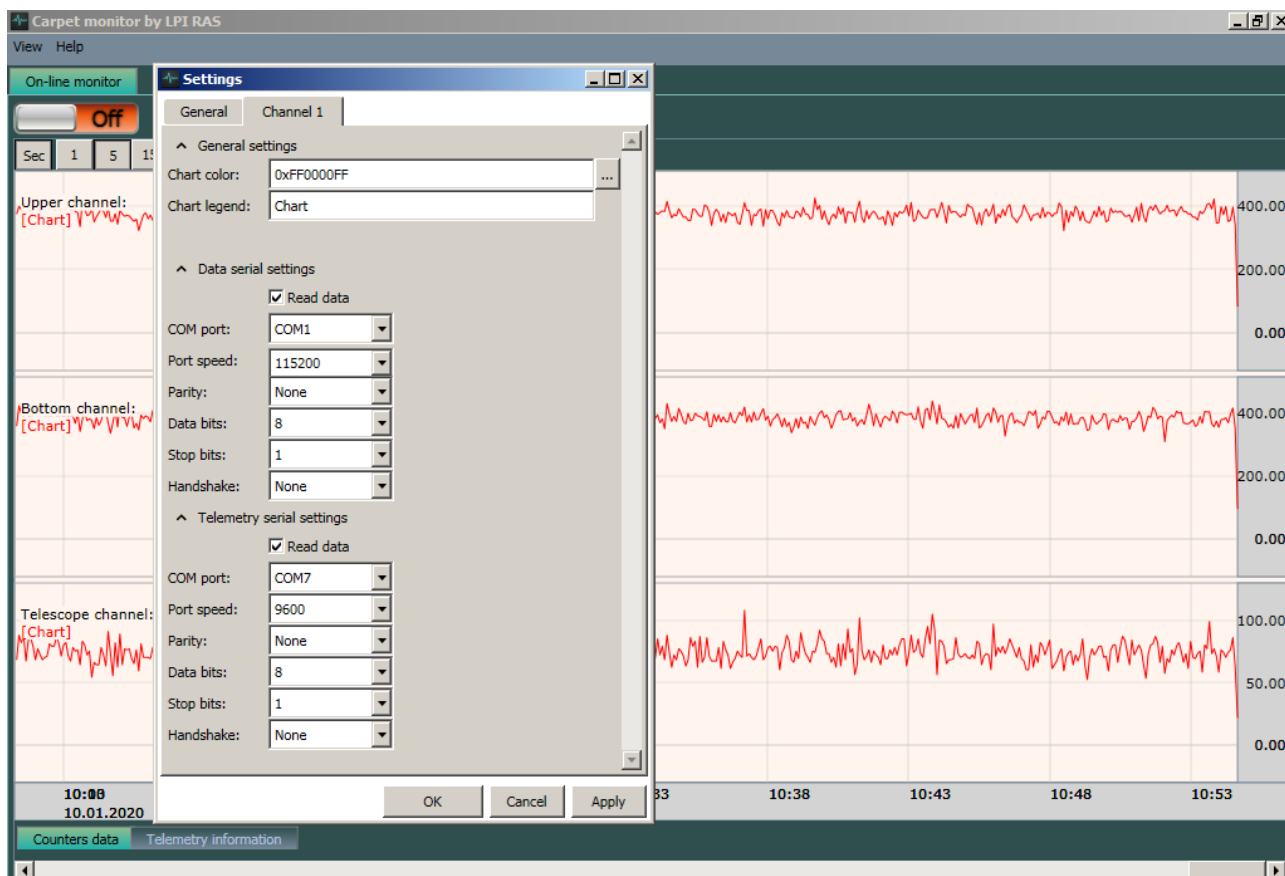


Рис. 2.10 – Окно настройки COM-портов программы CARPET Monitor.

Для начала получения и записи данных следует нажать кнопку «Connect» на закладке «On-line monitor». Программа произведёт подключение и начнёт сбор данных. Данные на графиках закладки «On-line monitor» будут обновляться в реальном времени по мере получения данных.

Для хранения данных и телеметрии используются независимые текстовые файлы, которые помещаются в единую директорию. Каждые сутки создаётся новая директория и файлы данных. Имя директории соответствует дате её создания (например, «2019.01.01» - 01 января 2019 г.). Имена текстовых файлов присваиваются следующим способом:

- «2019-01-01-ch0.txt» – файл данных для модуля CARPET 0;
- «2019-01-01-ch0-tm.txt» – файл телеметрии для модуля CARPET 0.

2.3 Точность детектирования потоков КЛ установкой CARPET

Верхние и нижние счётчики каждого блока детекторов (рис. 2.3) объединены между собой. Все верхние и все нижние счётчики от различных блоков объединены по «ИЛИ» электроникой прибора. Длительность импульса, считываемого (через конденсатор) со счётчика СТС-6 ~ 1 мс (рис. 2.11, верхняя панель, синяя линия). После прохождения через

RC-цепочку длительность импульса сокращается до $\Delta t \approx 10$ мкс (рис. 2.11, верхняя панель, жёлтая линия).

Ошибки счёта могут возникать при объединении близких по времени импульсов от различных счётчиков, включённых по «ИЛИ» в единый импульс. Также данная ошибка может возникнуть, если разряд в счётчике не успел погаснуть между появлениями двух близких по времени импульсов (рис. 2.11, центральная и нижняя панели). На графике (центральная панель) показано, что напряжение на счётчике не успело полностью восстановиться между импульсами, однако данные импульсы имеют достаточную амплитуду и будут распознаны электроникой. На графике (нижняя панель) показаны 2 импульса со счётчика, практически совпавшие по времени (небольшой перегиб, вызванный вторым импульсом обведён красным кругом). Данные импульсы будут посчитаны некорректно, как один импульс.

За условие появления ошибки принято наличие в детектирующем канале (UP или LOW) двух или более импульсов за время, равное удвоенной длительности одного импульса ($\tau = 2\Delta t$). Ниже приведена оценка вероятности такого события.

Средний темп счёта модуля CARPET-МОСКВА для каналов UP и LOW: $N_{\text{cp}} \approx 100 \text{ с}^{-1}$.

Математическое ожидание количества частиц за время $\tau = 20$ мкс:

$$\mu = N_{\text{cp}}\tau. \quad (2.1)$$

Распределение Пуассона:

$$P(x) = \frac{(\mu)^x}{x!} e^{-\mu} = \frac{(N_{\text{cp}}\tau)^x}{x!} e^{-N_{\text{cp}}\tau}, \quad (2.2)$$

где: x – число частиц;

$P(x)$ – вероятность появления x частиц в течение интервала времени τ .

Вероятность детектирования нулевого числа частиц за время τ :

$$P(x = 0) = e^{-N_{\text{cp}}\tau},$$

$$P(x = 0) \approx 0,99800.$$

Вероятность детектирования одной частицы за время τ :

$$P(x = 1) = \frac{(N_{\text{cp}}\tau)^1}{1!} e^{-N_{\text{cp}}\tau} = N_{\text{cp}}\tau e^{-N_{\text{cp}}\tau},$$

$$P(x = 1) \approx 0,00199.$$

Вероятность детектирования двух и более частиц за время τ :

$$P(x \geq 2) = 1 - P(x = 0) - P(x = 1),$$

$$P(x \geq 2) \approx 0,0001.$$

Следовательно, вероятность детектирования двух и более частиц за время τ пренебрежимо мала.

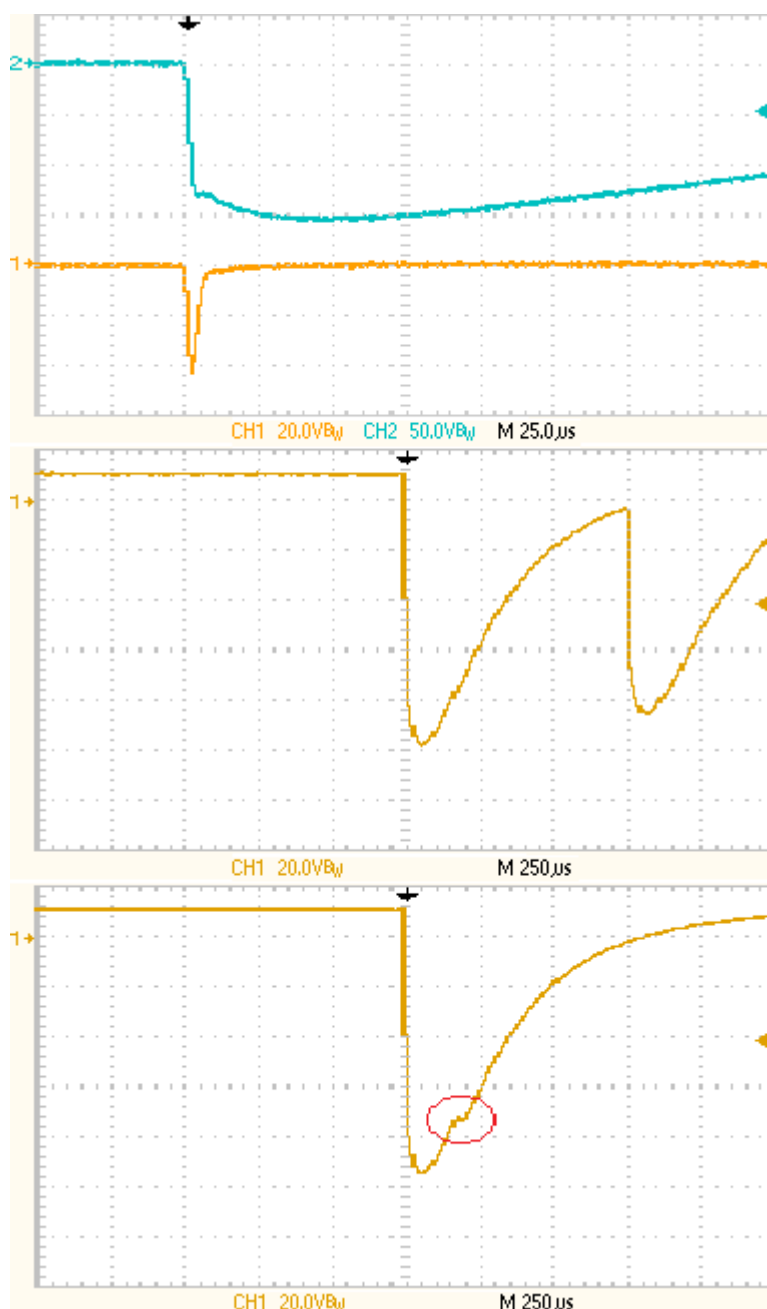


Рис. 2.11 – Осциллограммы, полученные с газоразрядных счётчиков СТС-6, используемых в установке CARPET. Верхняя панель: импульс от счётчика СТС-6 (синяя линия), импульс от счётчика СТС-6 после прохождения через RC-цепочку (жёлтая линия). Средняя и нижняя панели: примеры наложения близлежащих во времени импульсов.

2.4 Расчёт барометрического коэффициента для установок CARPET

Установки CARPET являются детекторами вторичных КЛ, которые рождаются в атмосфере Земли при взаимодействии первичных КЛ с ядрами воздуха. При этом,

существует зависимость вариации вторичных КЛ от метеорологических параметров (температура и давление). В данном разделе рассмотрено влияние барометрического эффекта на темп счёта установок CARPET, который обусловлен поглощением КЛ слоем воздуха над прибором.

На рис. 2.12 – 2.13 приведены графики темпов счёта за час одиночных каналов (UP и LOW) установок CARPET-МОСКВА по данным 2019 года. Графики близко повторяют друг друга, что свидетельствует об исправности установки в целом. Видно, что отдельные пики достигают величин порядка 4%, однако исходные данные не учитывают влияние метеорологических эффектов, которые могут быть иметь сопоставимое или даже большее влияние, чем истинные вариации КЛ [1].

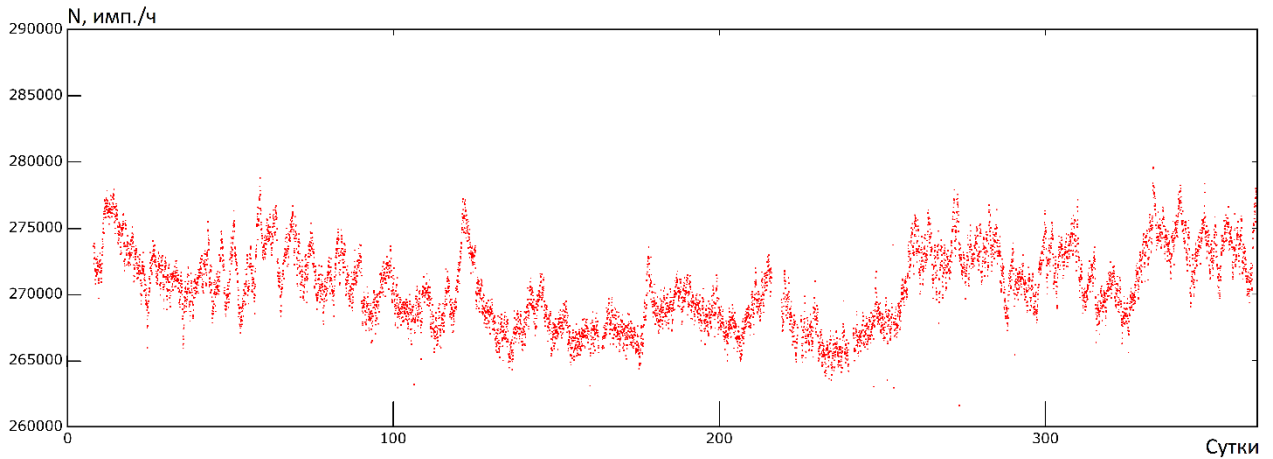


Рис. 2.12 – График темпа счёта канала UP установки CARPET-МОСКВА по данным за 2019 г.

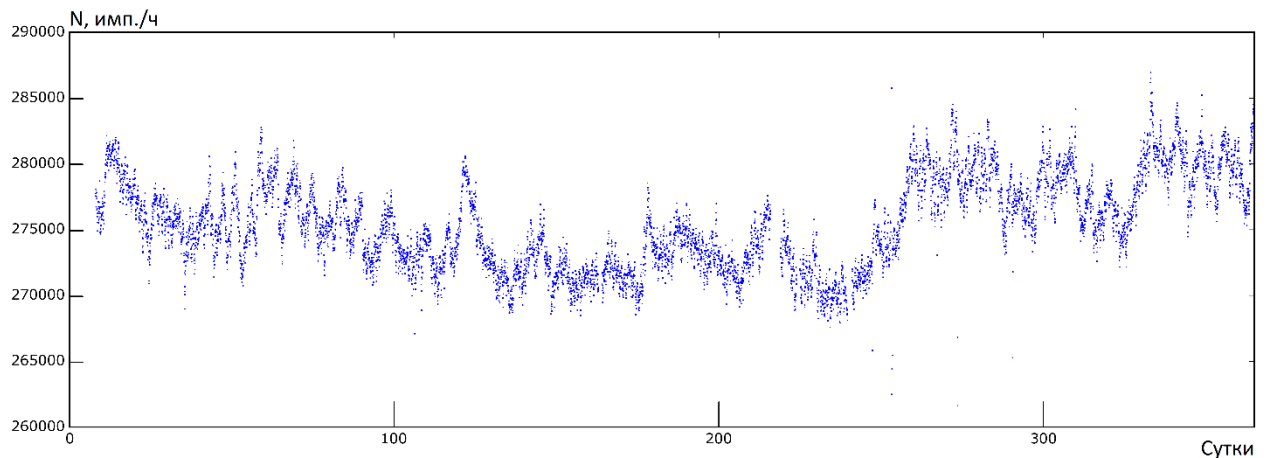


Рис. 2.13 – График темпа счёта канала LOW установки CARPET-МОСКВА по данным за 2019 г.

Наличие отрицательного барометрического эффекта установок CARPET можно продемонстрировать по графикам на рис. 2.14, где приведены часовые данные в канале TEL установки CARPET-МОСКВА (красная кривая) и атмосферное давление (синяя кривая).

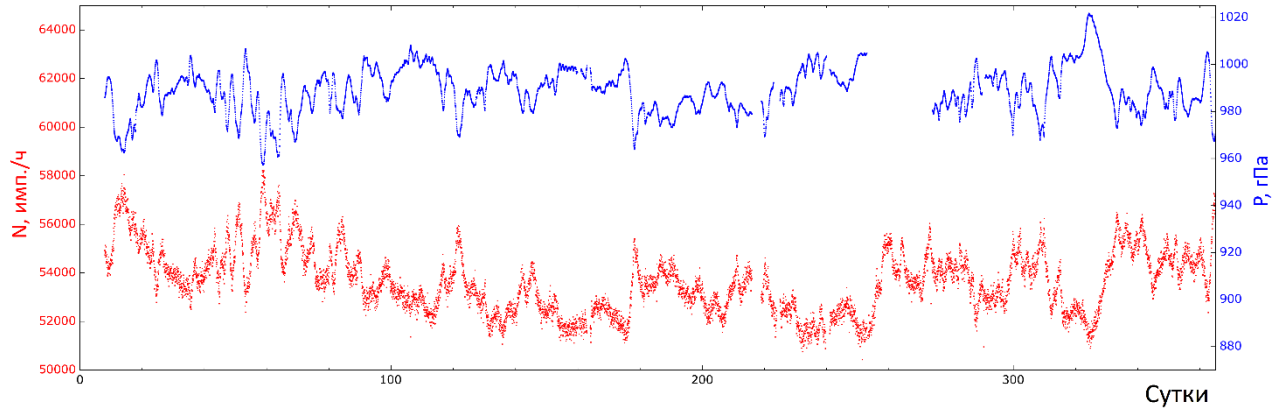


Рис. 2.14 – Графики темпа счёта канала TEL установки CARPET-МОСКВА (красная кривая) и атмосферного давления (синяя кривая) за 2019 г.

Барометрический эффект может быть выражен уравнением (2.3) [55, 69, 78-80]

$$\frac{N}{N_0} = e^{\beta \Delta P}, \quad (2.3)$$

где

N – темп счёта установки CARPET [импульсов/ч];

N_0 – средний (стандартный) часовой темп счёта [импульсов/ч] установки CARPET;

ΔP – абсолютное отклонение атмосферного давления от средней величины [гПа];

β – барометрический коэффициент [%/гПа].

Уравнение (2.3) приближённо может быть записано в виде (2.4)

$$\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)_P \cong \beta \Delta P, \quad (2.4)$$

где

$\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)_P$ – относительное отклонение темпа счёта установки CARPET;

$\Delta N = N - N_0$;

$\Delta P = P - P_0$;

P_0 – среднее (стандартное) атмосферное давление [гПа] за период проведения измерений;

P – текущее атмосферное давление [гПа].

Для канала TEL было проведено исследование зависимости вариаций темпа счёта N установок CARPET от атмосферного давления P . По исходным данным были получены средние скорости счёта за час установок N_0 [импульсов/ч]. Далее, для определения барометрической зависимости, из массива часовых данных были отобраны данные, удовлетворяющие неравенству:

$$\begin{cases} |\Delta N| \leq 5000 \\ |\Delta P| \leq 30. \end{cases} \quad (2.5)$$

Значения констант в уравнении (2.5) подобраны таким образом, чтобы исключить из анализа данные, характеризующиеся резкими изменениями темпа счёта и давления, которые, возможно, являются следствием аппаратных сбоев установки. Например, отключения питания.

Для нахождения барометрического коэффициента β необходимо определить линейную зависимость между $\frac{\Delta N}{N_0}$ и ΔP (рис. 2.15),

Средние значения темпа счёта и давления установки CARPET-МОСКВА за 2019-2020 гг.:

$$N_0 = 53577,38 \text{ импульсов/ч}, \sigma_N = 1820,56 \text{ импульсов/ч};$$

$$P_0 = 989,26 \text{ гПа}, \sigma_P = 9,90 \text{ гПа}.$$

Средние значения темпа счёта и давления установки CARPET-ASTANA 0 за 2019-2020 гг.:

$$N_0 = 58246,49 \text{ импульсов/ч}, \sigma_N = 1766,13 \text{ импульсов/ч};$$

$$P_0 = 977,33 \text{ гПа}, \sigma_P = 9,82 \text{ гПа}.$$

Средние значения темпа счёта и давления установки CARPET-ASTANA 1 2019-2020 гг.:

$$N_0 = 55403,37 \text{ импульсов/ч}, \sigma_N = 2927,79 \text{ импульсов/ч};$$

$$P_0 = 974,18 \text{ гПа}, \sigma_P = 9,62 \text{ гПа}.$$

По методу наименьших квадратов [81] определяется аппроксимирующая прямая, угловой коэффициент которой равен искомому β .

Барометрический коэффициент β для установки CARPET-МОСКВА был определён по данным за июнь 2019 года, а для установок CARPET-ASTANA по данным за декабрь 2019 года. На указанных временных отрезках коэффициент детерминации R^2 принимает наибольшие значения.

CARPET-МОСКВА:

$$\beta = -0,1864 \pm 0,0024\%/гПа; \text{ коэффициент детерминации } R^2 = 0,8975.$$

CARPET-ASTANA 0:

$\beta = -0,1943 \pm 0,0026\%/гПа$; коэффициент детерминации $R^2 = 0,8823$.

CARPET-ASTANA 1:

$\beta = -0,1885 \pm 0,0027\%/гПа$; коэффициент детерминации $R^2 = 0,8707$.

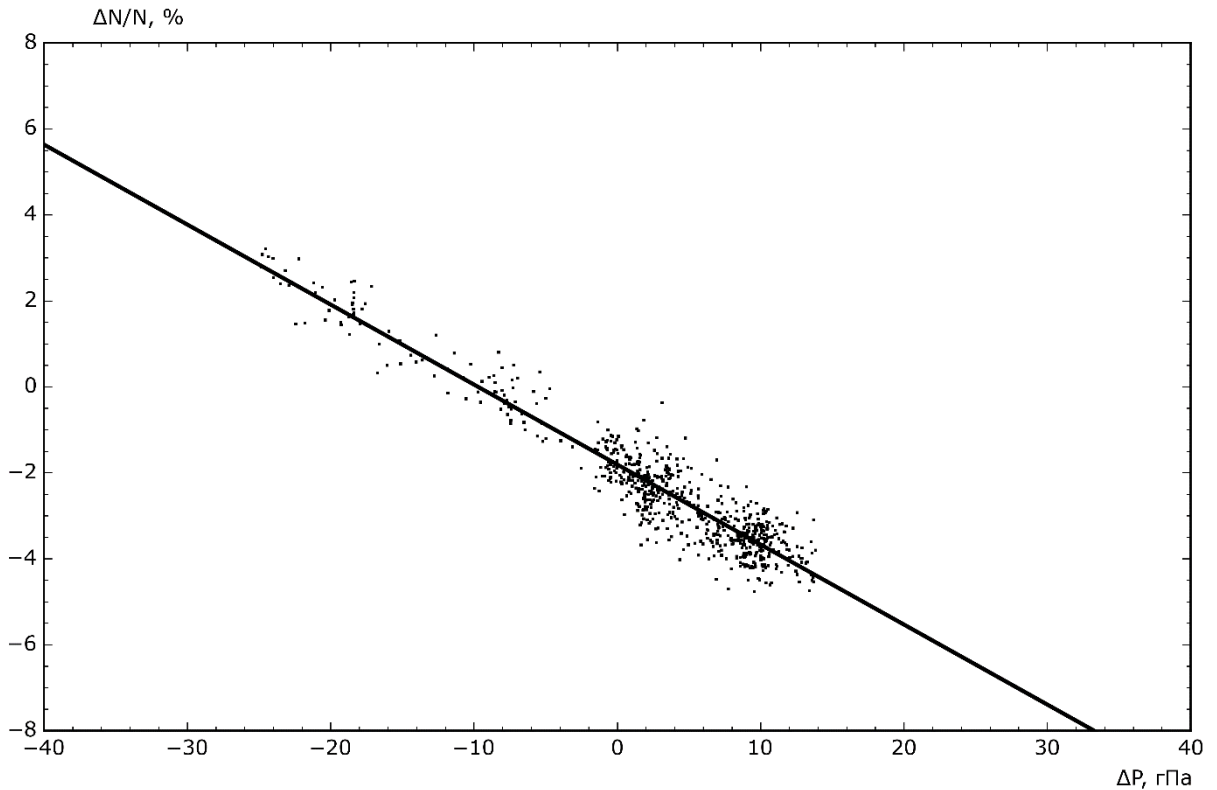


Рис. 2.15 – График зависимости $\Delta N/N_0$ от ΔP для установки CARPET-МОСКВА по данным за июнь 2019 г.

Коэффициент детерминации, рассчитан по следующей формуле (2.6):

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{\Delta N}{N_0} \right)_i - (\beta \Delta P_i + c) \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{\Delta N}{N_0} \right)_i - \overline{\left(\frac{\Delta N}{N_0} \right)} \right)^2}, \quad (2.6)$$

где

SS_{res} – сумма квадратов остатков регрессии;

SS_{tot} – общая сумма квадратов;

$\overline{\left(\frac{\Delta N}{N_0} \right)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta N}{N_0} \right)_i$ – среднее значение величины $\frac{\Delta N}{N_0}$;

c – свободный член уравнения аппроксимирующей прямой (рис. 2.15).

Погрешность σ_β барометрического коэффициента β рассчитана по формуле [82]:

$$\sigma_{\beta} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \left(\frac{D\left[\frac{\Delta N}{N_0}\right]}{D[\Delta P]} - \beta^2 \right)}, \quad (2.7)$$

где

$$D\left[\frac{\Delta N}{N_0}\right] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)_i - \overline{\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)} \right)^2 - \text{дисперсия величины } \frac{\Delta N}{N_0};$$

$$D[\Delta P] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta P_i - \overline{\Delta P})^2 - \text{дисперсия величины } \Delta P;$$

$$\overline{\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)_i - \text{среднее значение величины } \frac{\Delta N}{N_0};$$

$$\overline{\Delta P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta P_i - \text{среднее значение величины } \Delta P.$$

Из соотношения (2.4), получается формула учёта барометрического эффекта для канала TEL установки CARPET:

$$N_{PC} = N - \beta N_0 \Delta P, \quad (2.8)$$

где

N_{PC} – темп счёта [импульсов/ч] установки CARPET для данных, учитывающих барометрический эффект.

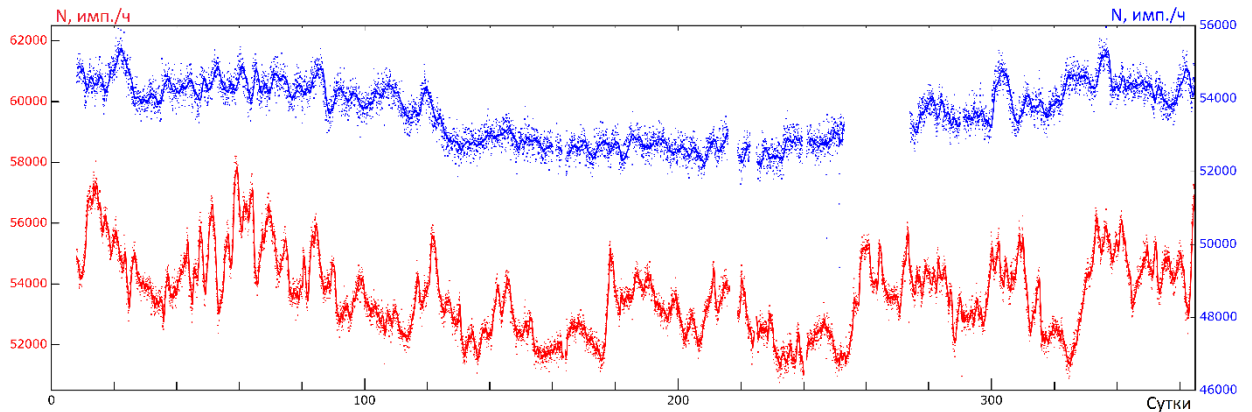


Рис. 2.16 – Графики темпа счёта канала TEL установки CARPET-МОСКВА за 2019 год: красная кривая – исходные данные, синяя кривая – данные с учётом барометрического эффекта.

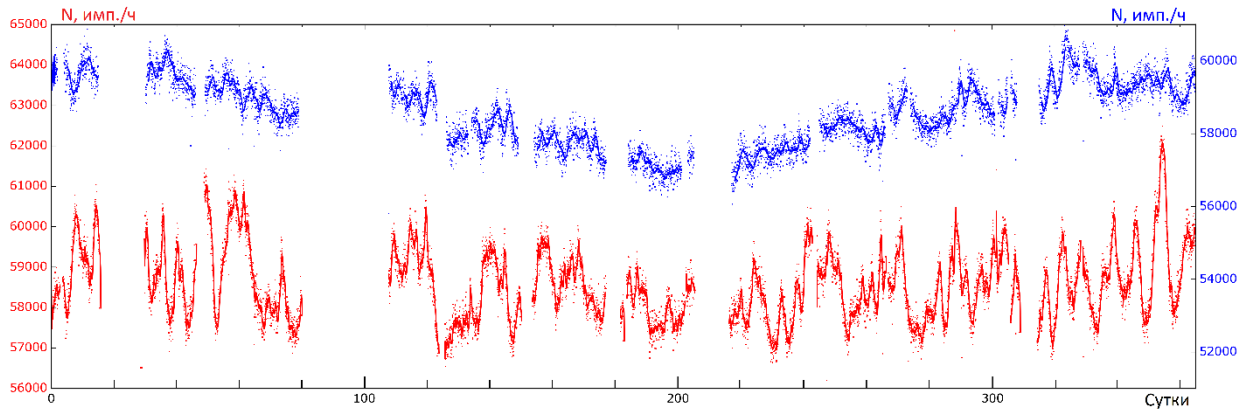


Рис. 2.17 – Графики темпа счёта канала TEL установки CARPET-ASTANA 0 за 2019 год: красная кривая – исходные данные, синяя кривая – данные с учётом барометрического эффекта.

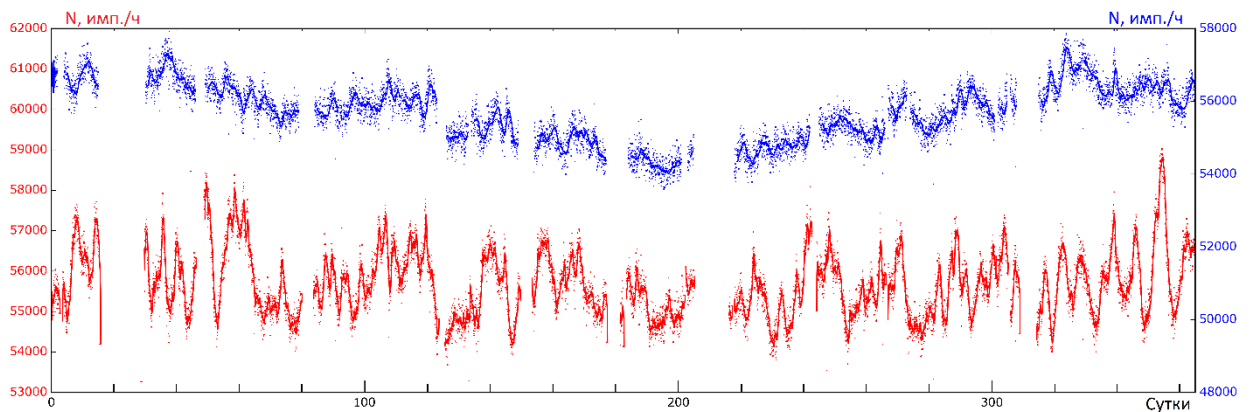


Рис. 2.18 – Графики темпа счёта канала TEL установки CARPET-ASTANA 1 за 2019 год: красная кривая – исходные данные, синяя кривая – данные с учётом барометрического эффекта.

На рис. 2.16 – 2.18 (красная линия) приведены исходные данные темпа счёта установок CARPET. Данные поправленного на давление темпа счёта установок показаны синей кривой.

Сравним среднеквадратичные отклонения исходных данных (σ_N) со среднеквадратичным отклонением данных, учитывающих барометрический эффект ($\sigma_{N_{PC}}$) за 2019-2020 гг. для установок CARPET-МОСКВА и CARPET-ASTANA 0-1 (таблица 2.2). Как видно, для данных, полученных на установке CARPET-МОСКВА, отношение среднеквадратичного отклонения данных с учётом барометрического эффекта к исходным данным ($\sigma_{N_{PC}}/\sigma_N$) равно 0,82 что свидетельствует о корректности метода, а также, значимости барометрического эффекта относительно вариаций первичных КЛ. Для

установок CARPET-ASTANA 0 и 1 соотношение $\sigma_{N_{PC}}/\sigma_N$ равно 0,99, что является следствием меньшего объёма накопленных данных за указанный период времени (n , число измерений темпа счёта за время 1 час), а также, вероятно большего влияния температурного эффекта для установок CARPET-ASTANA.

Таблица 2.2 – Среднеквадратичные отклонения для установок CARPET по данным за 2019-2020 гг.

Установка	σ_N , импульсов/ч	$\sigma_{N_{PC}}$, импульсов/ч	$\sigma_{N_{PC}}/\sigma_N$	n
CARPET-МОСКВА	1820,56	1490,39	0,82	15942
CARPET-ASTANA 0	1766,13	1754,53	0,99	13382
CARPET-ASTANA 1	2927,79	2913,70	0,99	13958

2.5 Расчёт температурного коэффициента для установок CARPET

Мюонной компоненте вторичных КЛ свойственен существенный температурный эффект, для исключения которого необходимо проводить аэрологическое зондирование вблизи установок. Температурный эффект состоит из двух компонентов: отрицательный и положительный. Отрицательный температурный эффект связан с уменьшением потоков мюонов при нагревании и расширении атмосферы. Положительный температурный эффект связан с появлением дополнительных мюонов, вследствие уменьшения плотности атмосферы и, в связи с этим, уменьшения вероятности взаимодействия заряженных пионов и каонов с ядрами воздуха. При этом увеличивается вероятность распадов заряженных пионов и каонов и появления дополнительных мюонов [79].

Для оценки температурного эффекта были использованы данные канала TEL установки CARPET–МОСКВА за 2019 – 2020 гг. Высотные профили температуры и давления были определены по экспериментальным данным Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО; Долгопрудный).

Температурный эффект был определён двумя способами, в основе которых взяты метод эффективного уровня генерации мюонов и интегральный метод [84].

Чтобы исключить из исходных данных (рис. 2.19а) CARPET–МОСКВА вариации, полученные вследствие барометрического эффекта, в данные была введена поправка по формуле 2.7. На рис. 2.19б приведены поправленные на давление данные, которые

используются в расчётах. На графике видно, что барометрическая поправка, в основном, компенсирует суточные вариации темпа счёта. Температурный эффект оказывает влияние на годовую волну.

2.5.1 Метод эффективного уровня генерации

Метод эффективного уровня генерации основан на предположении, что мюоны, в основном, генерируются на определённом изобарическом уровне, который обычно принимается равным 100 гПа. Высота H данного уровня зависит от температурного режима атмосферы. Отклонение темпа счёта установки, таким образом, зависит от изменения высоты уровня генерации ΔH и изменения температуры этого слоя воздуха [84-86]:

$$\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)_T = \alpha_H \Delta H + \alpha_T \Delta T \quad (2.9)$$

где

$\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)_T$ – относительное отклонение темпа счёта установки CARPET;

ΔH – абсолютное отклонение высоты эффективного уровня генерации от среднего за исследуемый период [км];

α_H – отрицательный температурный коэффициент (коэффициент распада), связанный с вариацией высоты эффективного уровня генерации [%/км];

ΔT – абсолютное отклонение температуры слоя воздуха от среднего за исследуемый период [°C];

α_T – положительный температурный коэффициент, связанный с вариацией температуры на высоте эффективного уровня генерации [%/°C].

Запуск аэрологических зондов ЦАО осуществляется ежедневно, примерно в 11:30 и 23:30 UTC. Полёт длится, в среднем, около 1,5 часа, поэтому из имеющихся данных установки CARPET–МОСКВА, была сделана выборка часовых данных с 12:00 до 13:00 UTC и 00:00 до 01:00 UTC.

Для расчёта вклада отрицательной компоненты температурного эффекта, была определена линейная зависимость между $\frac{\Delta N}{N_0}$ и ΔH (рис. 2.20),

где

$$\Delta N = N_{PC} - N_0;$$

$$\Delta H = H - H_0;$$

Для установки CARPET-МОСКВА:

$$N_0 = 53577,38 \text{ импульсов/ч}, \sigma_N = 1820,56 \text{ импульсов/ч};$$

$$H_0 = 16,10 \text{ км}, \sigma_H = 0,36 \text{ км}.$$

По методу наименьших квадратов получена аппроксимирующая прямая, угловой коэффициент которой равен α_H .

$$\alpha_H = -4,00684 \pm 0,0652\%/км; \text{ коэффициент детерминации } R^2 = 0,8191.$$

Тогда поправленные на отрицательный температурный эффект данные определяются уравнением (рис. 2.20в):

$$N_{НРС} = N_{РС} - \alpha_H N_0 \Delta H, \quad (2.10)$$

где

$N_{РС}$ – темп счёта [импульсов/ч] установки CARPET с введённой барометрической поправкой.

$N_{НРС}$ – темп счёта [импульсов/ч] установки CARPET с введённой отрицательной температурной поправкой.

Так как величина ΔH измеряется всего 2 раза в сутки, промежуточные значения были получены линейной интерполяцией данных зондирования.

Для расчёта вклада положительной компоненты температурного эффекта, была определена линейная зависимость между $\frac{\Delta N}{N_0}$ и ΔT (рис. 2.20),

где

$$\Delta N = N_{НРС} - N_0;$$

$$\Delta T = T - T_0;$$

$$T_0 = -56,97 \text{ }^\circ\text{C}, \sigma_T = 6,00 \text{ }^\circ\text{C}.$$

По методу наименьших квадратов была определена аппроксимирующая прямая, угловой коэффициент которой равен α_T .

$$\alpha_T = 0,0080 \pm 0,0038\%/^\circ\text{C}; \text{ коэффициент детерминации } R^2 = 0,0049.$$

Согласно графику на рис. 2.21, положительный температурный эффект практически отсутствует. Данная поправка учитывается аналогично отрицательной:

$$N_{ТНРС} = N_{НРС} - \alpha_T N_0 \Delta T, \quad (2.11)$$

где

$N_{ТНРС}$ – темп счёта [импульсов/ч] установки CARPET с введённой положительной температурной поправкой.

На рис. 2.19г приведены данные темпа счёта установки CARPET-МОСКВА, с учётом как отрицательного, так и положительного температурного эффекта.

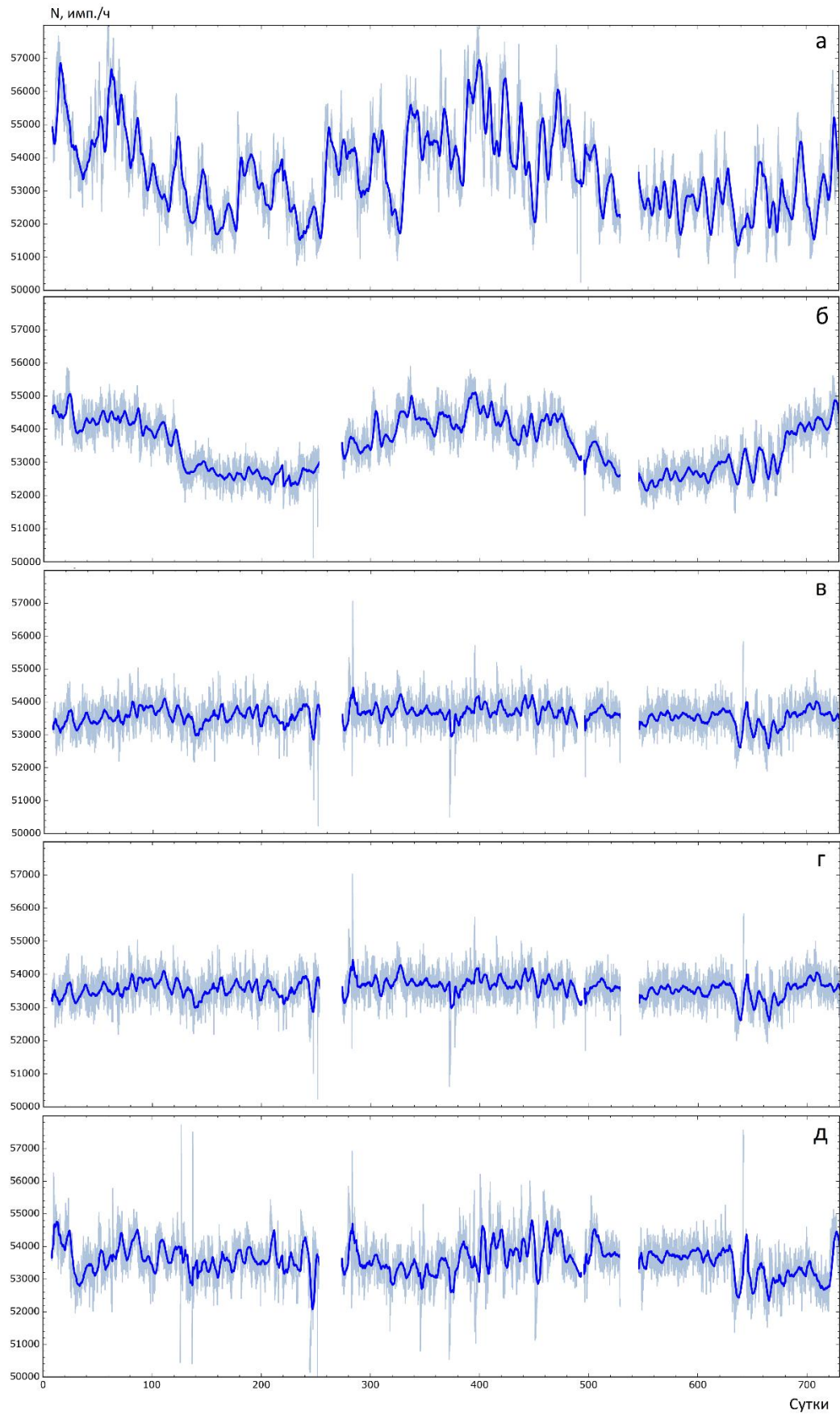


Рис. 2.19 – Графики темпа счёта в канале TEL установки CARPET–МОСКВА по данным за 2019-2020 гг.: исходные часовые данные (а), темп счёта с барометрической

поправкой (б), темп счёта с барометрической поправкой и температурной поправкой (без учёта положительного температурного эффекта) по методу эффективного уровня генерации (в), темп счёта с барометрической поправкой и температурной поправкой (с учётом положительного температурного эффекта) по методу эффективного уровня генерации (г), темп счёта с барометрической поправкой и температурной поправкой по интегральному методу (д).

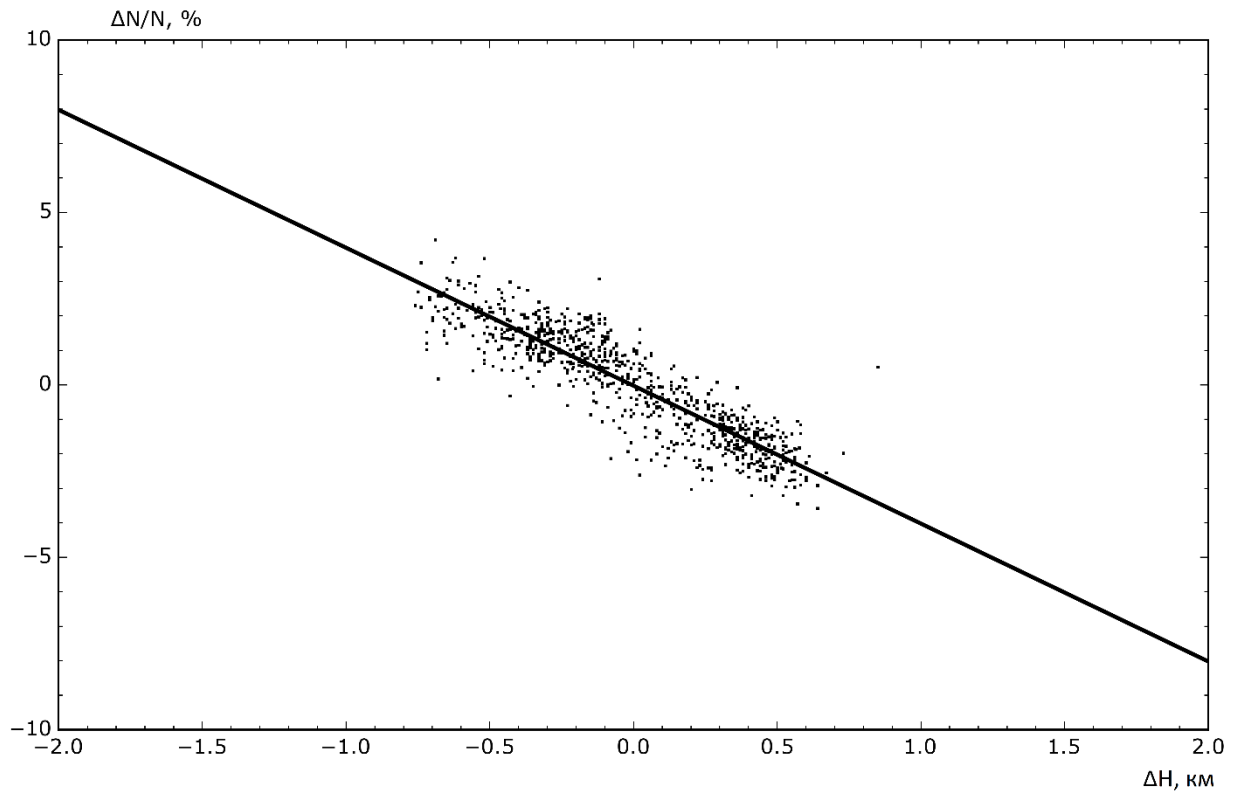


Рис. 2.20 – График зависимости $\Delta N/N_0$ от ΔH для установки CARPET-МОСКВА по данным за 2019 – 2020 гг.

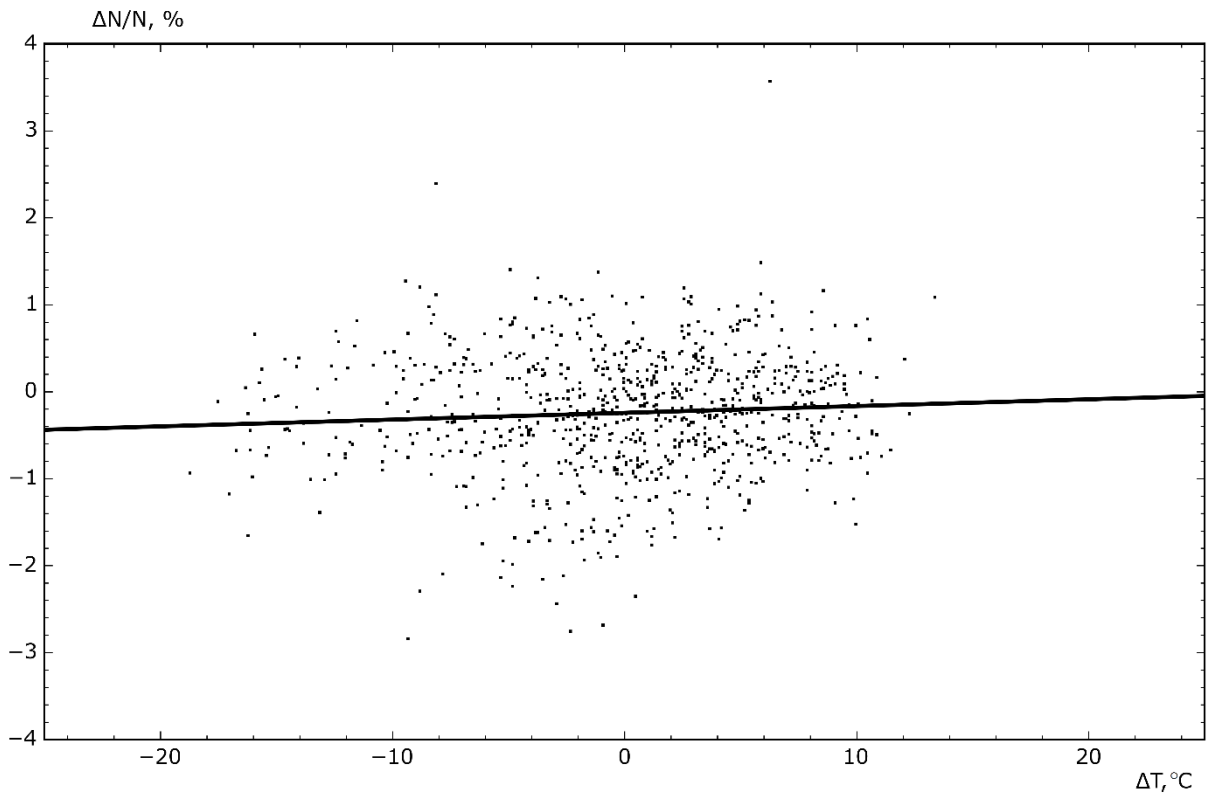


Рис. 2.21 – График зависимости $\Delta N/N_0$ от ΔT для установки CARPET-МОСКВА по данным за 2019 – 2020 гг.

2.5.2 Интегральный метод

Рассмотрим интегральный метод определения температурного эффекта [83-86]:

$$\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)_T = \int_0^P \alpha(x) \Delta T(x) dx \quad (2.12)$$

где

P – атмосферное давление в точке наблюдения температурного эффекта;

$\alpha(x)$ – плотность температурного коэффициента;

$\Delta T(x)$ – отклонение температуры от среднего значения в слое воздуха, соответствующего давлению от x до $x+dx$.

По данным измерений ЦАО имеются 16 изобарических поверхностей: 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20 и 10 гПа. Поверхность 10 гПа было решено исключить из расчётов, так как за период времени 2019 – 2020 гг. имеется всего 148 измерений для данного значения давления.

Преобразуем уравнение 2.11 в виде суммы по изобарическим поверхностям:

$$\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)_T = \sum_P \alpha(P) \Delta T(P) \quad (2.13)$$

где

$\alpha(P)$ – температурный коэффициент для данной изобарической поверхности [%/°C];

$\Delta T(P)$ – отклонение температуры от среднего значения для данной изобарической поверхности [°C].

Начиная с первой изобарической поверхности (20 гПа) будем определять зависимость $\frac{\Delta N}{N}$ и ΔT и вводить поправку. Поправленные по первому слою данные, далее, используются для определения температурного коэффициента для следующего слоя:

$$N_{i+1} = N_i(1 - \alpha_{i+1} \Delta T_{i+1}), \quad (2.14)$$

где

α_{i+1} – температурный коэффициент для изобарической поверхности $i+1$ [%/°C];

ΔT_{i+1} – отклонение температуры от среднего значения для изобарической поверхности $i+1$ [°C];

N_i – темп счёта установки CARPET-МОСКВА, с введённой температурной поправкой по изобарической поверхности i ;

N_{i+1} – темп счёта установки CARPET-МОСКВА, с введённой температурной поправкой по изобарической поверхности $i+1$.

Результаты измерений приведены в таблице 2.3: первый столбец – атмосферное давление на данной поверхности, второй столбец – средняя температура по данным за 2019 – 2020 гг., третий столбец – среднеквадратичное отклонение температуры, четвёртый столбец – температурный коэффициент для данной изобарической поверхности, пятый столбец – число измерений. На рис. 2.19д приведён график темпа счёта установки CARPET-МОСКВА по данным за 2019 – 2020гг.

Таблица 2.3 – Результаты определения температурного коэффициента для каждой изобарической поверхности.

P , гПа	\bar{T} , °C	σ_T , °C	α , %/°C	n
20	-57,13	11,30	-0,0909±0,0041	670
30	-59,00	9,04	-0,0193±0,0047	764
50	-59,09	7,45	-0,0078±0,0055	807
70	-58,30	6,46	0,0023±0,0015	826
100	-56,97	6,00	-0,0004±0,0067	859

P , гПа	\bar{T} , °C	σ_T , °C	α , %/°C	n
150	-55,52	6,46	-0,0100±0,0068	849
200	-56,56	7,03	0,0094±0,0031	859
250	-54,03	5,57	-0,0580±0,0069	863
300	-47,63	5,91	-0,0657±0,0061	863
400	-33,62	7,11	-0,0366±0,0049	868
500	-22,22	7,45	-0,0078±0,0047	868
700	-6,79	7,30	-0,0071±0,0025	874
850	0,76	7,78	0,0086±0,0045	881
925	3,92	9,00	0,0161±0,0039	879
1000	2,62	8,71	0,0124±0,0098	170

2.6 Корреляция с нейтронными мониторами

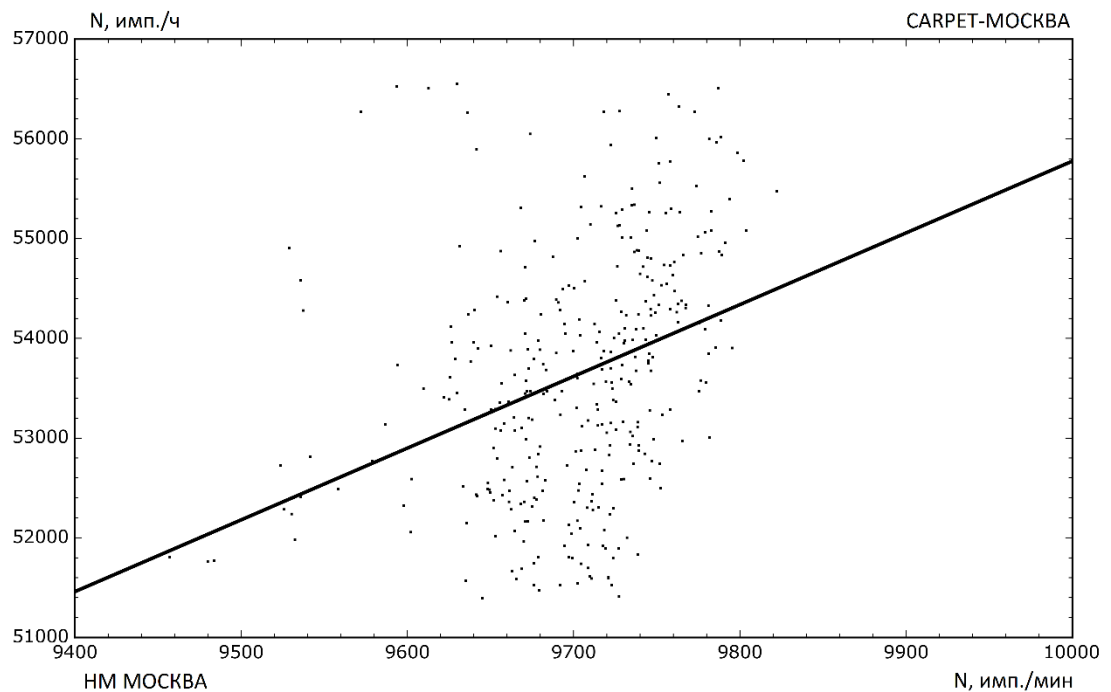


Рис. 2.22 – График зависимости темпа счёта установки CARPET-МОСКВА от темпа счёта московского нейтронного монитора по данным за 2019 г.

По данным за 2019 г. была установлена зависимость между исходными (без учёта метеорологических эффектов) данными установки CARPET-МОСКВА и данными московского нейтронного монитора (МНМ) [87]. Для этого исходные данные темпа счёта

CARPET были проинтегрированы до часовых с усреднением за сутки. Данные нейтронного монитора, аналогично, были усреднены за сутки.

После посуточного усреднения, из ряда данных были удалены точки, содержащие нулевые измерения (CARPET либо МНМ). Таким образом, за 2019 г. в наличии 349 точек (суток). На рис. 2.22 приведён график зависимости данных CARPET-МОСКВА от данных МНМ за 2019 г. Чёрная аппроксимирующая прямая получена по методу наименьших квадратов. Коэффициент корреляции: $R = 0,34$.

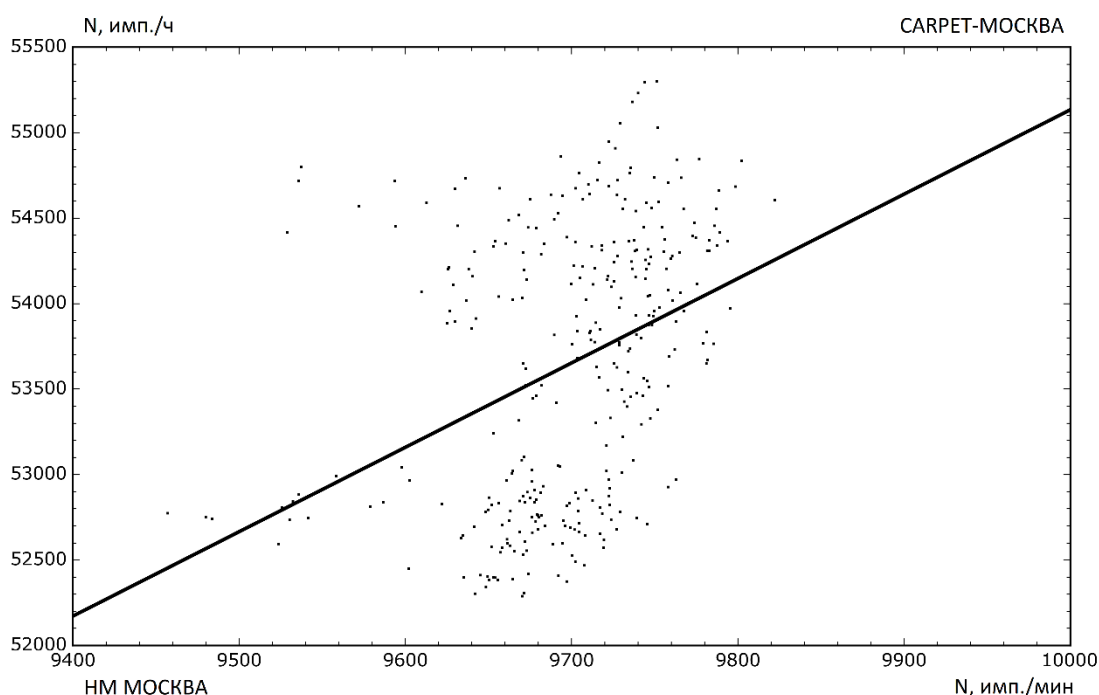


Рис. 2.23 – График зависимости темпа счёта установки CARPET-МОСКВА (данные с учётом барометрического эффекта) от темпа счёта московского нейтронного монитора по данным за 2019 г.

Аналогично, была получена зависимость между данными установки CARPET-МОСКВА (с учётом барометрического эффекта) и МНМ по 325 точкам. Количество измерений уменьшилось из-за пропусков в ряде данных телеметрической информации (давления). На рис. 2.23 приведён график зависимости данных (с учётом барометрического эффекта) CARPET-МОСКВА от данных МНМ за 2019 г. Коэффициент корреляции: $R = 0,36$.

На рис. 2.24 приведён график зависимости данных (с учётом барометрического эффекта и α_H – отрицательной компоненты температурного эффекта) по методу

эффективного уровня генерации) CARPET-МОСКВА от данных МНМ за 2019 г. Коэффициент корреляции: $R = 0,38$.

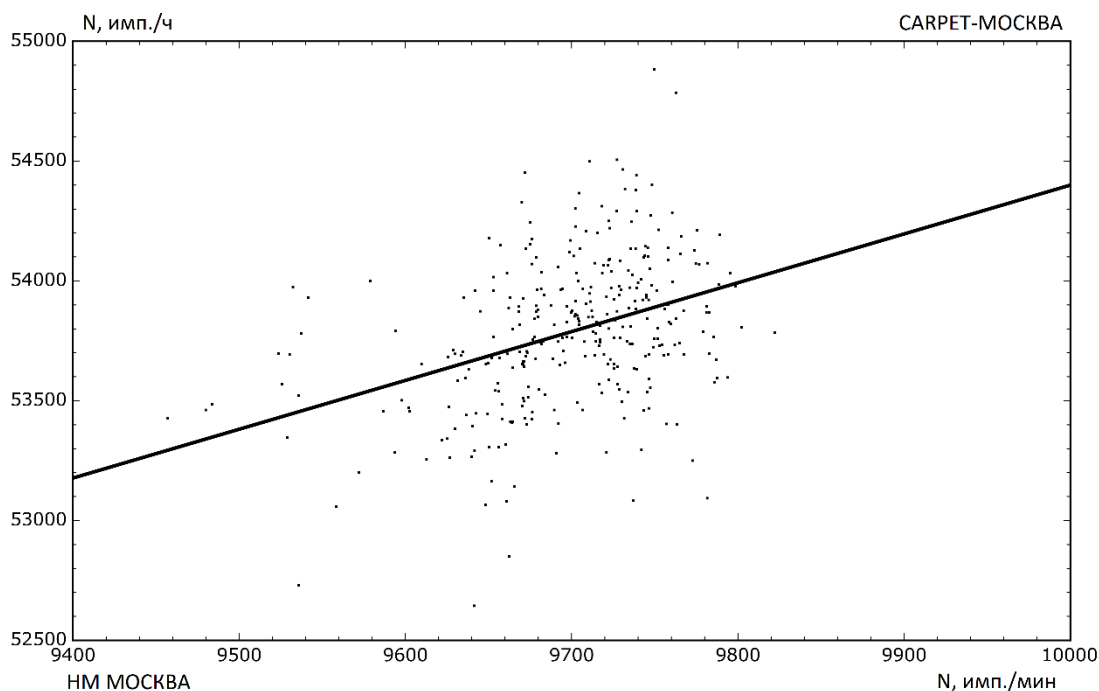


Рис. 2.24 – График зависимости темпа счёта установки CARPET-МОСКВА (данные с учётом барометрического эффекта и α_H – отрицательной компоненты температурного эффекта по методу эффективного уровня генерации) от темпа счёта московского нейтронного монитора по данным за 2019 г.

На рис. 2.25 приведён график зависимости данных (с учётом барометрического эффекта и температурного эффекта по методу эффективного уровня генерации) CARPET-МОСКВА от данных МНМ за 2019 г. Коэффициент корреляции: $R = 0,39$.

Таким образом, существует корреляция между данным CARPET-МОСКВА и МНМ. При этом, коэффициент корреляции возрастает при учёте барометрического и температурного (по методу эффективного уровня генерации) эффектов.

Рассмотрим коэффициент корреляции для данных CARPET, обработанных с учётом интегрального метода определения температурного эффекта (рис. 2.26). Коэффициент корреляции: $R = 0,2$. Интегральный метод определения температурной поправки является наиболее точным, однако в данном расчёте оказался неэффективным. При сравнении графиков на рис. 2.19 г и 2.19 д заметны частые резкие скачки темпа счёта в случае интегрального метода, что обусловлено нерегулярностью данных измерений ЦАО для больших высот.

В результате, наиболее применимым оказался метод эффективного уровня генерации, который в дальнейшем используется при обработке данных CARPET.

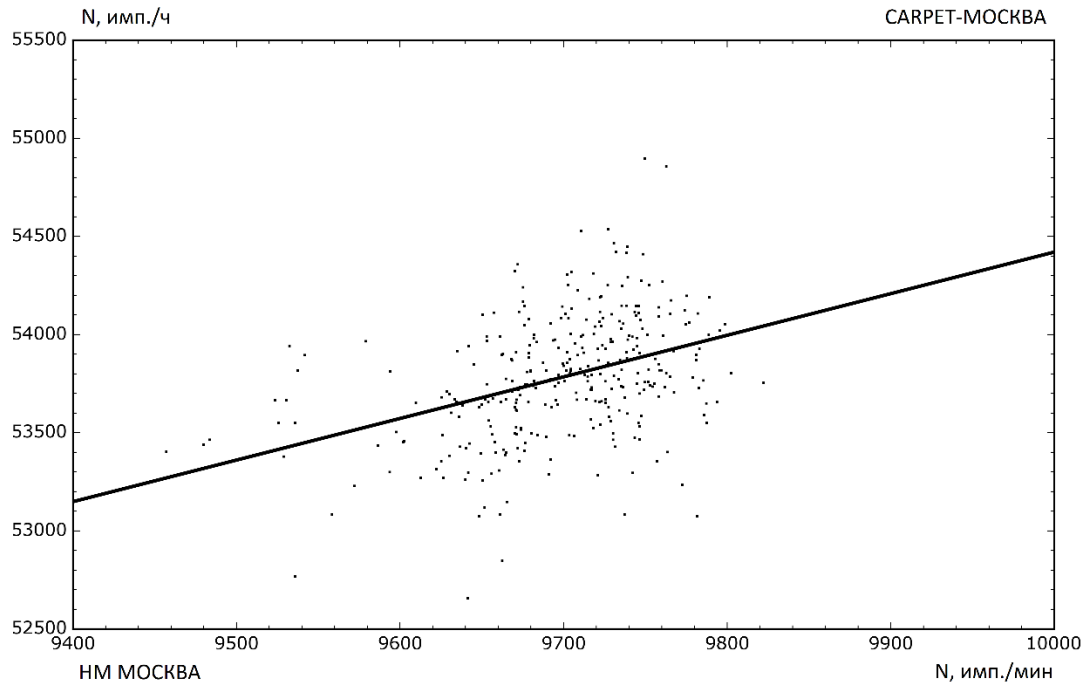


Рис. 2.25 – График зависимости темпа счёта установки CARPET-МОСКВА (данные с учётом барометрического эффекта и температурного эффекта по методу эффективного уровня генерации) от темпа счёта московского нейтронного монитора по данным за 2019 г.

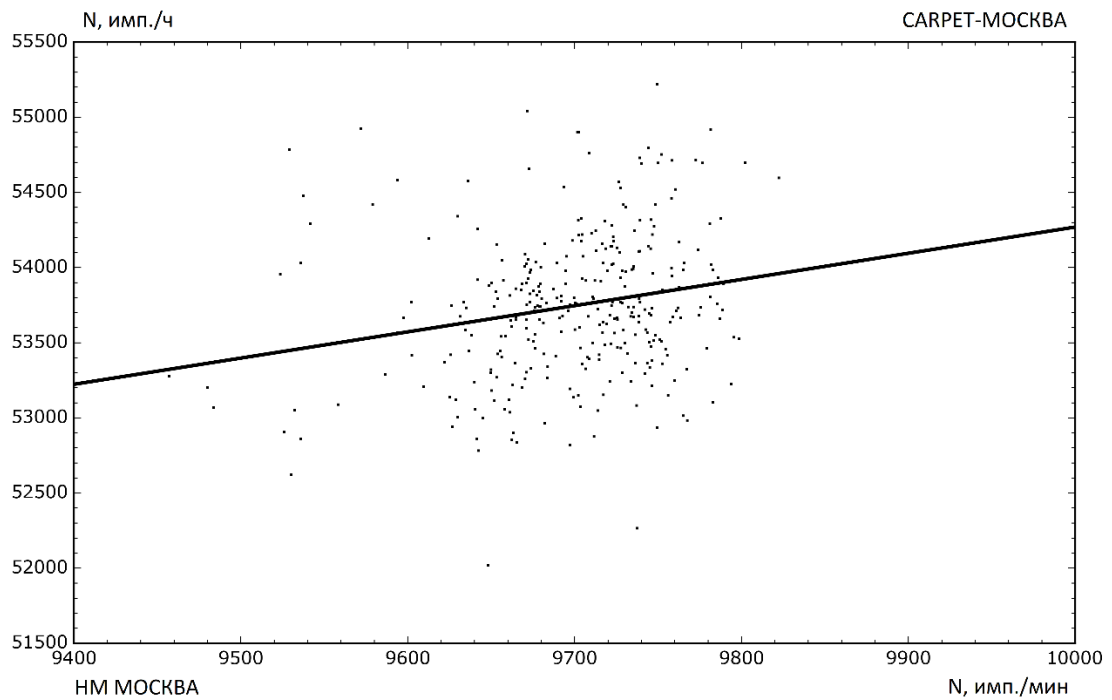


Рис. 2.26 – График зависимости темпа счёта установки CARPET-МОСКВА (данные с учётом барометрического эффекта и температурного эффекта по интегральному методу) от темпа счёта московского нейтронного монитора по данным за 2019 г.

2.7 Оценка геометрического фактора установки CARPET

Геометрический фактор установки CARPET был оценён косвенно, через известный геометрический фактор стандартного телескопа (состоящего из 2-х счётчиков СТС-6, а, также, алюминиевого поглотителя), используемого в стратосферном эксперименте ДНС ФИАН [18]. На рис. 2.27 приведена принципиальная схема включения счётчиков (телескопа) на плате зонда. Аналогично установкам CARPET, реализованы счётные каналы UP и LOW, а также, схема совпадения TEL.

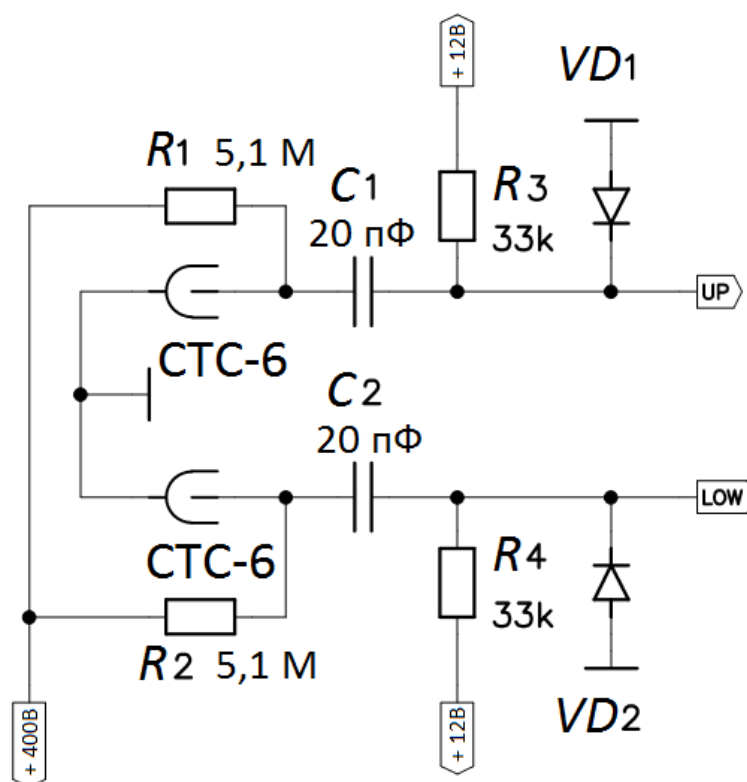


Рис. 2.27 – Принципиальная схема включения счётчиков СТС-6 в стратосферном зонде.

Для данной работы был использован модернизированный стратосферный зонд ФИАН (рис. 2.28), основным отличием которого является отсутствие передатчика, вместо которого

реализована система записи данных на SD-карту памяти, на которой микроконтроллером формируются текстовые файлы с информацией о темпах счёта одиночного счётчика (UP) и телескопа (TEL), а, также, данных о давлении и температуре. Версия зонда с возможностью записи данных на карту память была специально разработана для международного эксперимента [88].

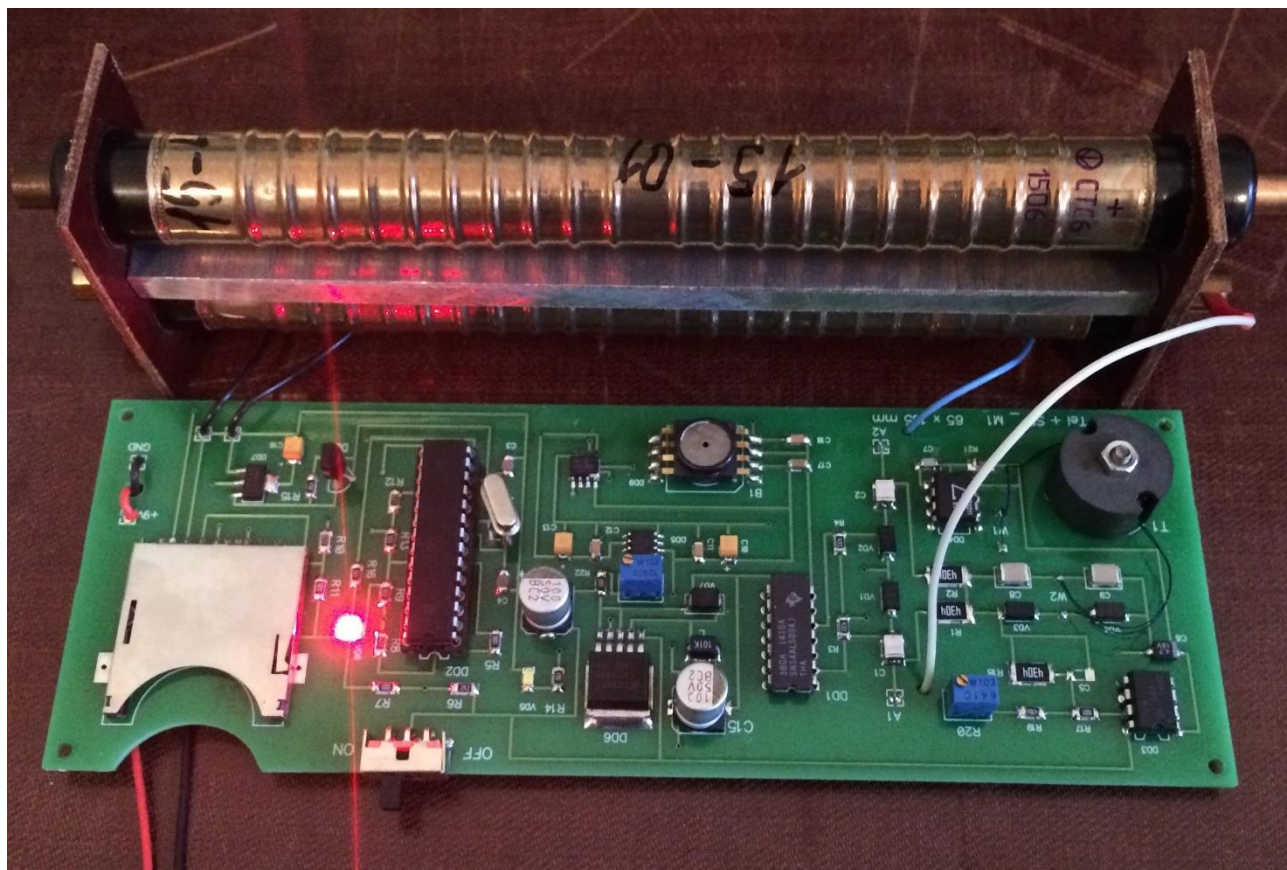


Рис. 2.28 – Телескоп и электронная плата модернизированного стратосферного зонда.

Для определения геометрического фактора установки CARPET, в непосредственной близости был установлен модернизированный зонд. Приборы были включены одновременно работали в течении 5 часов.

В 1-м столбце таблицы 2.4 приведены данные темпа счёта N_{tel} [имп./ч] за 5 часов для канала TEL зонда. Во 2-м столбце таблицы 2.4 приведены данные темпа счёта зонда $N_{Tel(corr)}$, умноженные на поправочный коэффициент: 0,878. Данный коэффициент вводится, чтобы привести темп счёта текущего телескопа к эталонному, используемому на ДНС ФИАН для взаимных калибровок счётчиков.

Геометрический фактор стандартного телескопа: $G_{Tel} = 12,3 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$ [18].

Поток КЛ вычисляется как отношение:

$$J_{Tel(corr)} = \frac{N_{Tel(corr)}}{G_{Tel}} \quad (2.15)$$

Данные измерений потока КЛ $J_{Tel(corr)}$ [имп.·ч⁻¹·см⁻²·ср⁻¹] приведены в 3-м столбце таблицы 2.4.

В 4-м столбце таблицы 2.4 приводятся данные темпа счёта N_{CARPET} [имп./ч] установки CARPET-МОСКВА в канале TEL.

Геометрический фактор G_{CARPET} установки CARPET-МОСКВА, таким образом, вычисляется как отношение:

$$G_{CARPET} = \frac{N_{CARPET}}{J_{Tel(corr)}} \quad (2.16)$$

В 5-м столбце таблицы 2.4 приводятся данные расчёта геометрического фактора G_{CARPET} [см²·ср] установки CARPET-МОСКВА по данным за 5 часов.

Таблица 2.4 – Результаты взаимной калибровки установки CARPET-МОСКВА и модернизированного стратосферного зонда.

N_{tel} , имп./ч	$N_{Tel(corr)}$, имп./ч	$J_{Tel(corr)}$, имп.·ч ⁻¹ ·см ⁻² ·ср ⁻¹	N_{CARPET} , имп./ч	G_{CARPET} , см ² ·ср
524	460,072	37,40423	51304	1371,61
521	457,438	37,19008	51301	1379,427
579	508,362	41,33024	51404	1243,738
557	489,046	39,75984	50960	1281,695
557	489,046	39,75984	50861	1279,205

По результатам измерений за 5 часов, величина геометрического фактора G_{CARPET} установки CARPET-МОСКВА: $1311,13 \pm 54,31$ см²·ср.

Выводы к главе 2

В данной главе приведено описание установки CARPET: разобраны принципиальных схемы, даны протокол обмена данными с ПК и прикладное программное обеспечение. Произведена оценка точности счёта установки.

Стоит отдельно отметить конструктивные особенности установки CARPET: приборы разработаны в виде модульных устройств с масштабируемостью до 3-х модулей на одно рабочее место, что одновременно повышает как статистику данных, так и надёжность комплекса, так как модули являются полностью независимым. Датчики телеметрической

информации располагаются непосредственно внутри корпуса каждой установки, что позволяет исключать как метеорологические, так и возможные аппаратурные эффекты.

На сегодняшний день на разных широтах непрерывно функционируют 6 (5 нового типа, а также, CARPET-CASLEO) установок CARPET, фактически образующие международную сеть детекторов низкоэнергичной компоненты вторичных КЛ. Для корректного сопоставления данных первостепенной задачей было введение метеорологических поправок, расчёт которых также приведён в данной главе.

С помощью встроенного датчика давления, для установок CARPET рассчитан барометрический коэффициент. Для установки CARPET-МОСКВА была использована методика определения температурного коэффициента по данным зондирования атмосферы, проводимые ЦАО. По результатам расчётов, наиболее применимым оказался метод эффективного уровня генерации, так как он является алгоритмически более простым и менее требовательным к исходным данным. Использование интегрального метода осложняется возрастающей скважностью в данных зондирования давления для величин менее 50 гПа.

Величина геометрического фактора установки CARPET была косвенно оценена, с помощью взаимокалибровки с данными стандартного телескопа, применяемого для стратосферных измерений ДНС ФИАН.

Глава 3. Экспериментальный комплекс «Нейтронный детектор»

В 2014 г. в ФИАН разработана установка «Нейтронный детектор» (НД), прообразом которой является нейтронный детектор космического аппарата ПАМЕЛА [89-92].

В мае 2015 года 3 модуля (НД CASLEO 0-2) данной установки (рис. 3.1) запущены в непрерывную работу в астрономическом комплексе CASLEO (Аргентина, S31,47°, W69,17°, высота 2550 м над уровнем моря, $R_c = 9,8$ ГВ) [93-95].

В конце 2017 года в Евразийском национальном университете имени Л.Н. Гумилева (Нур-Султан, Республика Казахстан, N51,10°, E71,26°; $R_c = 2,9$ ГВ) запущен 1 модуль установки НД ASTANA.

С 2019 года на территории Долгопрудненской научной станции ФИАН (Долгопрудный, Московская область, N55,56°, E37,30°; $R_c = 2,12$ ГВ) запущены 2 модуля установки НД МОСКВА 0-1.

Таким образом, на сегодняшний день существует сеть научных установок данного типа, состоящая из 6 модулей НД, расположенных на различных широтах.

3.1 Устройство аппаратно-программного комплекса НД

Основные элементы установки представлены на рис. 3.2. Детектирующий модуль состоит из 9 нейтронных счётчиков СНМ-18, наполненных ^3He (реакция взаимодействия с нейтронами приведена в пункте 1.4 – уравнение 1.4).

Паспортные значения основных параметров счётчика СНМ-18:

длина, мм	320 ± 2 ;
диаметр, мм	32;
собственный фон, имп./с	$\leq 0,083$;
изменение скорости счёта, %	≤ 10 ;
средний ток коронного разряда, мкА	≤ 25 .

Для замедления нейтронов до тепловых энергий $E \approx 0,0025$ эВ, счётчики помещены между двумя слоями полиэтилена.

Величина импульсов, получаемых со счётчиков СНМ-18, составляет порядка 100-150 мВ (рис. 3.4), поэтому первостепенной задачей является усиление сигнала. На рис. 3.3 представлена принципиальная схема одного усилительного канала. Счётчик СНМ-18 подключен к высоковольтному источнику напряжения (HV) через резистор R_3 . Импульсы со

счётчика через разделительную цепь $R_4 C_1$ поступают на неинвертирующий вход усилителя DA_1 . Коэффициент усиления задан соотношением номиналов резисторов R_1 и R_2 и равен 11.

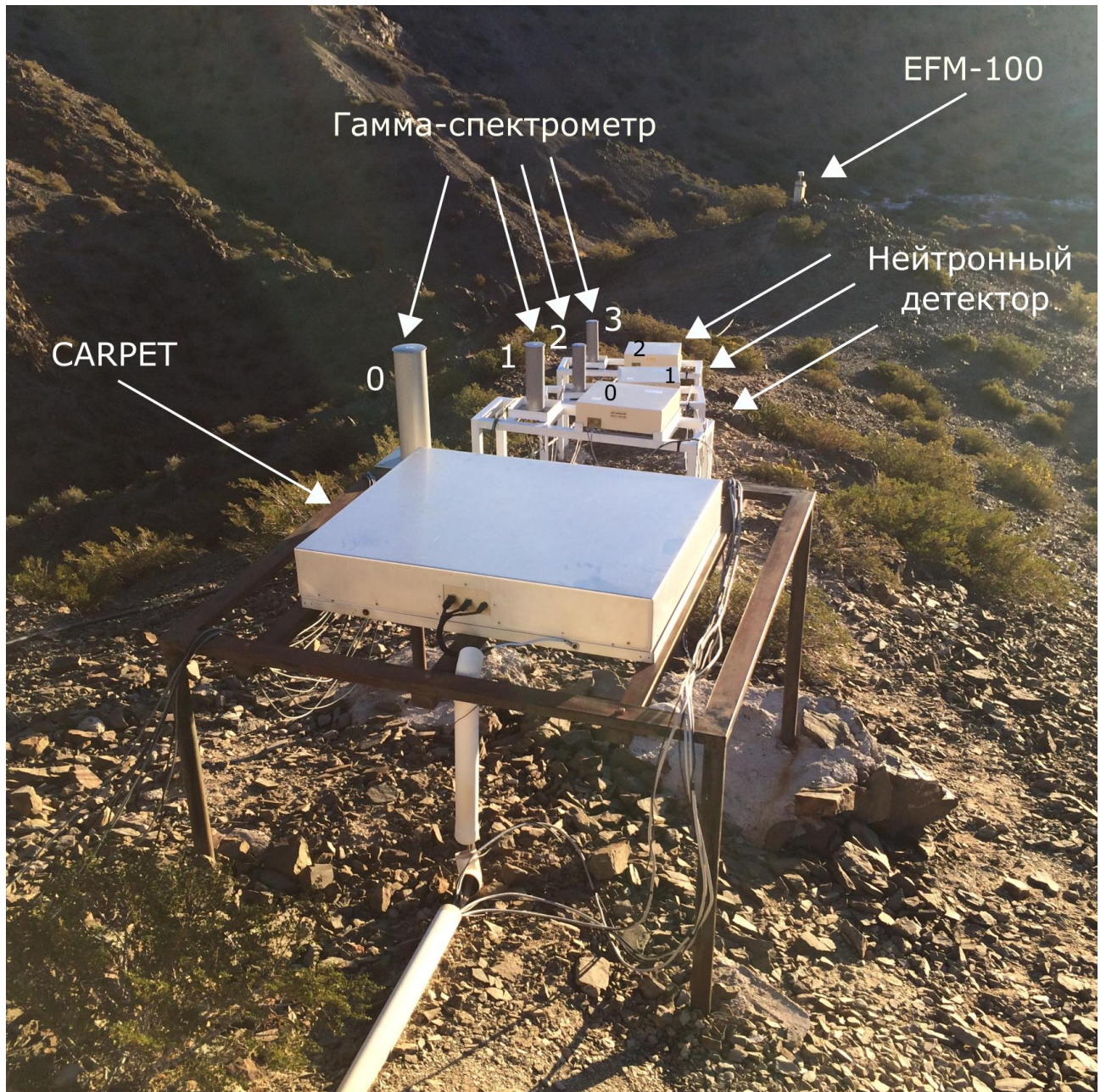


Рис. 3.1 – Научная аппаратура для измерений потоков КЛ, установленная в CASLEO: CARPET-CASLEO (с 2006 г.), 3 модуля НД (с 2015 г.), 4 модуля «Гамма-спектрометра» (с 2015 г.).

Усиленные импульсы через фильтр верхних частот $R_5 C_2$ и фильтр нижних частот $R_6 C_3$, поступают на инвертирующий вход компаратора DA_2 (рис. 3.4, оранжевая линия). На неинвертирующий вход компаратора подано пороговое напряжение, которое регулируется потенциометром R_7 . Величина порогового напряжения выставляется для каждого счётчика индивидуально в зависимости от уровня шумов в интервале (-0,3 В, -0.6 В). На выходе

компаратора формируется прямоугольный импульс с амплитудой порядка 4 В (рис. 3.4, синяя линия).

В состав платы усилителей-формирователей (рис. 3.5) входят 9 одинаковых усилительных каналов, работающих по принципу, описанному выше. Импульсы всех 9 каналов объединяются по «ИЛИ» и, далее, поступают на интерфейсный блок.

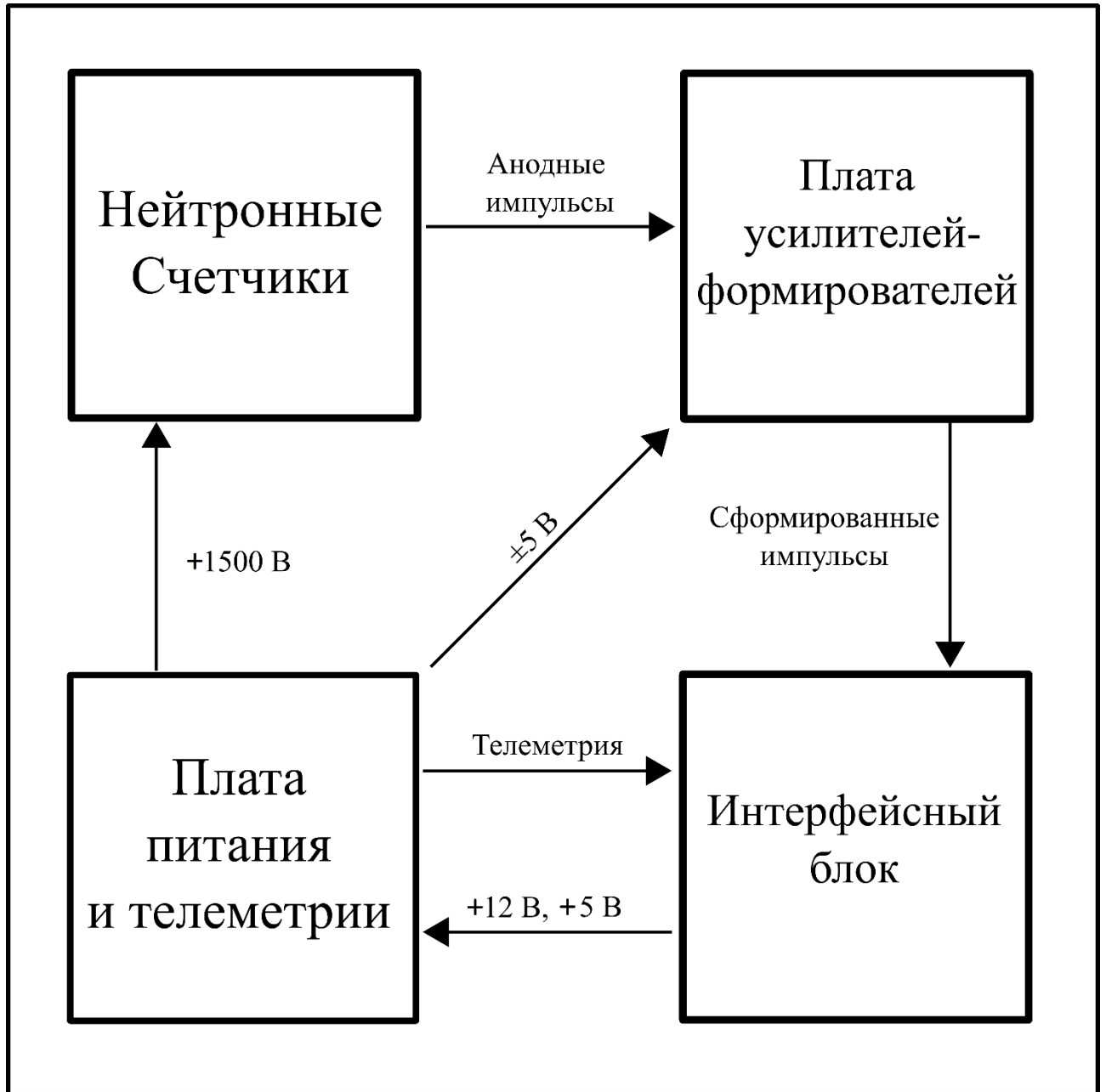


Рис. 3.2 – Блок-схема одного модуля НД.

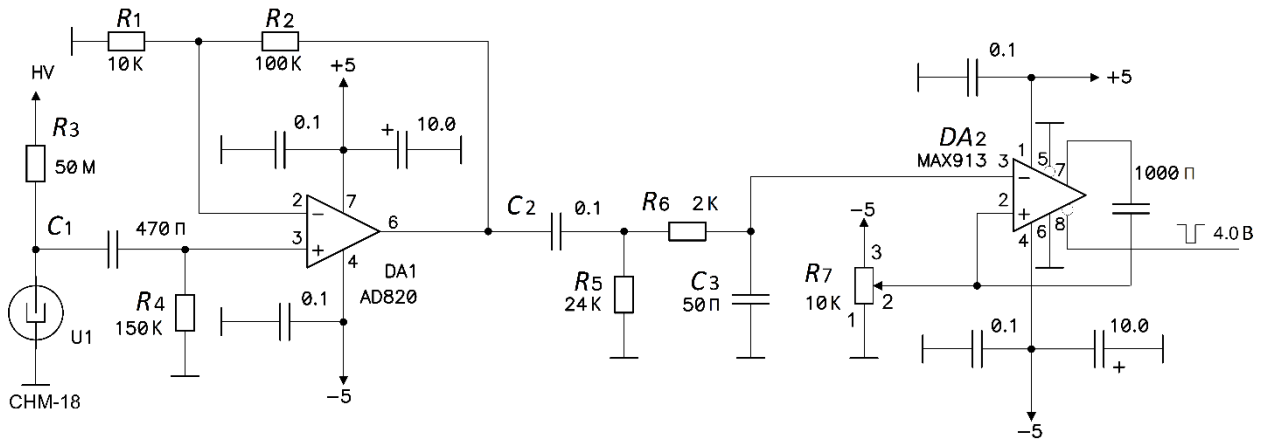


Рис. 3.3 – Принципиальная схема одного канала платы усилителей-формирователей.

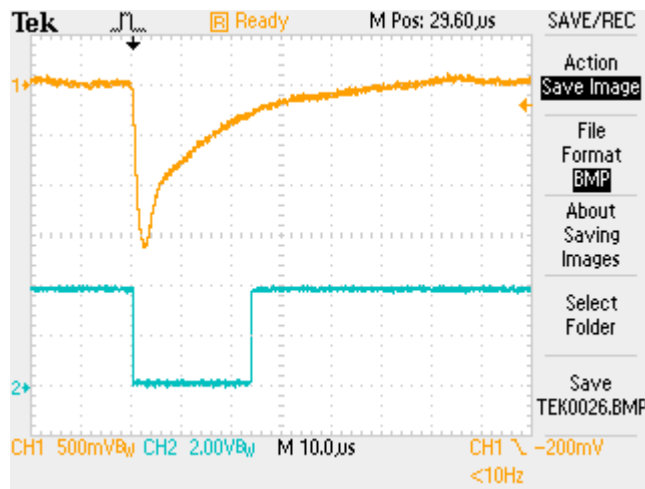


Рис.3.4 – Осциллограмма одного импульса со счётчика CHM-18. Оранжевая линия – импульс, поступивший на компаратор после усиления. Синяя линия – импульс, сформированный компаратором.

Плата телеметрии и питания (рис. 3.6) обеспечивает питающими напряжениями плату усилителей-формирователей, а также, осуществляет измерение и первичную обработку телеметрии.

От интерфейсного блока на плату телеметрии и питания по разъёму XR1 поступают напряжения 5 В и 12 В. Из 12 В, для обеспечения питанием платы усилителей-формирователей, с помощью DC-DC преобразователя TEN10-1221 (A_2) [96] вырабатываются +5 В и -5 В, которые, далее, поступают на разъём XR3. Преобразователь напряжения CA20P-T (A_1) [97] вырабатывает высокое напряжение (HV) для нейтронных счётчиков. Потенциометр R1 позволяет регулировать высокое напряжение в диапазоне от 200 В до 2 к В. Стандартное значение высокого напряжения для питания CHM-18 составляет 1500 В.

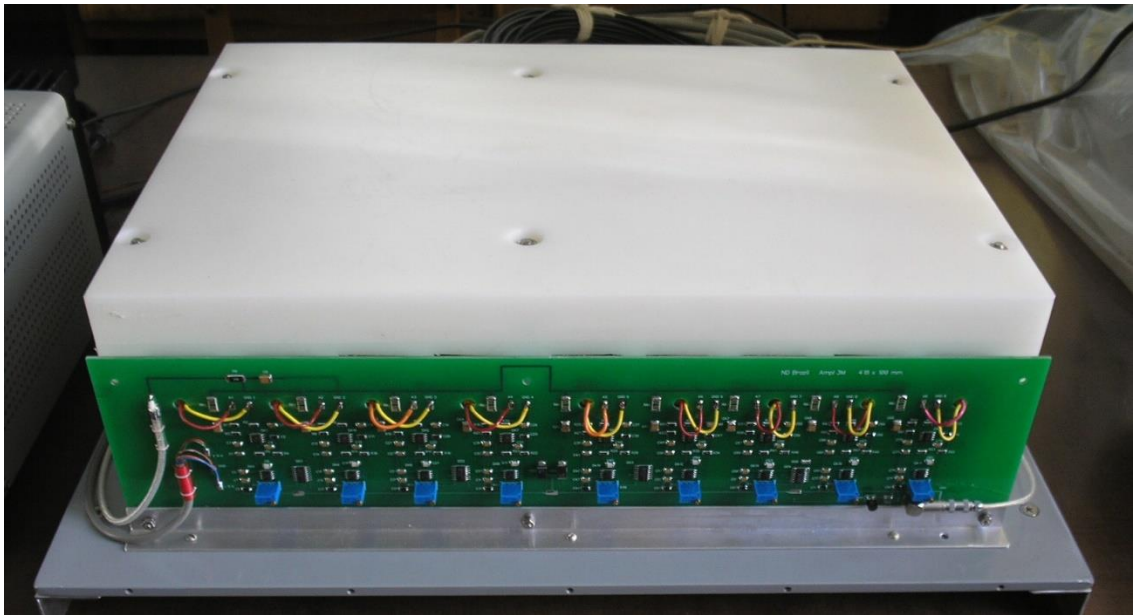


Рис.3.5 – Фотография платы усилителей-формирователей НД, закреплённой на корпусе детектирующего модуля НД.

Контроль высокого напряжения (HV) осуществляется с вывода «monitor» преобразователя A_1 . Сигнал «monitor» поступает на делитель напряжения $R_7 R_8$, далее, на повторитель $DA_{2.1}$. Для измерения данной величины использован АЦП MCP3201 (DD_6) [74]. Измерительный канал для контроля напряжения +5 В устроен аналогично: повторитель $DA_{1.1}$, АЦП DD_4 , делитель напряжения $R_2 R_3$. В канале, измеряющем напряжение - 5 В, операционный усилитель (ОУ) LM258 ($DA_{1.2}$) включён по схеме инвертирующего усилителя с коэффициентом усиления - 1. Источник опорного напряжения сделан на основе микросхемы REF192 (DD_1) с выходным напряжением 2,5 В. Микросхемы АЦП $DD_4 - DD_6$ подключены к микроконтроллеру ATmega 168 (DD_7) [75] по последовательному интерфейсу SPI. Для контроля температуры и давления на плате телеметрии и питания установлены датчики DS18B20 (DD_9) и BMP085 (DD_3), соответственно. Датчик давления DD_3 подключён к DD_7 по интерфейсу i2c, датчик температуры DD_9 подключён к DD_7 по интерфейсу 1-Wire (программная реализация).

Светодиоды $D_1 - D_4$ являются индикаторами исполнения циклограммы работы платы питания и телеметрии. С их помощью осуществляется первичная проверка и отладка платы, без необходимости использования дополнительной аппаратуры. D_1 активен (светится) в процессе измерения давления. D_2 активен в процессе измерения напряжений. D_3 активен во время измерения температуры. D_4 активен во время передачи телеметрии. В нормально режиме работы платы светодиоды $D_1 - D_4$ последовательно мигают.

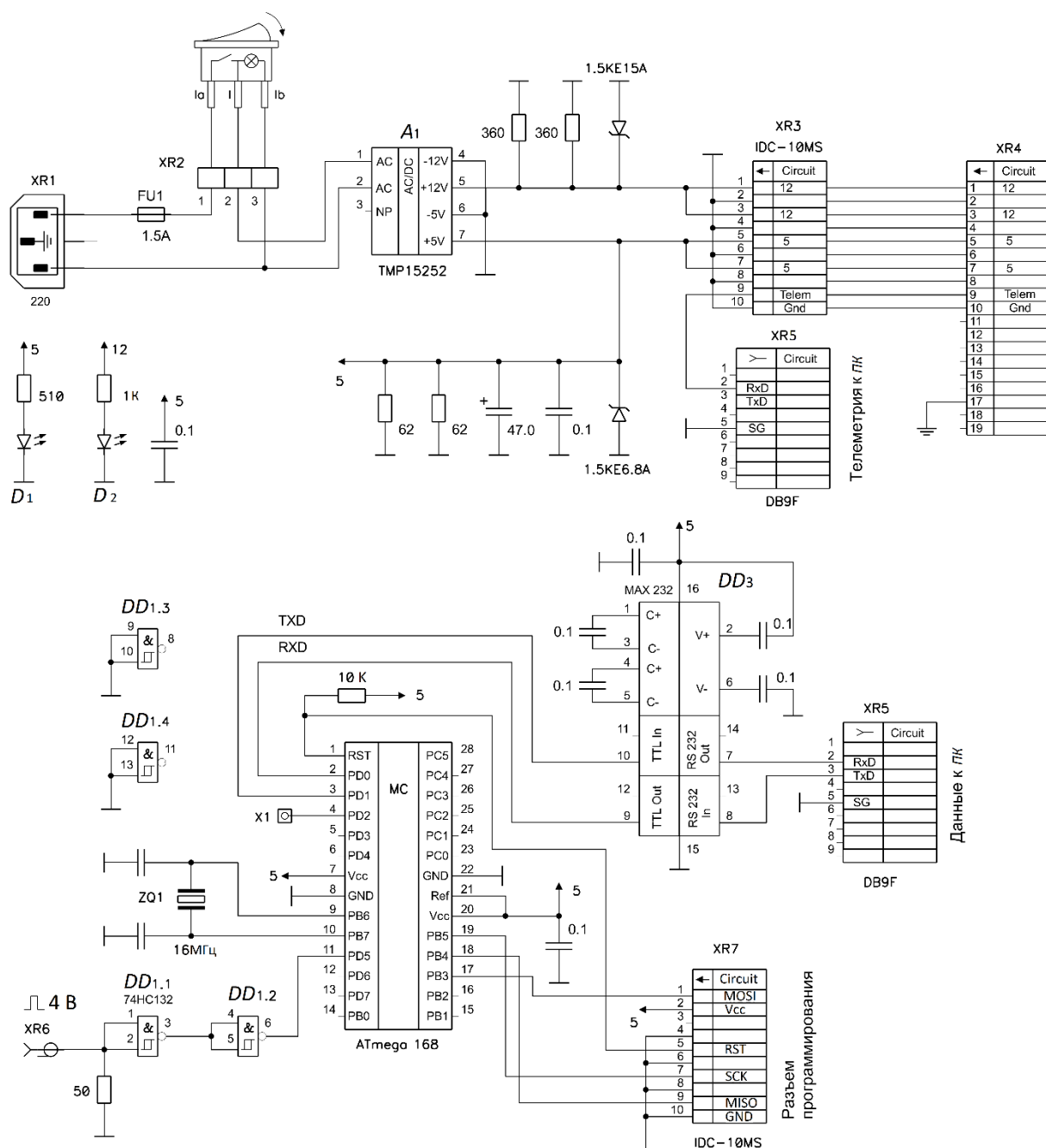


Рис. 3.7 – Принципиальная схема интерфейсного блока НД.

Сообщения телеметрии отправляются на ПК через интерфейсный блок (разъём XR1) по интерфейсу RS – 232 раз в секунду. В интерфейсном блоке (рис. 3.7), телеметрия передаётся с разъёма XR4 на разъём XR5 (DB9F) и далее на ПК.

Интерфейсный блок используется для приёма данных детектирующего модуля, их первичной обработки и передачи на ПК по интерфейсу RS – 232. Также интерфейсный блок через разъём XR4 обеспечивает питающие напряжения +5 В и +12 В модуля НД. Питающие напряжения вырабатываются преобразователем напряжения TMP15252 (A₁) [98]. С помощью

светодиодов D_1 и D_2 индицируются питающие напряжения (светодиод горит, если есть напряжение) +5 В и +12 В, соответственно.

Данные от платы усилителей – формирователей поступают на входной разъём интерфейсного блока (XR6). Счётчик импульсов реализован на базе Таймера/Счётчика 1 микроконтроллера ATmega 168 (DD_2). Временные окна интегрирования (1 мс) формируются Таймером/Счётчиком 0.

3.2 Протокол обмена данными между интерфейсным блоком установки НД и компьютером

Для получения данных и телеметрии от одного модуля НД используются два порта RS - 232. Один порт для передачи данных о темпе счёта КЛ, другой для передачи телеметрии.

3.2.1 Формат сообщения данных

Данные представляют собой совокупность сообщений длиной 2 байта (старший байт и младший байт). Каждое сообщение представляет собой число импульсов, посчитанное интерфейсным блоком НД за прошедшую миллисекунду. Данные передаются в порядке от старшего к младшему («big-endian»).

$$N = A_0 + 256 \cdot A_1, \quad (3.1)$$

где

A_0 - младший байт данных;

A_1 - старший байт данных;

N - полное число посчитанных импульсов интерфейсным блоком НД за прошедшую миллисекунду.

В случае $N = 0$ сообщение не отправляется. Таймер, формирующий миллисекундные интервалы, сбрасывается.

3.2.2 Формат сообщения телеметрии

Сообщение телеметрии является последовательностью ASCII-символов (строкой), отправляемой раз в секунду.

temperature <SPACE> *pressure* <SPACE> *voltage1* <SPACE> *voltage2* <SPACE>
voltage3 <CR> <LF>

Значение полей:

- «*temperature*» – температура внутри корпуса модуля НД, °С;
- «*pressure*» – атмосферное давление, кПа;
- «*voltage1*» – измеренное значение напряжения питания (+5 В), В;
- «*voltage2*» – измеренное значение напряжения питания (-5 В), В;
- «*voltage3*» – измеренное значение напряжения питания (+1500 В), В;
- <SPACE> – пробел. Байт равен 0x20;
- <CR> – возврат каретки. Байт равен 0x0D;
- <LF> – перевод строки. Байт равен 0x0A.

3.2.3 Программное обеспечение для визуализации и формирования файлов данных

Для корректной работы программного обеспечения «Yoda terminal» требуется компьютер с ОС Microsoft Windows 7 и пакет Microsoft .NET Framework 4.5.



Рис.3.8 – Главное окно программы «Yoda terminal». Разными цветами показаны графики вариаций темпа счёта нейтронов по каждому из 3-х модулей НД CASLEO.

Программа позволяет выводить на экране монитора данные (рис. 3.8) и телеметрию (рис. 3.9) в реальном времени с различным временным разрешением, сохранять данные в суточные файлы, а также, просматривать файлы данных за предыдущие дни.

Настройки программы осуществляются в пункте меню «Settings» раздела «View»

главного меню. Диалоговое окно настройки показано на рис. 3.10 (слева).

На закладке «General» указывается количество каналов «Channels» (количество подключённых модулей НД, не более 3-х).

Для сохранения данных необходимо указать директорию «Data path». Данные внутри директории структурируются и разделяются по дням. Каждая поддиректория создается программой автоматически.

Настройка каналов производится на закладках «Channel» с соответствующим индексом (правое окно на рис. 3.10). Для каждого из каналов можно указать цвет графика, название канала и соответствующие настройки портов ввода-вывода для приёма данных и телеметрии. Поле «Chart color» определяет цвет графиков для соответствующего канала. Поле «Chart legend» определяет подпись соответствующего графика.

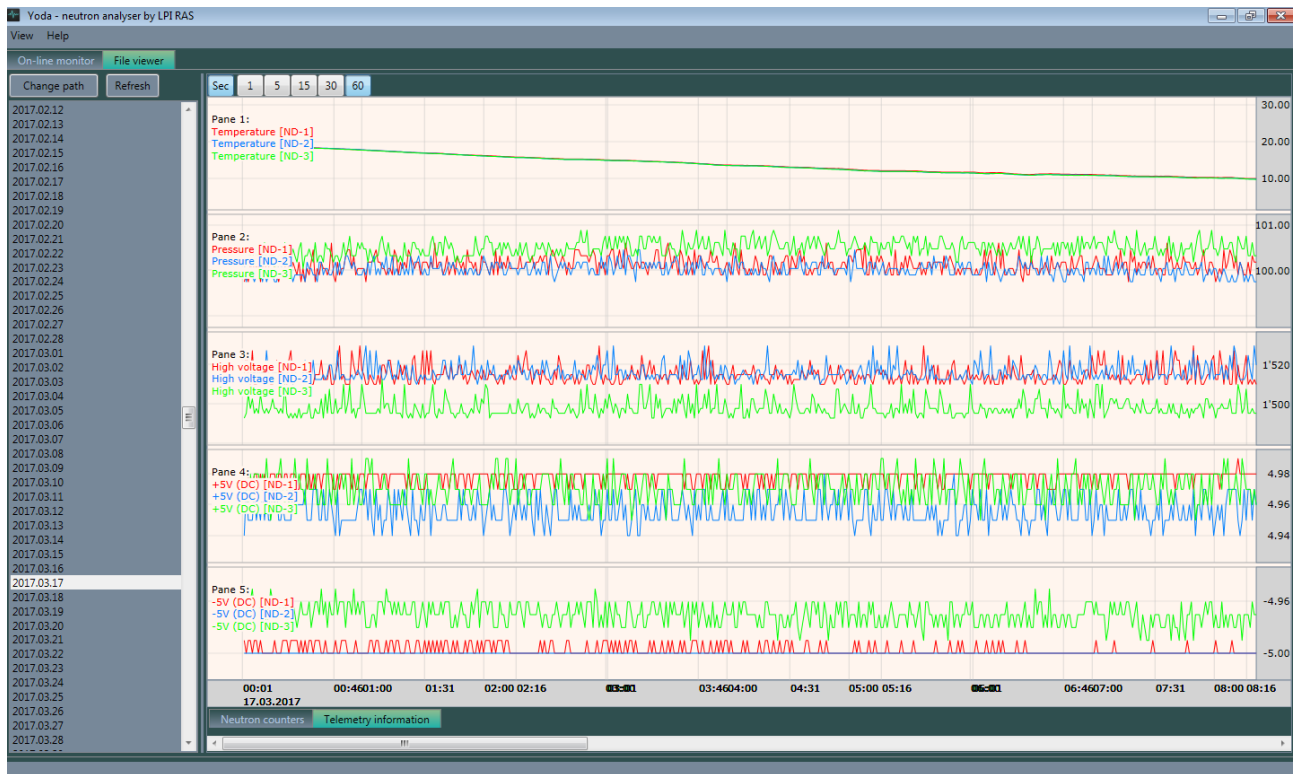


Рис. 3.9 – Главное окно программы «Yoda terminal». Разными цветами показаны графики вариации телеметрии каждого модуля НД.

Разделы «Data serial settings» и «Telemetry serial settings» предназначены для настройки последовательных (COM) портов. Для каждого порта задаётся следующий набор параметров из списков допустимых параметров:

- «COM port» – номер порта, отвечающий за приём данных;
- «Port speed» – скорость порта (57600 для данных, 9600 для телеметрии);

- «Parity» – чётность (по умолчанию: None);
- «Data bits» – количество битов данных (по умолчанию: 8);
- «Stop bits» – количество стоповых битов данных (по умолчанию: 1);
- «Handshake» – параметр способа установки соединения (по умолчанию: None).

После настройки параметров, следует нажать кнопку «ОК» для сохранения настроек.

Для старта приёма и записи данных следует нажать кнопку «Connect» на закладке «On-line monitor». Программа произведёт подключение к портам и начнёт сбор данных. Графики на вкладке «On-line monitor» будут обновляться в реальном времени по мере получения данных.

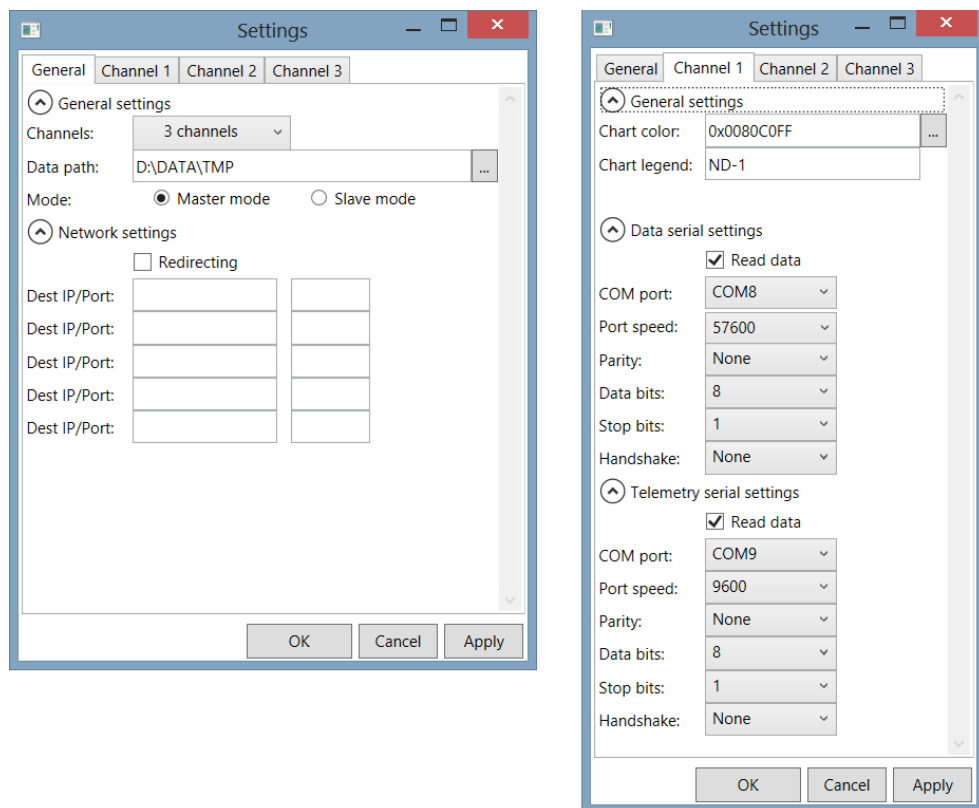


Рис. 3.10 – Окно настроек программы: вкладка общих параметров (слева), вкладка параметров каналов передачи данных (справа).

Для хранения данных и телеметрии используются независимые текстовые файлы, которые помещаются в единую директорию. Каждые сутки создаётся новая директория и файлы данных. Имя директории соответствует дате её создания (например, «2014.01.21» - 21 января 2014 г.). Для имён текстовых файлов в этой директории используется следующее правило:

- «2014-01-21-ch1.txt» – файл данных модуля НД 1;

- «2014-01-21-ch1-tm.txt» – файл телеметрии для модуля НД 1.

3.3 Калибровка нейтронных счётчиков

В первую очередь для каждого счётчика следует подобрать значение высокого напряжения (в диапазоне 1500-1700 В), соответствующее началу коронного режима. Постепенно повышая напряжение, необходимо добиться появления анодного тока счётчика, который измеряется цифровым мультиметром.

Для калибровки нейтронных счётчиков используется амплитудный анализатор, на который подаётся сигнал от счётчика после усиления (рис. 3.4).

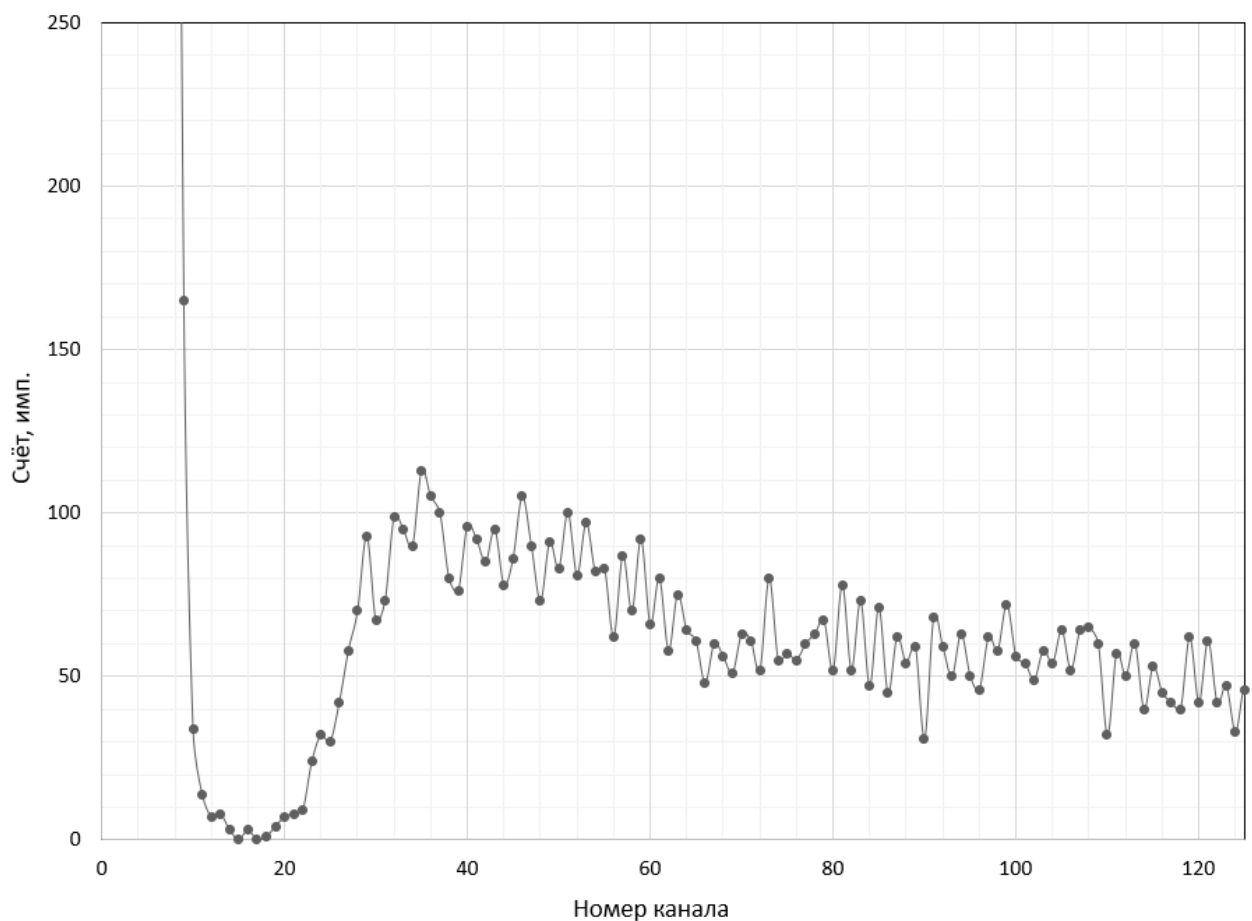


Рис. 3.11 – Спектр сигнала одиночного счётчика СНМ-18 по данным за несколько часов, при использовании источника Po-Be.

На рис. 3.11 приведён типичный спектр, получаемый от счётчика СНМ-18, после усиления. Как видно, в районе 18-го канала счёт падает до нуля. Следовательно, импульсы, подсчитываемые в каналах, чьи номера меньше 18, являются следствием шумов. Импульсы, подсчитываемые в 19-м канале и далее – полезный сигнал (счёт тепловых нейтронов). Для

выделения полезного сигнала необходимо убрать шум. Для этого достаточно выставить порог компаратора (DA_2 на рис. 3.4) примерно на уровне 22-го канала, с которого начинается существенное возрастание счёта. Порог компаратора регулируется с помощью резистора R_7 (рис. 3.4).

3.4 Точность детектирования потоков КЛ установкой НД

Длительность сформированных импульсов зависит от энергии проходящей частицы и укладывается в диапазон 10 – 30 мкс (рис. 3.5).

Ошибки счёта могут возникать при наложении близких по времени сигналов от различных счётчиков в схеме «ИЛИ». Таким образом, условием появления ошибки является генерация двух или более сигналов от нейтронных счётчиков за время, равное удвоенной длительности одного импульса.

Измеренный средний счёт модуля НД CASLEO, округлённый в большую сторону: $N_{\text{ср}} \approx 5 \text{ с}^{-1}$.

Длительность единичного импульса: $\tau \approx 20 \text{ мкс}$.

Математическое ожидание количества частиц за время $\Delta t = 2\tau$:

$$\mu = N_{\text{ср}} 2\tau. \quad (3.2)$$

Распределение Пуассона:

$$P(x) = \frac{(\mu)^x}{x!} e^{-\mu} = \frac{(N_{\text{ср}} 2\tau)^x}{x!} e^{-N_{\text{ср}} 2\tau}, \quad (3.3)$$

где

x – число импульсов;

$P(x)$ – вероятность появления x импульсов в течение интервала времени Δt .

Вероятность отсутствия импульсов в течение интервала времени Δt :

$$P(x = 0) = e^{-N_{\text{ср}} 2\tau},$$

$$P(x = 0) \approx 0,9998.$$

Вероятность появления одного импульса в течение интервала времени Δt :

$$P(x = 1) = \frac{(N_{\text{ср}} 2\tau)^1}{1!} e^{-N_{\text{ср}} 2\tau} = N_{\text{ср}} 2\tau e^{-N_{\text{ср}} 2\tau},$$

$$P(x = 1) \approx 0,0002.$$

Вероятность появления двух и более импульсов в течение интервала времени $\Delta t = 2\tau$:

$$P(x \geq 2) = 1 - P(x = 0) - P(x = 1),$$

$$P(x \geq 2) \approx 0,000004.$$

Из приведенных расчётов следует, что вероятностью одновременного появления 2-х и более импульсов можно пренебречь.

3.5 Расчёт барометрического коэффициента установки НД

Для иллюстрации влияния барометрического эффекта на установки НД, на рис. 3.12 приведены вариации темпа счёта модуля 0 НД МОСКВА и атмосферного давления по данным за 2019 г.

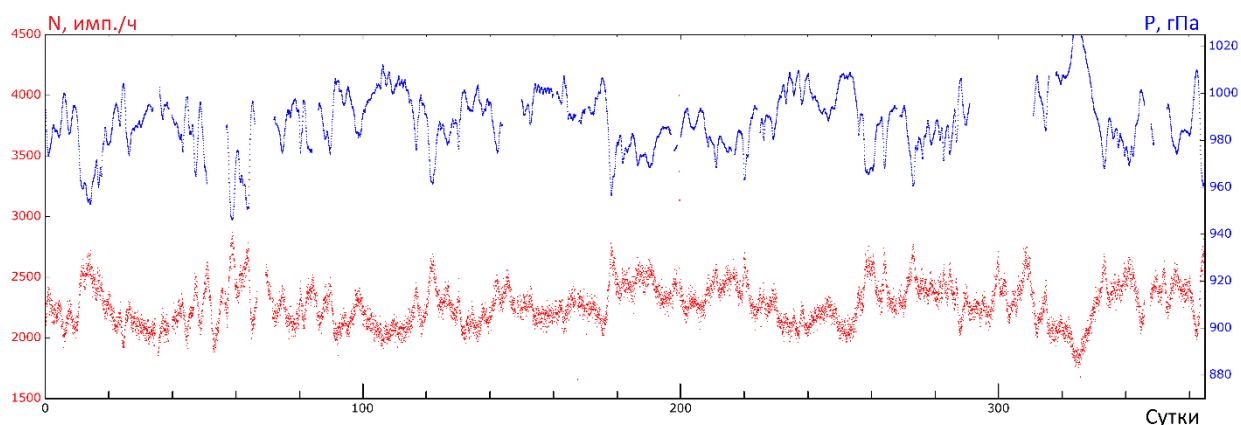


Рис. 3.12 – Вариации темпа счёта модуля 0 НД МОСКВА (красная кривая) и атмосферного давления (синяя кривая) за 2019 г.

Проведено исследование зависимости темпа счёта N модулей НД от атмосферного давления P . Из исходных данных получены среднечасовые скорости счёта установки N [импульсов/ч]. Для определения барометрической зависимости, из массива часовых данных отобраны данные, удовлетворяющие неравенству:

$$\begin{cases} |\Delta N| \leq 2000 \\ |\Delta P| \leq 30, \end{cases} \quad (3.4)$$

где

$$\Delta N = N - N_0;$$

$$\Delta P = P - P_0;$$

N – темп счёта за час [импульсов/ч];

N_0 – средний темп счёта за час [импульсов/ч];

P – атмосферное давление [гПа];

P_0 – среднее (стандартное) атмосферное давление [гПа], измеренное датчиком давления, расположенным внутри модуля НД.

Уравнение (3.4) является условием для исключения из выборки данных, характеризующихся резкими изменениями темпа счёта и давления, которые, вероятно, являются следствием аппаратных сбоев установки. Например, отключения питания. Значения констант подобраны экспериментально. Средние значения темпа счёта, атмосферного давления за период измерения, а также, среднеквадратичные отклонения, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Средние значения темпа счёта и измеренного атмосферного давления для установок НД.

Установка	Интервал времени	Средний темп счёта (N_0), импульсов/ч	Среднеквадратичное отклонение (σ_N), импульсов/ч	Среднее значение атмосферного давления (P_0), гПа	Среднеквадратичное отклонение (σ_P), гПа.
НД CASLEO 0	06.15– 12.19	13888,02	821,42	697,39	3,85
НД CASLEO 1	06.15– 12.19	14260,27	877,14	697,10	3,64
НД CASLEO 2	06.15– 12.19	13575,20	808,32	697,34	3,85
НД МОСКВА 0	01.19– 12.19	2266,06	171,51	988,04	12,94
НД МОСКВА 1	01.19– 12.19	2342,49	175,82	987,87	12,85
НД ASTANA	01.18- 12.19	2882,50	276,15	966,53	13,97

Барометрический коэффициент β определяется путём нахождения линейной зависимости между $\frac{\Delta N}{N_0}$ и ΔP (рис. 3.13).

Барометрический коэффициент β для модулей установки НД CASLEO был определён по данным за июль 2017 года, для модулей установки НД МОСКВА по данным за ноябрь 2019 года, а для установки НД ASTANA по данным за август 2019 года.

Модуль 0 НД CASLEO:

$$\beta = -0,5609 \pm 0,010\%/гПа; \text{ коэффициент детерминации } R^2 = 0,7978.$$

Модуль 1 НД CASLEO:

$$\beta = -0,5813 \pm 0,009\%/гПа; \text{ коэффициент детерминации } R^2 = 0,8341.$$

Модуль 2 НД CASLEO:

$\beta = -0,5629 \pm 0,010\%/гПа$; коэффициент детерминации $R^2 = 0,8178$.

Модуль 0 НД МОСКВА:

$\beta = -0,5709 \pm 0,010\%/гПа$; коэффициент детерминации $R^2 = 0,9052$.

Модуль 1 НД МОСКВА:

$\beta = -0,5526 \pm 0,006\%/гПа$; коэффициент детерминации $R^2 = 0,9352$.

Модуль 0 НД ASTANA:

$\beta = -0,6232 \pm 0,011\%/гПа$; коэффициент детерминации $R^2 = 0,9063$.

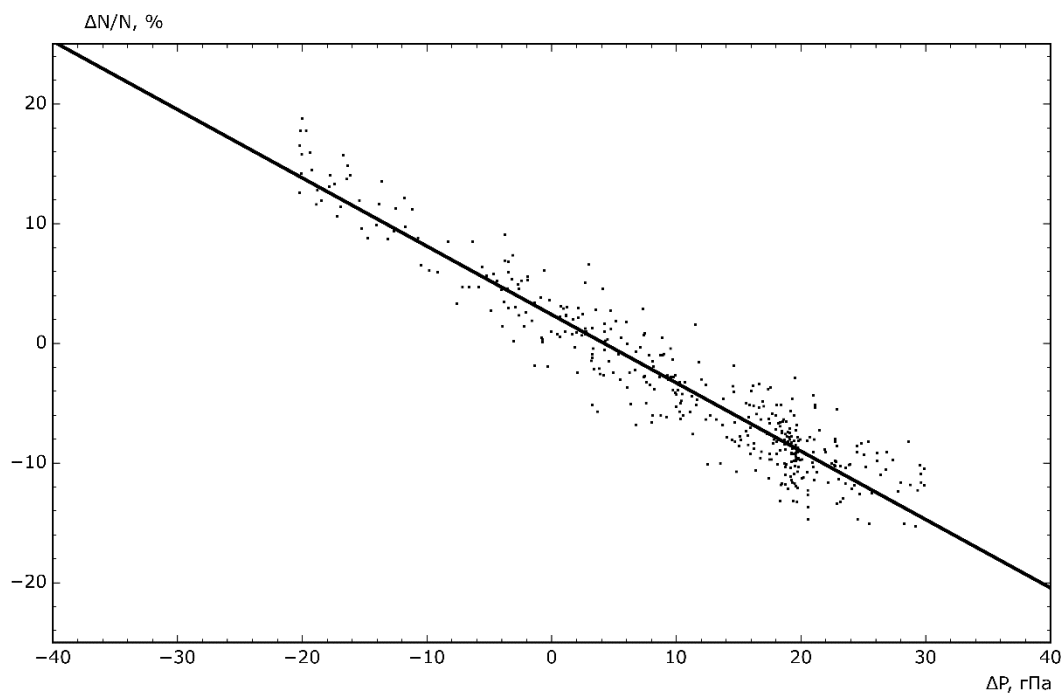


Рис. 3.13 – График зависимости $\Delta N/N_0$ от ΔP для модуля НД 0 МОСКВА по данным за ноябрь 2019 г.

По формуле (2.4, п. 2.4) получены данные (темп счёта), учитывающие барометрический эффект. На рис. 3.14 приведены вариации темпа счёта без поправки на давление модуля НД 0 МОСКВА и вариации с учётом барометрического эффекта по данным за 2019 г.

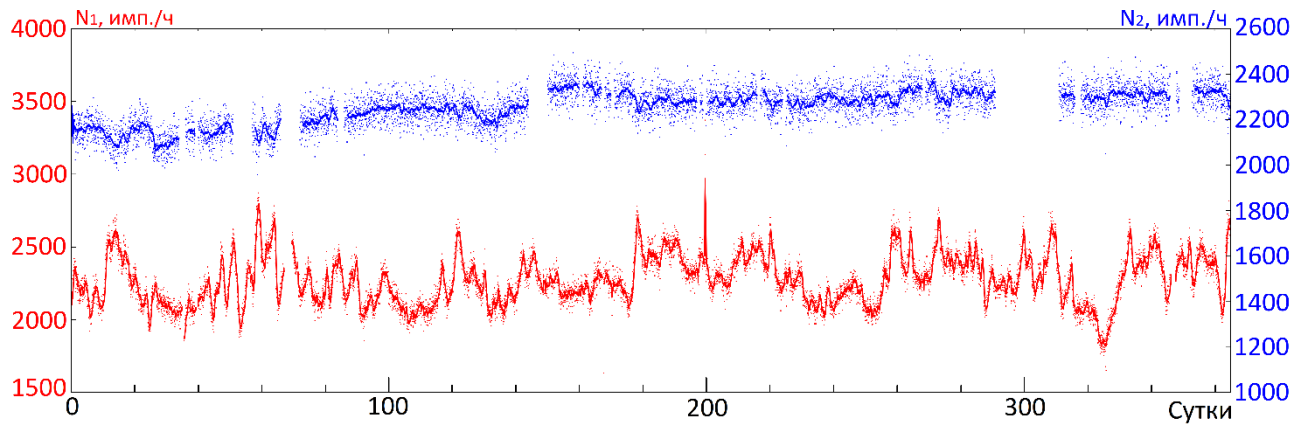


Рис. 3.14 – Вариации темпа счёта модуля 0 НД МОСКВА без учёта барометрического эффекта (красная кривая) и с учётом барометрического эффекта (синяя кривая) по данным за 2019 г.

3.6 Исследование суточной волны темпа счёта нейтронной компоненты КЛ

Для определения суточной волны темпов счёта модулей НД, исходные миллисекундные данные были проинтегрированы до часовых значений. Если в данных за сутки имелся хотя бы один час с нулевым темпом счёта, либо отсутствовала телеметрия, такие данные не учитывались. Далее было произведено усреднение массивов суточных данных по соответствующим часам за указанный период времени (метод наложения эпох).

На верхней панели рис. 3.15 приведены суточные волны темпа счёта модуля 0 НД CASLEO синяя кривая – данные, не учитывающие барометрический эффект, красная кривая – данные, учитывающие барометрический эффект за июль 2016 – ноябрь 2018 гг. На нижней панели рис. 3.15 приведены суточные волны атмосферного давления (синяя кривая) и температуры внутри корпуса прибора (красная кривая). Исследуемый временной интервал был подобран таким образом, чтобы исключить из анализа длительные пробелы в ряде данных. На графике присутствуют два ярко выраженных максимума темпа счёта, приблизительно, в 8 и 20 часов по всемирному времени (UTC). Максимумам темпа счёта соответствуют минимумы атмосферного давления и наоборот, что подтверждает важность введения и корректность барометрической поправки.

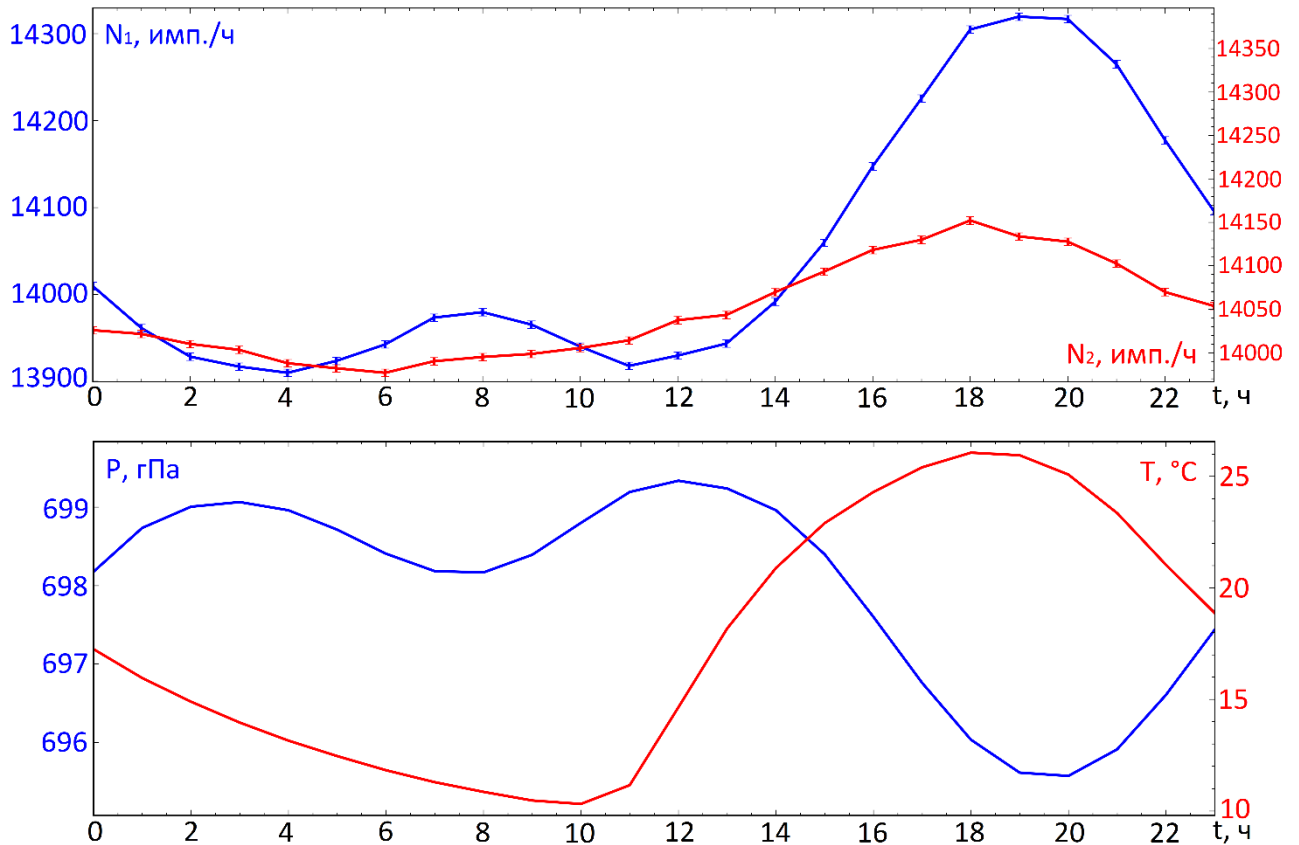


Рис. 3.15 – Суточные волны темпа счёта нейтронов, атмосферного давления и температуры, полученные методом наложения эпох в период с июля 2016 г. по ноябрь 2018 г. по данным модуля 0 НД CASLEO: 1 – данные, не учитывающие барометрический эффект (N_1), 2 – данные, учитывающие барометрический эффект (N_2), 3 – суточная волна температуры внутри корпуса прибора, 4 – суточная волна атмосферного давления.

3.7 Расчёт температурного коэффициента для установки НД

Рассмотрим поправленные на давление данные (красная кривая на верхней панели рис. 3.14): сохраняется суточная волна порядка 0,2% от среднего темпа счёта установки. Максимум кривой темпа счёта совпадает по времени с максимумом температуры внутри корпуса прибора (красная кривая на нижней панели рис. 3.15). Отсюда возникает задача исследовать температурную зависимость НД, которая может быть следствием аппаратных эффектов: вариации температуры замедлителя нейтронов [99] и температурные зависимости выходных напряжений высоковольтных модулей питания. Данный расчёт был проведен только для модулей 0-2 НД CASLEO, так как НД МОСКВА и НД ASTANA расположены в помещениях.

Рассмотрим температурный эффект как функцию зависимости изменения темпа счёта (поправленного на давление) от температуры:

$$\left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)_T = \alpha \Delta T, \quad (3.5)$$

где

$$\Delta N = N_{PC} - N_0;$$

$$\Delta T = T - T_0;$$

α – температурный коэффициент [%/°C];

T – текущая температура внутри корпуса модуля НД [°C];

T_0 – средняя температура внутри корпуса модуля НД [°C].

Среднее значение температуры внутри корпуса модуля 0 НД CASLEO по данным за июнь 2015 г. – декабрь 2019 г.: $T_0 = 17,40$ °C, $\sigma_T = 8,07$ °C.

Среднее значение температуры внутри корпуса модуля 1 НД CASLEO по данным за июнь 2015 г. – декабрь 2019 г.: $T_0 = 16,97$ °C, $\sigma_T = 8,25$ °C.

Среднее значение температуры внутри корпуса модуля 2 НД CASLEO по данным за июнь 2015 г. – декабрь 2019 г.: $T_0 = 17,55$ °C, $\sigma_T = 8,05$ °C.

Температурный коэффициент α для модулей установки НД CASLEO был определён по данным за июль 2017 года (аналогично барометрическому коэффициенту).

Модуль 0 НД CASLEO (рис. 3.15):

$$\alpha = -0,0017 \pm 0,0072\%/гПа; \text{ коэффициент детерминации } R^2 = 0,00008.$$

Модуль 1 НД CASLEO:

$$\alpha = 0,0079 \pm 0,0062\%/гПа; \text{ коэффициент детерминации } R^2 = 0,00217.$$

Модуль 2 НД CASLEO:

$$\alpha = -0,0259 \pm 0,0067\%/гПа; \text{ коэффициент детерминации } R^2 = 0,01969.$$

На графике 3.16 показано, что в данном диапазоне температур зависимость $\Delta N/N_0$ от ΔT является несущественной и температурным эффектом для установок НД можно пренебречь. Следовательно, остаточная волна на рис. 3.15 является следствием суточной анизотропии потоков КЛ.

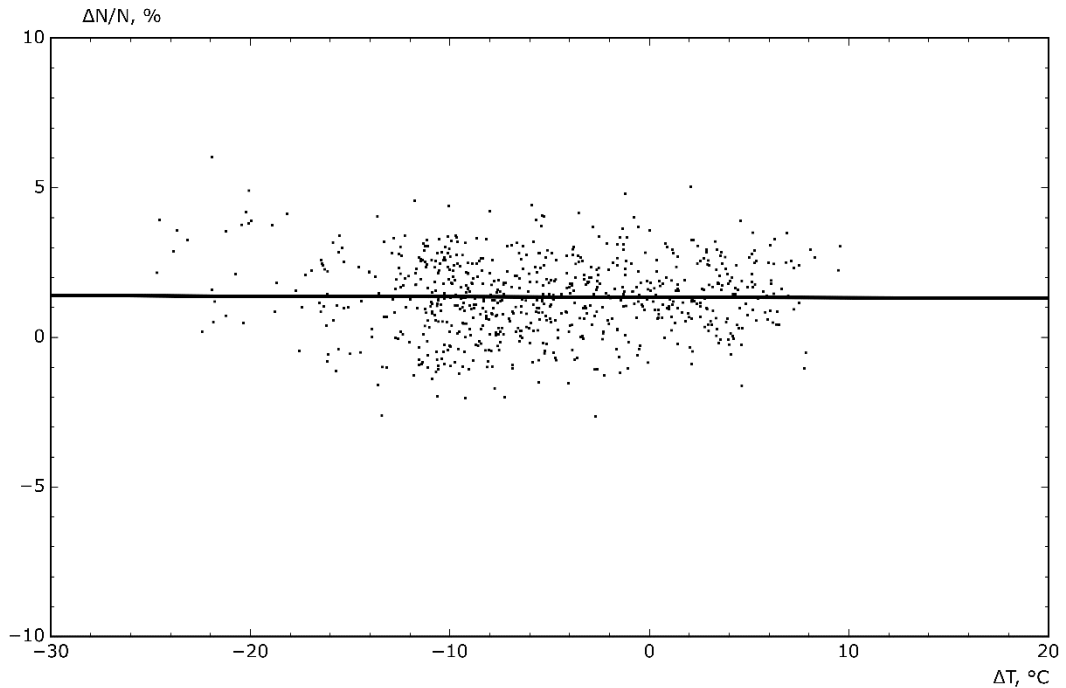


Рис. 3.16 – График зависимости $\Delta N/N_0$ от ΔT для модуля НД 0 CASLEO по данным за июль 2017 г.

3.8 Фурье-анализ суточной волны

Для часовых данных темпа счёта НД CASLEO за период июль 2016 – ноябрь 2018 гг. определим амплитудные спектры. Воспользуемся формулой дискретного преобразования Фурье [100]:

$$Y_k = \sum_{n=0}^{N-1} y_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn}, \quad (3.6)$$

где

N – число измерений темпа счёта модулем НД (часовых данных);

$y_n, n = 0, \dots, N - 1$, – измеренные значения темпа счёта модуля НД за час;

$Y_k, k = 0, \dots, N - 1$, – комплексные амплитуды.

Частота дискретизации временного ряда равна $F_s = 1/\Delta t$, где Δt – скважность ряда данных, равная 1 ч.

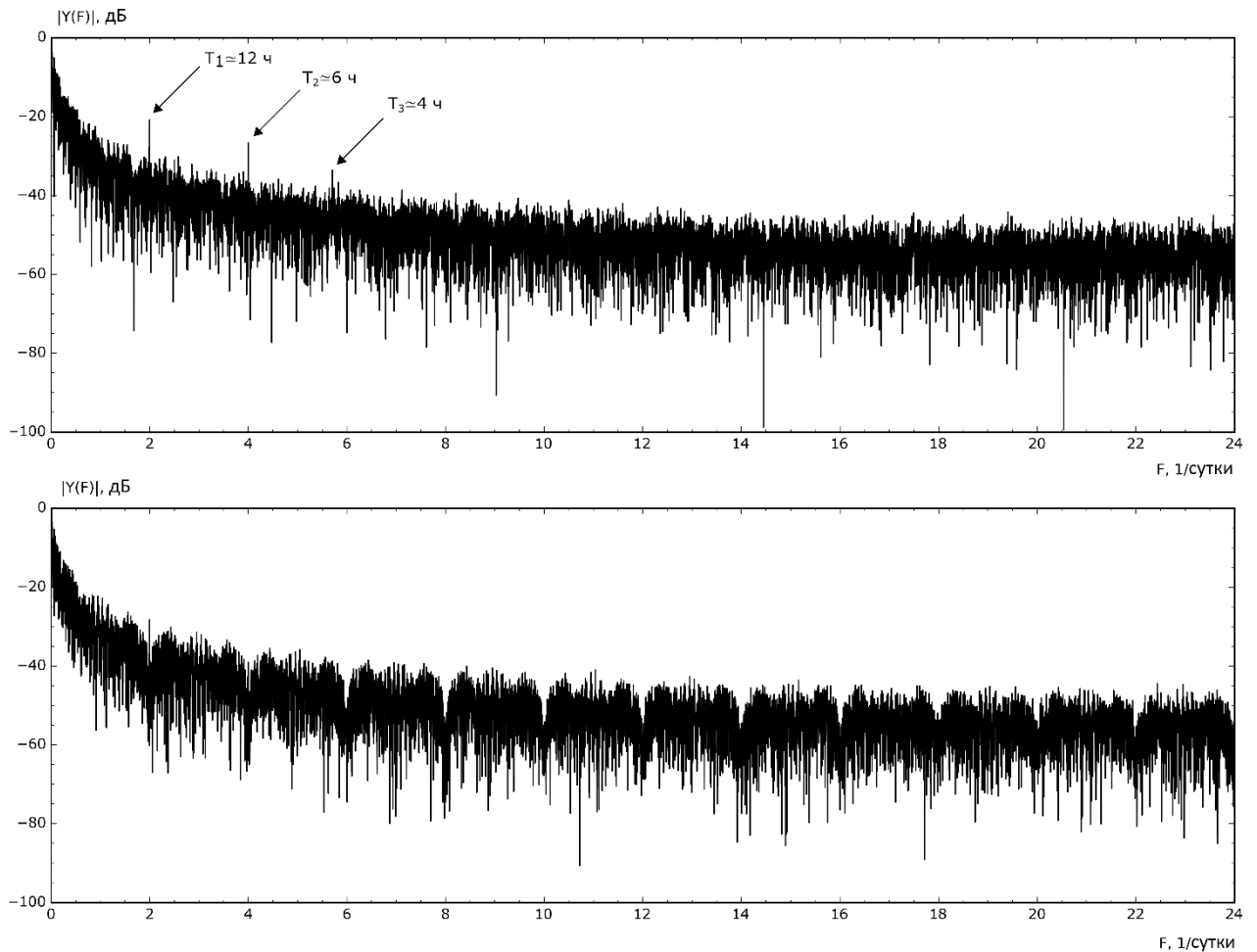


Рис. 3.17 – График амплитудного спектра данных темпа счёта для модуля 0 НД CASLEO (верхняя панель – без учёта барометрической поправки, нижняя панель – с учётом барометрической поправки) по данным с июля 2016 г. по ноябрь 2018 г.

На рис. 3.17 приведены амплитудные спектры для модуля 0 НД CASLEO: верхняя панель – исходные данные, нижняя панель – данные, учитывающие барометрический эффект.

На графике (без барометрической поправки) выделяются три характерные гармоники: 2 сут^{-1} , 4 сут^{-1} и 6 сут^{-1} , то есть, 12, 6 и 4 часа, соответственно.

Эти гармоники отсутствуют (не превышают уровень шума) на графике спектра по данным, учитывающим барометрическую поправку, из чего следует, что они вызваны суточной вариацией атмосферного давления. Гармоника с частотой 2 сут^{-1} присутствует на графиках суточной волны темпа счёта модулей НД CASLEO и атмосферного давления в виде максимумов на 8 и 20 часов. Гармоники, 4 сут^{-1} и 6 сут^{-1} , вероятно, в виду меньших величин амплитуды, не выражены в явном виде. Графики для модулей 1 и 2 НД не приводятся, так как практически повторяют результаты, показанные для модуля 0 НД.

3.9 Корреляция с нейтронными мониторами

По данным за 2019-2020 гг. была установлена зависимость между данными установок НД МОСКВА 0-1 (с учётом барометрического эффекта) и МНМ [87]. Исходные данные темпа счёта модулей НД были проинтегрированы до часовых с усреднением за сутки. Данные МНМ были также усреднены за сутки. После посуточного усреднения, из ряда данных были удалены точки, содержащие нулевые измерения (НД либо МНМ).

Таким образом, за 2019-2020 гг. для модуля НД 0 имеются в наличии 612 точек (суток), а для модуля НД 1 имеются 519 точек (модуль НД 1 запущен в июне 19-го года).

На рис. 3.18 приведён график зависимости данных модуля НД 0 МОСКВА от данных МНМ за 2019-2020 гг. Коэффициент корреляции: $R = 0,49$.

На рис. 3.19 приведён график зависимости данных модуля НД 1 МОСКВА от данных МНМ за 2019-2020 гг. Коэффициент корреляции: $R = 0,42$.

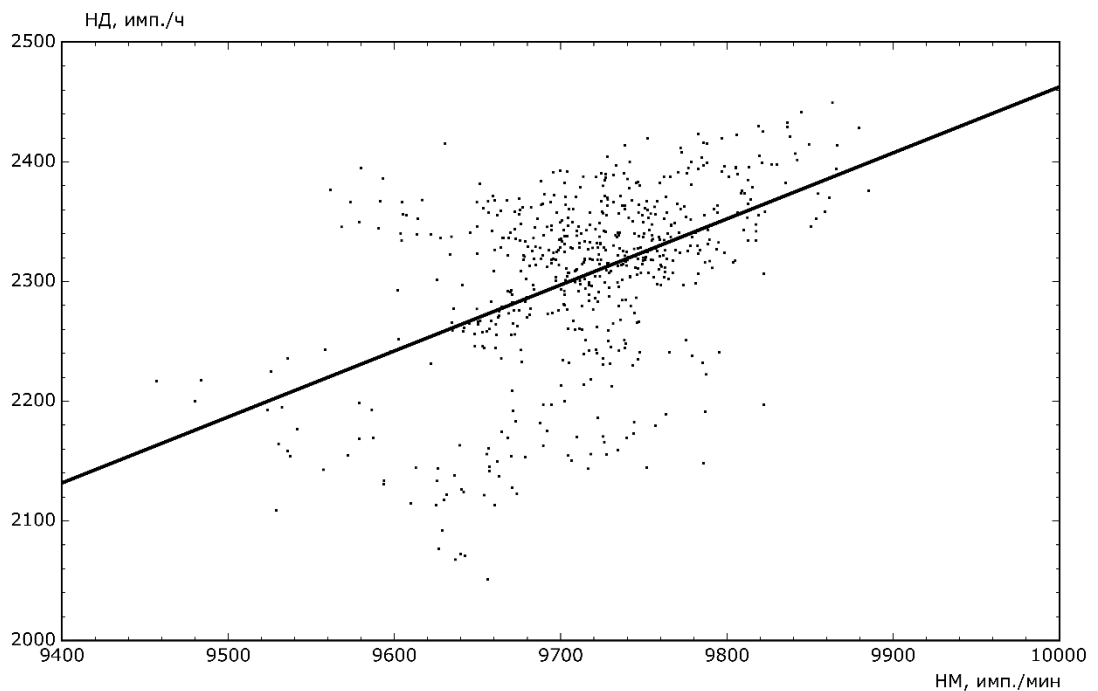


Рис. 3.18 – График зависимости темпа счёта модуля НД 0 МОСКВА (данные с учётом барометрического эффекта) от темпа счёта московского нейтронного монитора по данным за 2019-2020 гг.

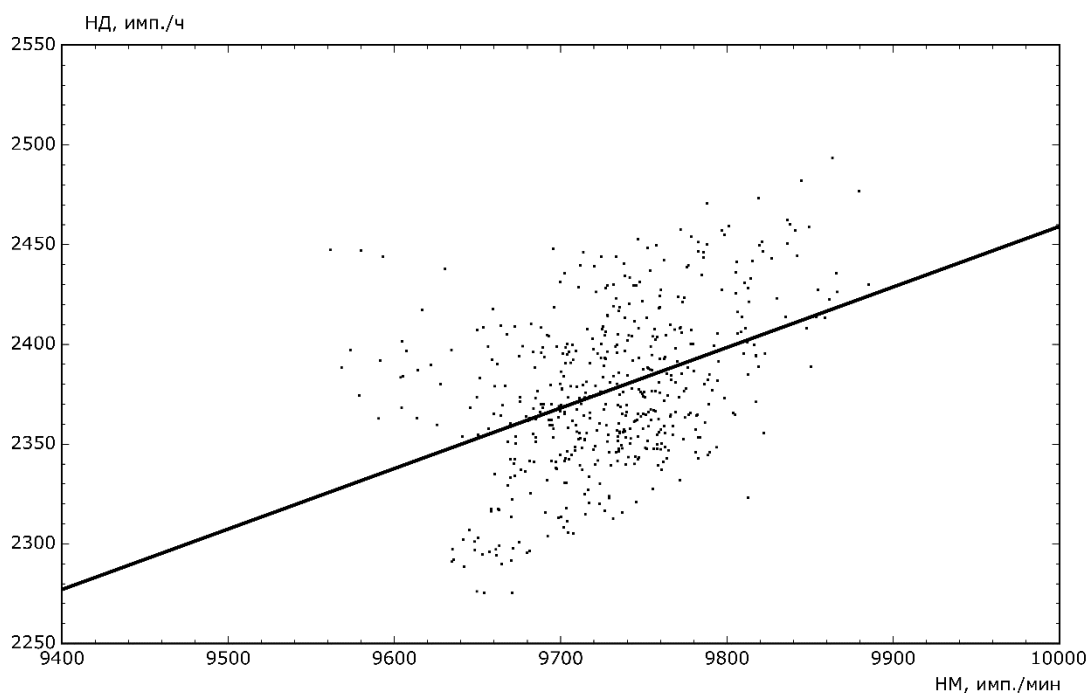


Рис. 3.19 – График зависимости темпа счёта модуля НД 1 МОСКВА (данные с учётом барометрического эффекта) от темпа счёта московского нейтронного монитора по данным за 2019-2020 гг.

Выводы к главе 3

В данной главе приведена схематехническая реализация установки НД, а также описание программного обеспечения. Произведён расчёт точности подсчёта импульсов от нейтронных счётчиков СНМ-18.

Для каждого из 6 модулей НД (CASLEO, Москва, Нур-Султан) произведён расчёт барометрического коэффициента. С использованием поправленных на давление данных, была построена суточная волна для НД CASLEO. Для возможной оценки влияния вариаций температуры на темп счёта НД, был произведён расчёт температурного коэффициента, по результатам которого выявлено отсутствие значимого эффекта для температурных вариаций в CASLEO. Следовательно, остаточная волна на рис. 3.14 является следствием суточной анизотропии потоков КЛ. Для модулей НД, расположенных в Москве и Нур-Султане температурный коэффициент не рассчитывался, так как в данном случае во внимание принимались возможные эффекты, связанные с вариациями температуры внутри корпуса прибора, а данные установки постоянно находятся в помещениях.

Между данными НД и МНМ найдена зависимость, коэффициент корреляции которой $R \approx 0,4-0,5$.

В качестве дальнейшего анализа суточной волны, были получены амплитудные спектры исходных данных и данных, с введённой барометрической поправкой. График суточной волны и амплитудного спектра для модуля 0 НД CASLEO подтверждают наличие барометрического эффекта в ряду данных, а, также, правильность введения барометрической поправки.

Глава 4. Экспериментальный комплекс «Гамма-спектрометр»

В 2014 г. в ДНС ФИАН разработан аппаратно-программный комплекс «Гамма-спектрометр», предназначенный для детектирования вторичного γ -излучения [101]. В 2015 г. в обсерватории CASLEO были установлены и запущены 4 детектирующих модуля данной установки (п. 3.1., рис. 3.1).

4.1 Устройство аппаратно-программного комплекса «Гамма-спектрометр»



Рис. 4.1 – Блок схема аппаратно-программного комплекса «Гамма-спектрометр» в CASLEO.

Комплекс «Гамма-спектрометр» в CASLEO состоит из четырёх детектирующих модулей (рис. 4.1). Каждый детектирующий модуль включает в себя сцинтилляционные

сборки 12S12/3.VD.HVG.PA [102] и электронные блоки. Сцинтилляционная сборка состоит из фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) Hamamatsu R1307 [103] диаметром 76 мм и сцинтиллятора NaI(Tl) диаметра 76,2 мм и толщины 76,2 мм. Электронный блок детектирующего модуля состоит из высоковольтного преобразователя, делителя напряжения и предусилителя. Для питания электронного блока необходимы напряжения ± 12 В. Уровень выходного сигнала на выходе предусилителя лежит в диапазоне 0-10 В.

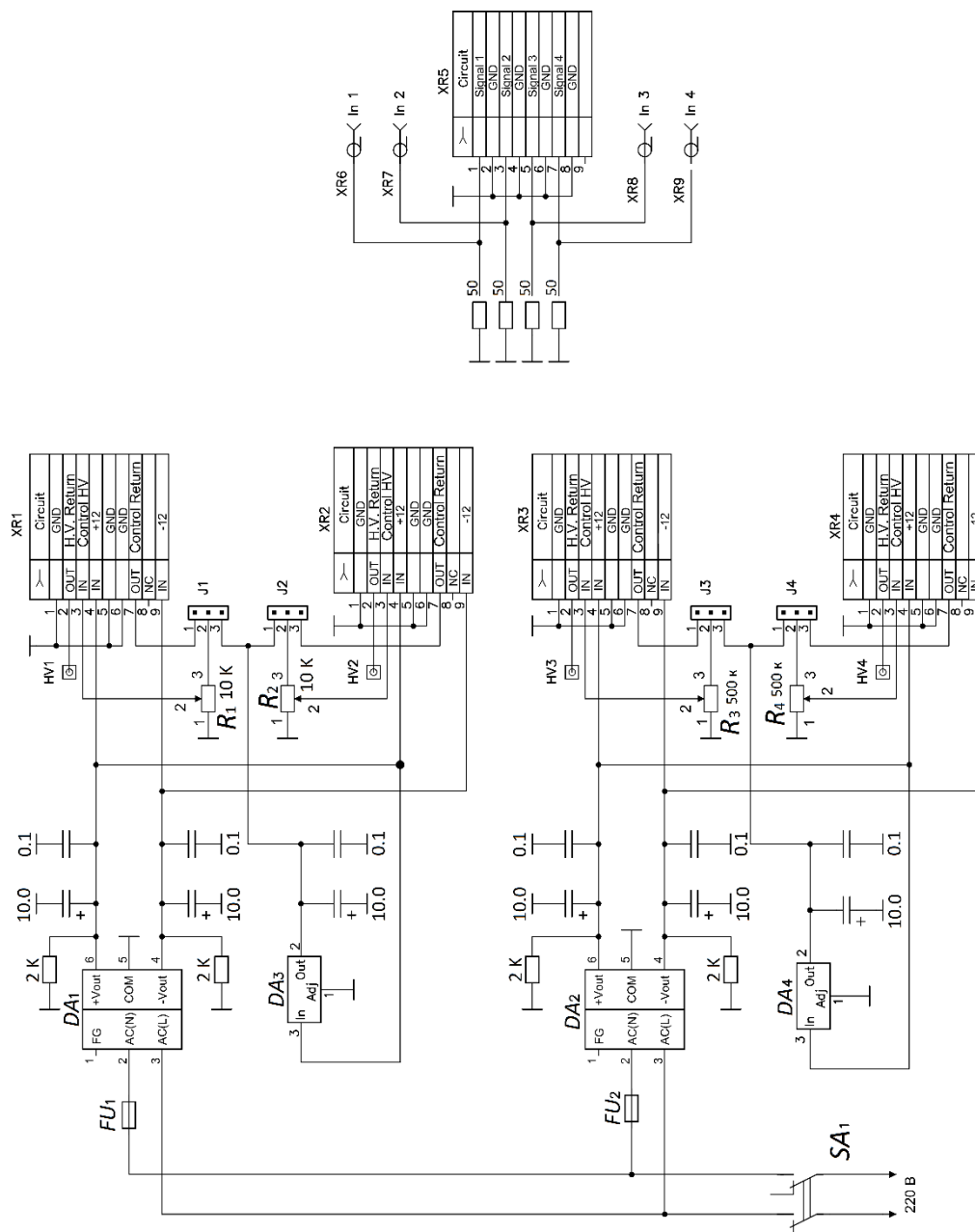


Рис. 4.2 – Принципиальная схема интерфейсного блока комплекса «Гамма-спектрометр».

Детектирующие модули подключаются к интерфейсному блоку (рис. 4.2) через разъёмы питания (XR1–XR4) и сигнальные разъёмы (XR6–XR9). В качестве источников напряжения ± 12 В, используются преобразователи TML 05212 (DA_1 и DA_2) [104]. Каждый

преобразователь рассчитан на питание двух детектирующих модулей. Выходные напряжения высоковольтных преобразователей (входящих в состав сцинтилляционных сборок) настраиваются в диапазоне от -200 В до -1500 В следующим образом: на контакт «Control Return» (в разъёмах XR1–XR4) поступает опорное напряжение, из которого, с помощью потенциометров $R_1 - R_4$, выставляется управляющее напряжение, поступающее обратно на преобразователь питания через контакт «Control HV». В качестве альтернативного источника опорного напряжения также возможно использовать установленные на плате интерфейсного блока линейные стабилизаторы напряжения LM1117 (DA_3 и DA_4). Источник опорного напряжения выбирается переключателями $J_1 - J_4$.

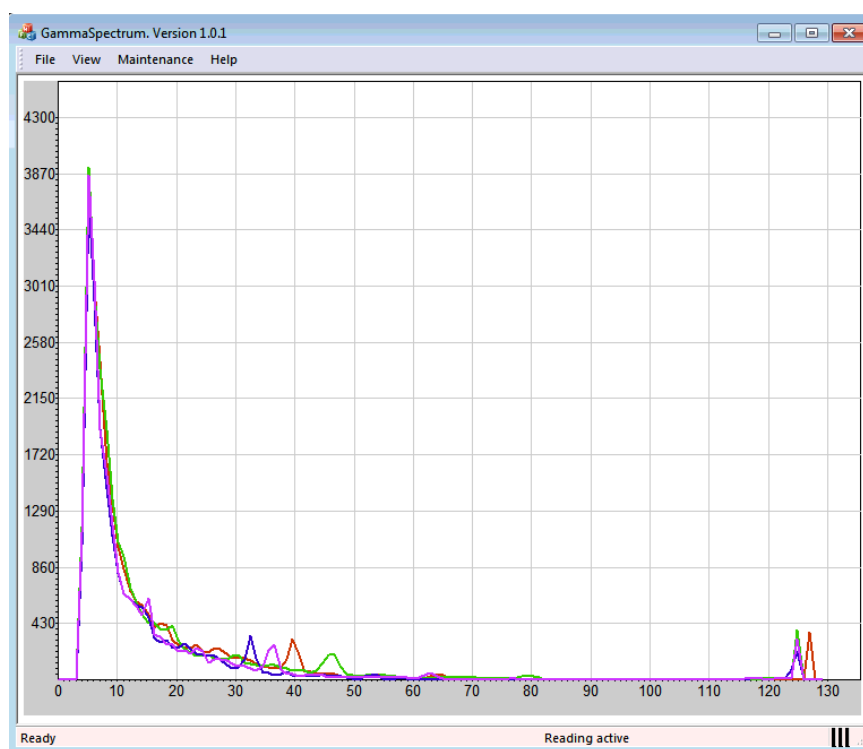


Рис. 4.3 – Окно программы «GammaSpectrum».

Через разъём XR5 сигналы от детектирующих модулей подаются на АЦП USB3000 [105], где они преобразуются в последовательность отсчётов, размером 2 байта. Каждый отсчёт лежит в диапазоне от -8000 до $+8000$, что соответствует диапазону входных сигналов от -5 В до $+5$ В. Сигналы от детектирующих модулей строго положительные, поэтому на вход АЦП поступают данные в диапазоне от 0 до 8000. Следовательно, шаг квантования сигнала – 625 мкВ.

Данные АЦП на ПК передаются по интерфейсу USB. Программное обеспечение (ПО) «GammaSpectrum» позволяет производить настройку точности измерений сигналов: частота

дискретизации АЦП (временное разрешение), шаг квантования сигнала по амплитуде (число каналов) и длительность файла данных по времени.

ПО «GammaSpectrum» (рис. 4.3) разработано для ОС Windows 7. Основная функция данного приложения – сбор данных детектирующих модулей, первичная обработка и формирование выходных файлов за заданный временной интервал (длительность).

```

; ===== GENERAL SETTINGS =====
[GENERAL]
; number of supported channels
Channels = 4

; ADC frequency in kHz
Frequency = 2000

; Time offset from UTC (in hours), 0 - UTC
TimeZone = 0

; display module details info
Verbose = Yes

; ===== FILTER SETTINGS =====
[FILTERING]
; use threshold filter
UseThreshold = Yes

; minimum threshold value (common values coming from ADC are in range [0; 8000] )
MinThreshold = 300

; maximum threshold value (common values coming from ADC are in range [0; 8000] )
MaxThreshold = 8000

; ===== SPECTRUM SETTINGS =====
[SPECTRUM]
; process spectrum analysis, global flag (spectrum files will be stored)
UseSpectrum = Yes

; data files path
DataPath = D:\LPI-RAS\Gamma\Spectrums

; number of data cells (spectrum step)
CellsNumber = 128

; spectrum analysis duration (in seconds)
Duration = 600

; ===== RAW FILES SETTINGS =====
[RAWDATA]
; save raw channel data, global flag (raw data files will be stored)
UseRawData = No

; raw data path
RawDataPath = D:\LPI-RAS\Gamma\RawData

; interval in seconds
Interval = 1800

```

Рис. 4.4 – Фрагмент содержимого файла настроек «settings.ini» программы «GammaSpectrum».

В рабочем окне ПО, различными цветами отображаются текущие дифференциальные спектры четырёх детектирующих модулей. По оси X отображается шкала номеров каналов, по оси Y – темп счёта по каждому каналу.

Настройки параметров ПО указываются в файле «settings.ini» (рис. 4.4). В настоящее время эксперимент проходит с установленной длительностью интервала сбора данных – 600 секунд.

В заголовке каждого файла данных содержится информация о времени старта (UTC), частоте дискретизации АЦП и длительности интервала сбора данных. Далее формируется таблица, в первом столбце которой указан номер n канала, во втором столбце – число импульсов (зарегистрированных γ -квантов) в канале n (дифференциальный спектр), в третьем столбце – суммарное число γ -квантов в каналах, начиная с $n+1$ и далее (интегральный спектр), в четвёртом столбце – энергия γ -квантов в канале n , посчитанная по предварительной калибровке с источниками ^{60}Co и ^{137}CS , результаты которой прописаны в разделе «SINGLE CHANNEL SETTINGS» в файле «settings.ini» для каждого детектирующего модуля.

4.2 Калибровка «Гамма-спектрометра»

Детектирующие модули были предварительно прокалиброваны с помощью источников γ -излучения: ^{60}Co (1,17 МэВ и 1,33 МэВ) и ^{137}CS (661,7 кэВ), на основании которой были подобраны высокие напряжения: 775 В для модуля 0, 789 В для модуля 1, 728 В для модулей 2 и 3, приблизительно соответствующие диапазонам энергий γ -квантов 50 кэВ – 3,5 МэВ для модулей 0 и 1 и 50 кэВ – 5 МэВ для модулей 2 и 3. Данная калибровка проведена в лабораторных условиях и не учитывает возможных аппаратурных эффектов.

На рис. 4.5 показано влияние аппаратурного температурного эффекта на данные «Гамма-спектрометра»: приведены графики дифференциальных спектров для детектирующего модуля 0, полученные усреднением исходных спектров по каждому каналу по данным за месяц. Сплошная линия – спектр за январь 2020 г., пунктирная линия – спектр за июнь 2020 г. Январь был выбран как тёплый месяц, а июнь является одним из самых холодных месяцев для данного региона. Из графиков виден сдвиг характерных пиков спектра, который увеличивается с ростом энергии (номера канала).

На рис. 4.6 данный эффект проиллюстрирован в большем временном масштабе (также на примере детектирующего модуля 0). На верхней панели приведён график зависимости номеров каналов, соответствующих наиболее чётко выделяющемуся пику (^{40}K) от времени (10 суток в период с 01.01.16 по 10.01.16). Временной интервал был выбран произвольно. На нижней панели приведён график зависимости температуры от времени. Данные измерений температуры взяты из телеметрического канала модуля 0 НД CASLEO, который располагается в непосредственной близости от детектирующего модуля 0 «Гамма-спектрометра» (рис. 3.1). Наблюдается сильная отрицательная температурная зависимость, которая вероятно связана с нестабильностью высоковольтного преобразователя. Данный эффект не был обнаружен при первичных проверках в лабораторных условиях. Так как

установки функционируют в CASLEO автономно – нет возможности провести измерения питающих напряжений и внести какие-либо изменения в конструкцию установок.

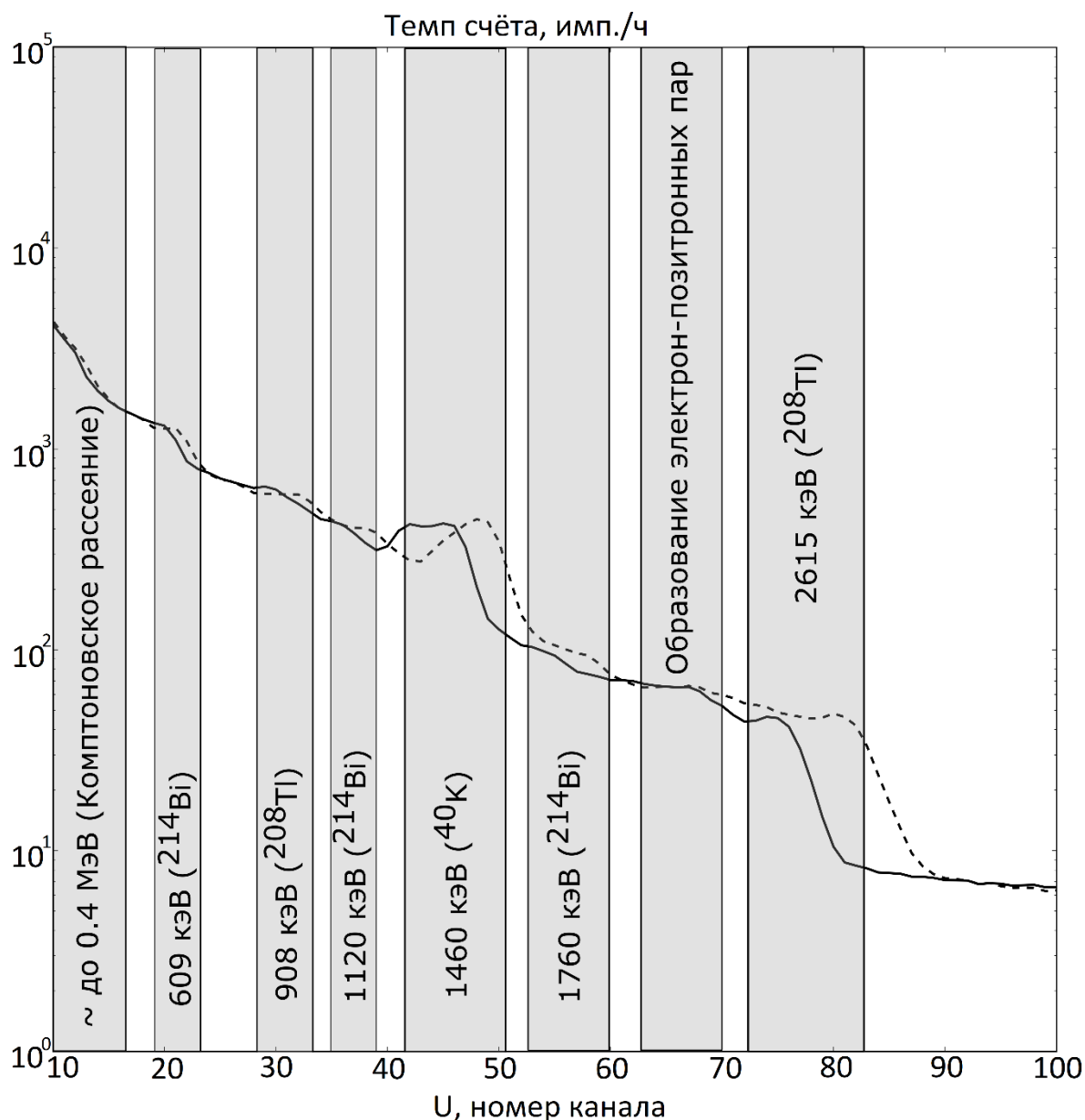


Рис. 4.5 – Графики дифференциального спектра модуля 0. Сплошной линией показан спектр по данным за январь 2020 г., пунктирной линией показан спектр за июнь 2020 г.

В связи с чем, была поставлена задача откалибровать «Гамма-спектрометр», с учётом выявленного аппаратного температурного эффекта. В качестве калибровочных источников γ -излучения использованы изотопы: ^{40}K (1460 кэВ), ^{214}Bi (609 кэВ и 1760 кэВ), ^{208}Tl (908 кэВ и 2615 кэВ), которые являются радиоактивными элементами, содержащимися в атмосфере и почве [106]: Серыми областями на рис. 4.5 показаны окрестности спектральных линий и изотопы, соответствующие им. В энергетическом диапазоне $\sim 0 - 0,4$ МэВ преобладает комптоновское рассеяние γ -квантов, поэтому при калибровке он не учитывается.

Энергетический пик, лежащий в диапазоне (65–70)-го номера каналов, возникает из-за процесса образования электрон-позитронных пар и также не учитывается [107].

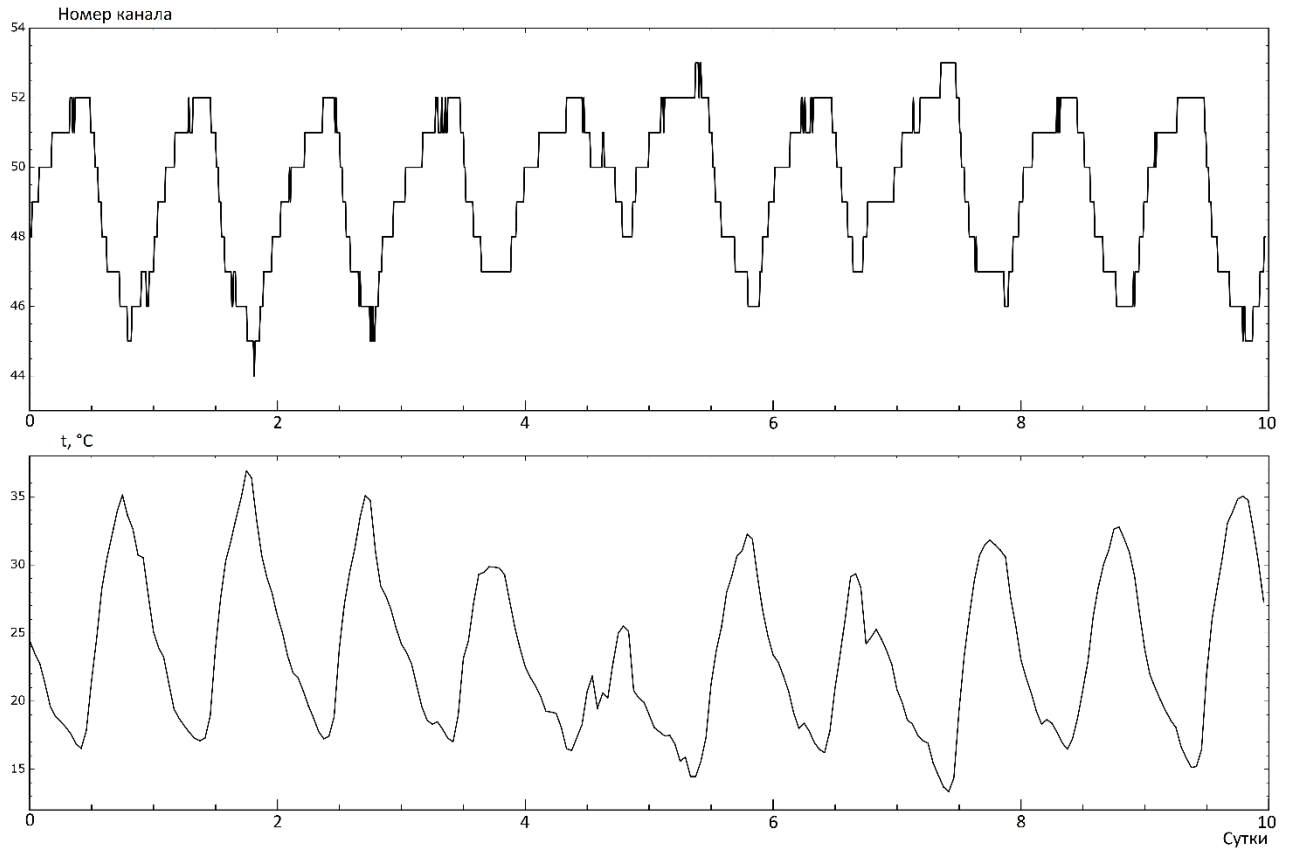


Рис. 4.6 – Временной ход значения номера канала модуля 0 «Гамма-спектрометра» CASLEO, соответствующего спектральной линии изотопа ^{40}K по данным за 01.01.16-10.01.16 (верхняя панель), временной ход температуры за тот же период времени по данным телеметрических измерений модуля 0 НД в CASLEO (нижняя панель).

К энергиям известных шести спектральных линий добавлено начальное условие: $E(0) = 0$. В результате имеется 7 точек E_n : $E_0(U_0=0)$, $E_1(U_1)$, ..., $E_6(U_6)$, разделяющих спектральный диапазон детектирующего модуля на 6 интервалов, значения энергий внутри которых можно задать кусочно-линейной функцией:

$$E(U) = E_n + k_n(U - U_n) \quad (4.1)$$

где

$E(U)$ – значение энергии, соответствующее номеру канала U ;

E_n – начальное значение энергии в данном интервале, соответствующее номеру канала U_n ;

k_n – угловой коэффициент текущей интерполяционной прямой:

$$k_n = \frac{E_{n+1} - E_n}{U_{n+1} - U_n} \quad (4.2)$$

где

E_{n+1} – конечное значение энергии в текущем интервале, соответствующее номеру канала U_{n+1} .

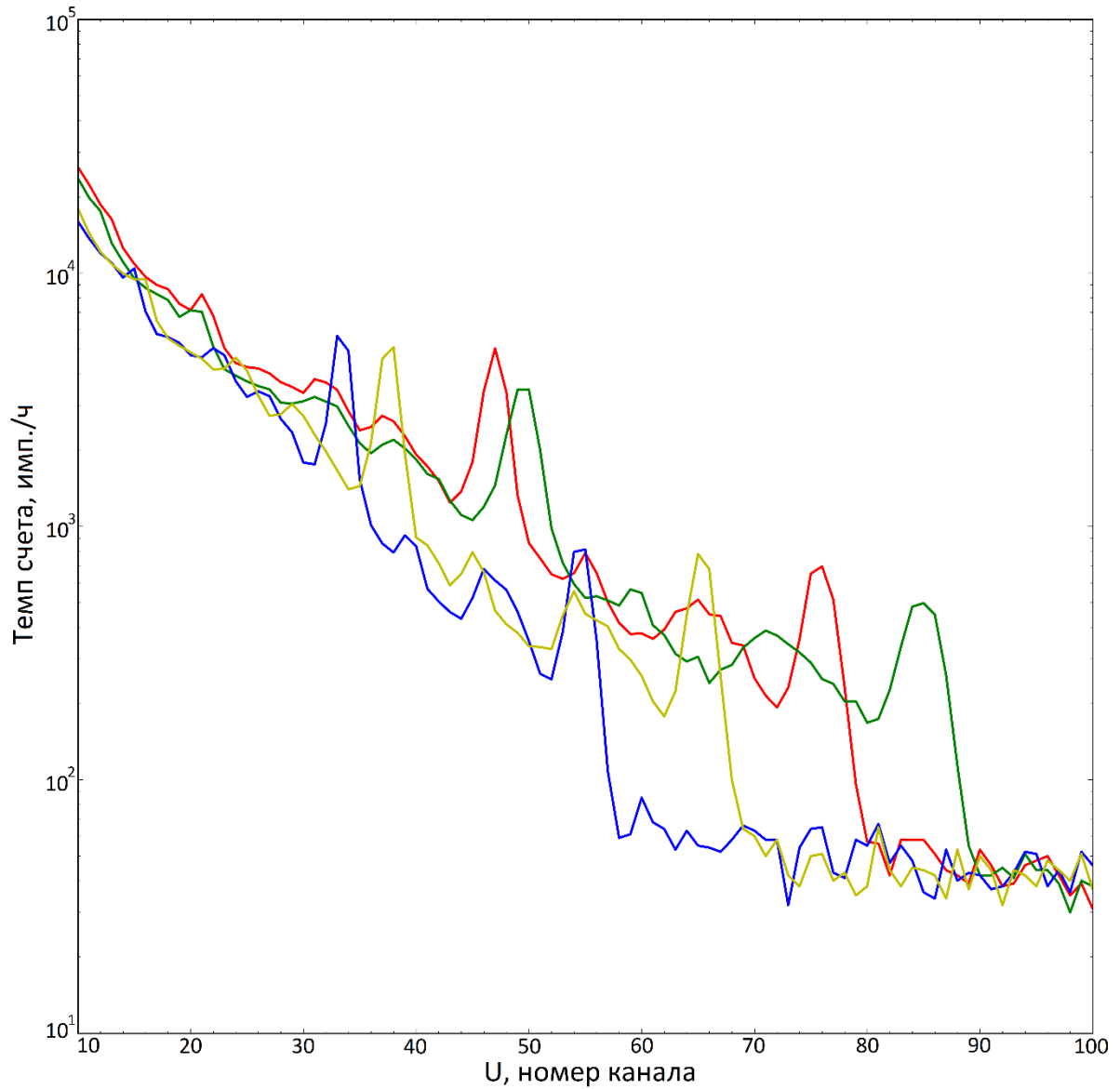


Рис. 4.7 – Исходные дифференциальные спектры для 4-х детектирующих модулей, полученные по данным за 01.01.2017 с 00:00 до 01:00 часов UTC. Красная линия – данные детектирующего модуля 0, зелёная линия – данные детектирующего модуля 1, синяя линия – данные детектирующего модуля 2, жёлтая линия – данные детектирующего модуля 3.

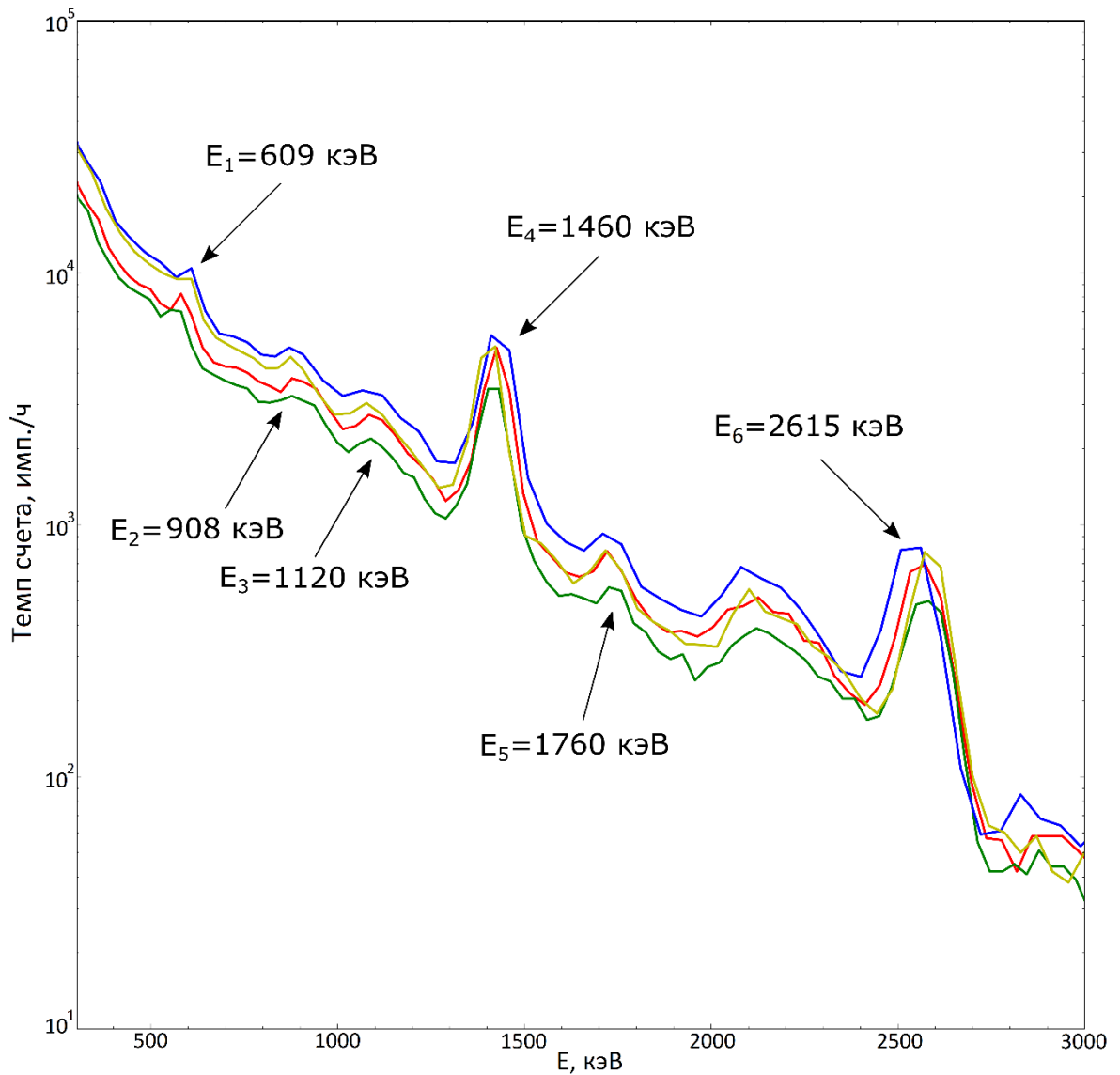


Рис. 4.8 – Дифференциальные спектры для 4-х детектирующих модулей по данным за 01.01.2017 с 00:00 до 01:00 часов UTC, полученные после пересчёта номеров каналов в энергию γ – квантов. Красная линия – данные детектирующего модуля 0, зелёная линия – данные детектирующего модуля 1, синяя линия – данные детектирующего модуля 2, жёлтая линия – данные детектирующего модуля 3.

Для демонстрации данной методики, рассмотрим произвольный отрезок времени, например, 01.01.2017 с 00:00 до 01:00 часов UTC (рис. 4.7). По взаимному расположению пиков ^{40}K для каждого канала, видно, что чувствительность детектирующих модулей 0-1 превосходит чувствительность детектирующих модулей 2-3, в следствие более высоких напряжений, поданных ФЭУ.

Исходные спектры четырёх детектирующих модулей разбиты на 6 интервалов, в каждом из которых по формулам (4.1) и (4.2) получены значения энергий γ -квантов, в зависимости от номера канала.

Результат калибровки по естественным источникам γ -излучения показан на рис. 4.8. Спектры приведены к согласию, как между собой, так и с данными по энергиям естественных источников γ -излучения. На графиках присутствует разница абсолютных значений темпов счёта детектирующих модулей, которая, при необходимости, может быть устранена с помощью нормировки.

Разрешающую способность «Гамма-спектрометра» можно оценить по ширине пика изотопа ^{40}K на полувысоте: $\Delta E/E \cong 13,7 [\%]$,

где

$\Delta E \cong 200$ кэВ – ширина на полувысоте пика изотопа ^{40}K (рис. 4.8);

$E = 1460$ кэВ – энергия γ -квантов ^{40}K .

Выводы к главе 4

В данной главе описаны схмотехнические решения и прикладное программное обеспечение, разработанные для установки «Гамма-спектрометр».

Во время испытаний в CASLEO был выявлен существенный аппаратурный температурный эффект, для компенсации которого была разработана методика калибровки по спектральным линиям природных изотопов, залегающих в почве и горных породах. Данная методика позволяет перейти от единиц измерения АЦП (номеров канала) к величинам энергий, при этом учитывая аппаратурный температурный эффект и не требующая каких бы то ни было дополнительных измерений, эталонных источников γ -излучения, а также, внесений изменений в конструкцию установки.

Глава 5. Некоторые экспериментальные результаты

В данном разделе приведены исследования чувствительности разработанных экспериментальных установок. Отдельно рассмотрены несколько событий, произошедшие в 2016-2019 гг. Для сравнения приводятся данные нейтронных мониторов. Исследования физических причин вариаций является задачей будущих работ.

5.1 Форбуш-эффекты

Для установок CARPET-МОСКВА и НД 0 МОСКВА был проведён сравнительный анализ данных на предмет совпадений с данными Каталога Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений [108] за 2019 г. Согласно каталогу, за этот период времени зафиксировано 124 Форбуш-эффекта.

Для каждого события из каталога предоставляется значения параметра «MagnM» - величина Форбуш-эффекта (ФЭ) для частиц жёсткости 10 ГВ, рассчитанная как максимальное изменение плотности КЛ, полученное методом глобальной съёмки по данным мировой сети НМ.

По данным установки CARPET-МОСКВА (с учётом барометрического и температурного эффектов) было зарегистрировано 77 из 124 понижений. Из 47 необнаруженных событий, 15 событий попали во временные интервалы, когда установка была отключена. Среди оставшихся 32 событий, 2 имеют величину параметра «MagnM» равную 0,6. Остальные события имеют величину $\leq 0,5$. Таким образом, для надёжной регистрации на установках CARPET, величина «MagnM» должна быть $\geq 0,7$.

По данным установки НД 0 МОСКВА (с учётом барометрического эффекта) было зарегистрировано 46 из 124 понижений за указанные даты. Из 78 необнаруженных событий, 22 событий попали во временные интервалы, когда установка была отключена. Среди оставшихся 56 событий, 2 имеют величину параметра «MagnM» равную 1,1. Таким образом, для надёжной регистрации на установках НД, величина «MagnM» должна быть $\geq 1,2$.

Стоит отметить, что в данном анализе использованы данные установок CARPET-МОСКВА и НД 0 МОСКВА, так как, в силу своего географического расположения, они являются наименее чувствительными среди установок данного типа (п.2.4, п.3.5).

Далее приводится подробный сравнительный анализ некоторых событий за 2016-2019 гг. по данным установок CARPET, НД и «Гамма-спектрометр» относительно нейтронных мониторов и данных по межпланетной и магнитосферной активностях.

5.1.1 События в июле и сентябре 2017 г.

Для описания характеристики межпланетных процессов используются следующие параметры: B_z компонента межпланетного магнитного поля (в спокойном состоянии -1 нТл), SW - скорость плазмы солнечного ветра (в спокойном состоянии 300-350 км/с).

Для описания характеристики геомагнитных процессов используются следующие параметры: планетарный K_p -индекс (в спокойном состоянии $\leq 4,0$) и Dst -индекс (в спокойном состоянии 0 нТл).

В активной области NOAA2665 (S06, W29) на Солнце 14-17 июля 2017 г. произошла серия вспышек. Наиболее мощная вспышка (M2.4), произошла 14 июля в ~2:00 UTC. 14 июля в ~3:00 UTC зарегистрировано увеличение потоков солнечных протонов (<100 МэВ) по данным измерений на космическом аппарате GOES-13 (рис. 5.1) [109]. Скорость солнечного ветра достигла к 17 июля 625 км/с (рис.5.2а). Геомагнитное возмущение началось примерно в 6:00 UTC [110] (рис. 5.2 б-г).

При анализе данного события использованы данные CARPET-ASTANA и НД CASLEO. Московские НД и CARPET, НД ASTANA на тот момент еще не введены в эксплуатацию.

16 июля по данным установки CARPET-ASTANA [66] зарегистрировано понижение потоков КЛ. На рис. 5.3 приведены графики вариаций темпа счёта в канале TEL (с учётом барометрического эффекта) для модулей 0 (красная кривая) и 1 (синяя кривая) установки в период 10-20 июля 2017 года. Амплитуда понижения составила, примерно, 1,7% и 1,4% от среднего темпа счёта.

На 3-х модулях высокогорного НД CASLEO [93-95] также зарегистрировано понижение потоков КЛ (рис. 5.4), с амплитудой, примерно 12%.

Данные результаты согласуются с измерениями на наземных нейтронных мониторах. Для сравнения на рис. 5.5 приводятся графики темпа счёта за аналогичный период времени для следующих нейтронных мониторов: Юнгфрауйох (Jungfraujoch IGY; $R_c = 4,49$ ГВ; синяя кривая) [111], Алматы ($R_c = 6,69$ ГВ; красная кривая) [112] и Апатиты ($R_c = 0,65$ ГВ; зелёная кривая) [113]. Амплитуда понижения темпа счёта нейтронных мониторов для данного события: 3,8%, 3,1% и 4,4% соответственно.

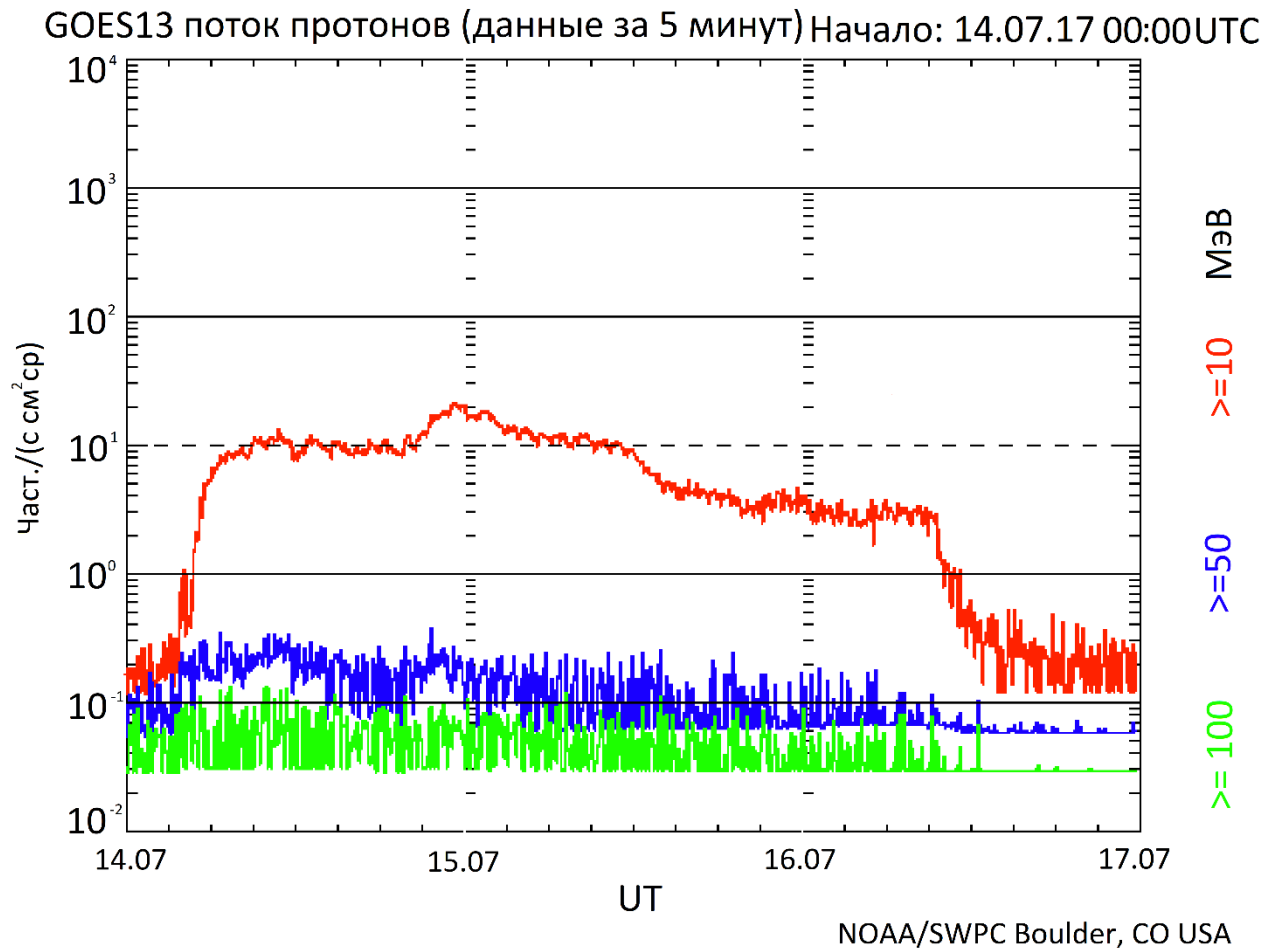


Рис. 5.1 – Потoki солнечных протонов по данным измерений космического аппарата GOES13 (ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/2017/2017_plots/proton/) за период 14-16 июля 2017 г.

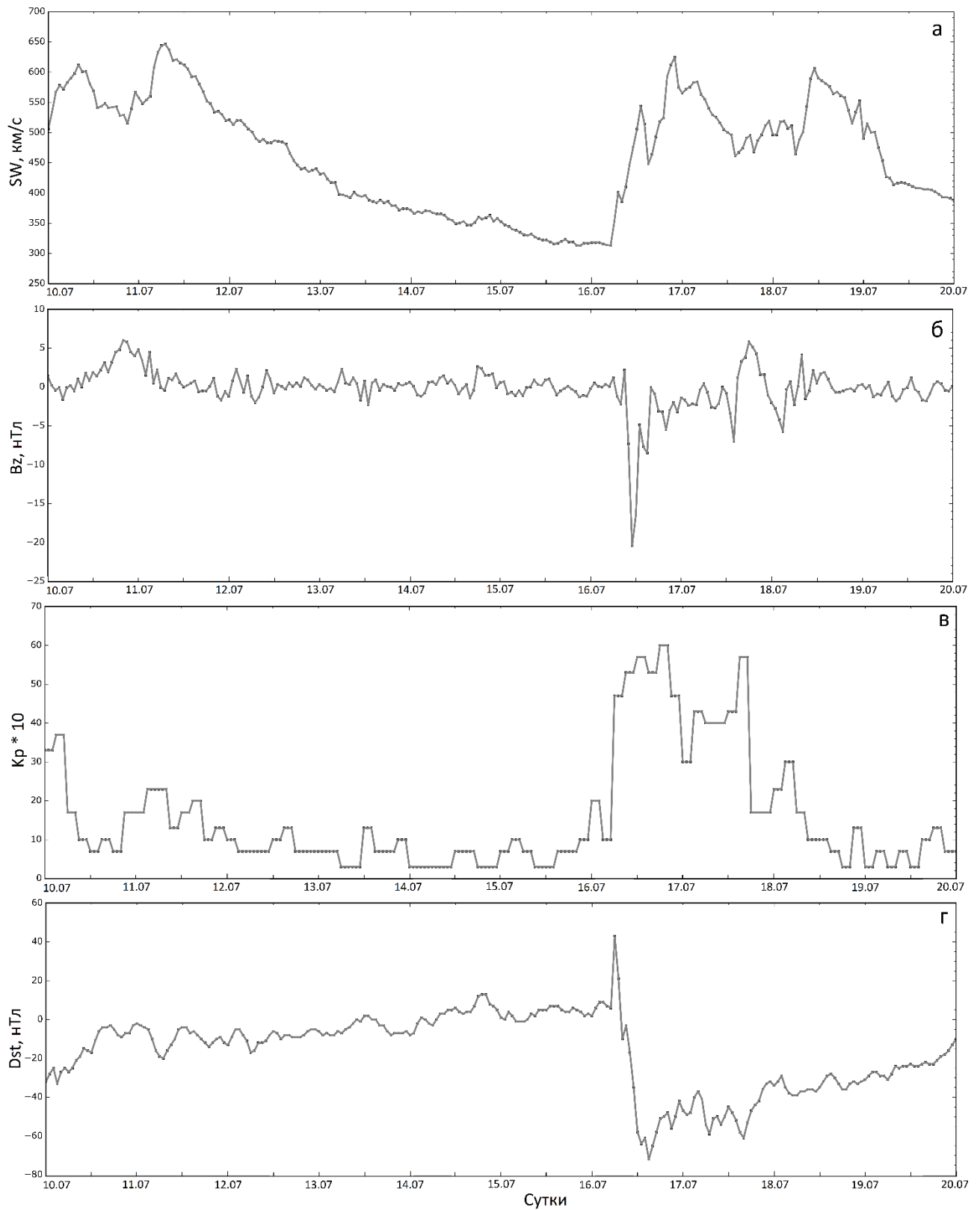


Рис. 5.2 – Данные межпланетной и магнитосферной активности в период 10-20 июля 2017 года по базе данных OMNI: скорость солнечного ветра (а), B_z -компонента межпланетного магнитного поля (б), планетарный K_p -индекс (в), Dst -индекс (г).

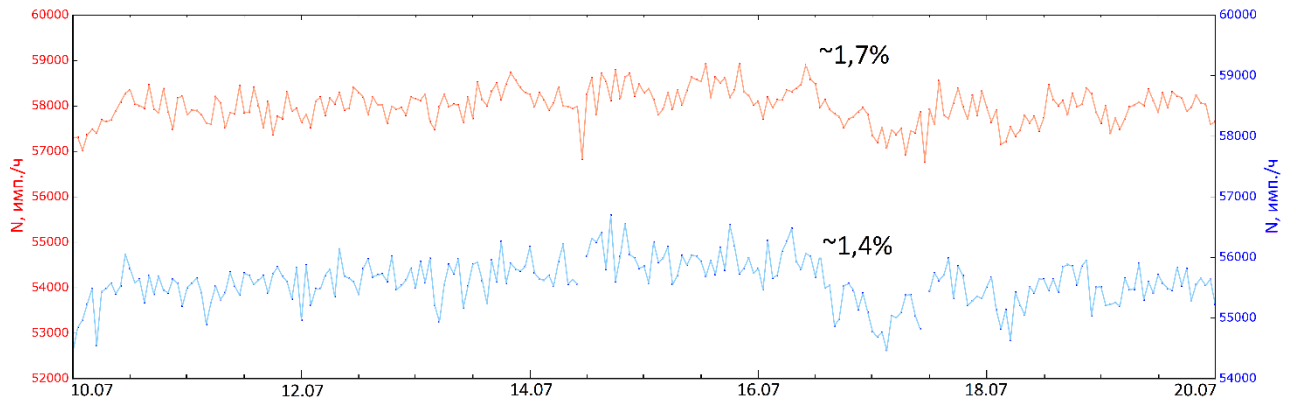


Рис. 5.3 – Вариации потоков КЛ в период 10-20 июля 2017 года. Данные канала TEL (с учётом барометрического эффекта) установки CARPET-ASTANA: модуль 0 – красная линия, модуль 1 – синяя линия.

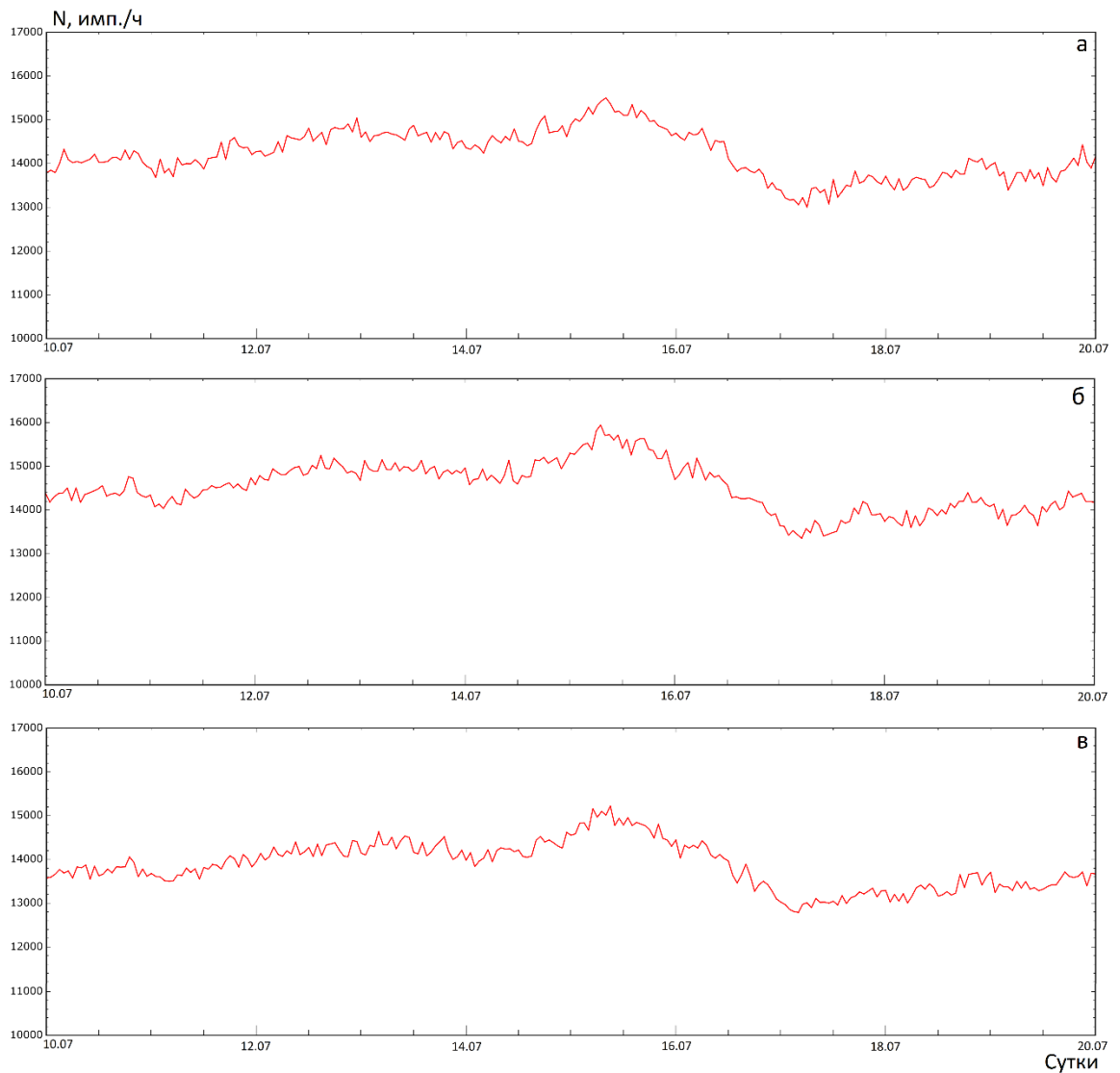


Рис. 5.4 – Вариации потоков КЛ в период 10-20 июля 2017 года. Данные НД CASLEO (с учётом барометрического эффекта): НД 0 (а), НД 1 (б), НД 2 (в).

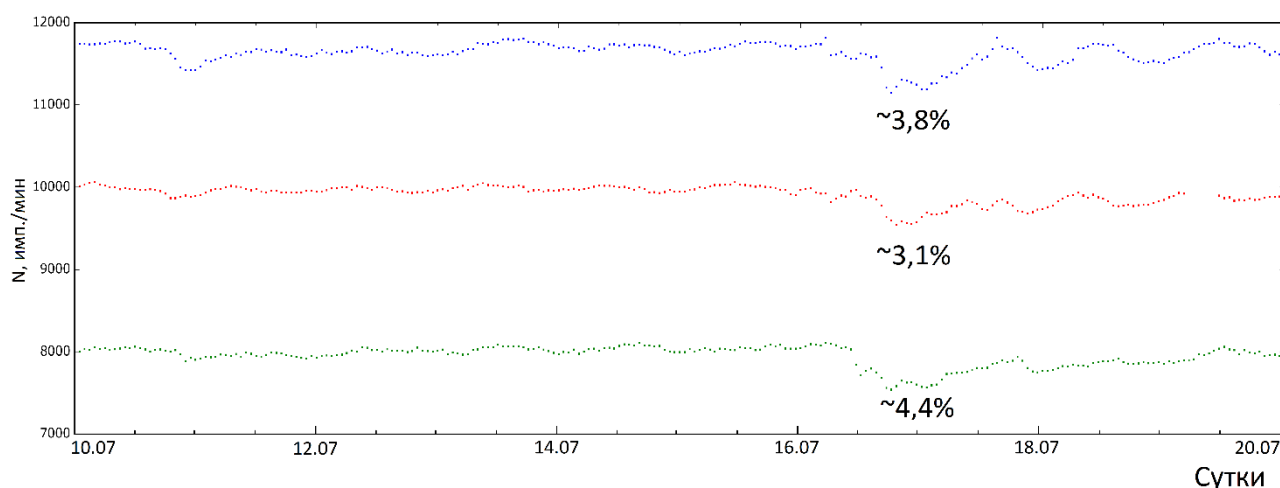


Рис. 5.5 – Вариации потоков КЛ в период 10-20 июля 2017 года. Нейтронных мониторов (панель б): Юнгфрауйох (Jungfraujoch) – синяя линия, Алматы – красная линия, Апатиты – зелёная линия.

В сентябре 2017 г. произошло аналогичное событие, связанное с Форбуш-эффектом, который было вызван 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. В земной магнитосфере наблюдалось геомагнитное возмущение с 7 по 8 сентября. Также значение планетарного Kp -индекса находилось на уровне 8-9, а величина Dst -индекса уменьшилась до -142 нТл [110] (рис. 5.6).

8 сентября по данным 2-х модулей установки CARPET-ASTANA зарегистрировано понижение потоков КЛ. На рис. 5.7 приведены графики вариаций темпа счёта в канале TEL (с учётом барометрического эффекта) для модулей 0 (красная кривая) и 1 (синяя кривая) установки в период 4-14 сентября 2017 года. Амплитуда понижения составила, примерно, 2,0% и 2,3% от среднего темпа счёта.

Данные результаты также согласуются с измерениями на наземных нейтронных мониторах. На рис. 5.8 приводятся графики темпа счёта за аналогичный период времени для нейтронных мониторов: Юнгфрауйох (Jungfraujoch IGY; синяя кривая), Алматы (красная кривая) и Апатиты (зелёная кривая). Амплитуда понижения темпа счёта нейтронных мониторов для данного события: 3,8%, 3,7% и 4,8% соответственно.

По результатам измерений, амплитуды вариаций, полученные на модулях установки CARPET-ASTANA, примерно в 2 раза меньше амплитуд на нейтронных мониторах, однако этого достаточно для надёжной регистрации Форбуш-эффектов подобной величины.

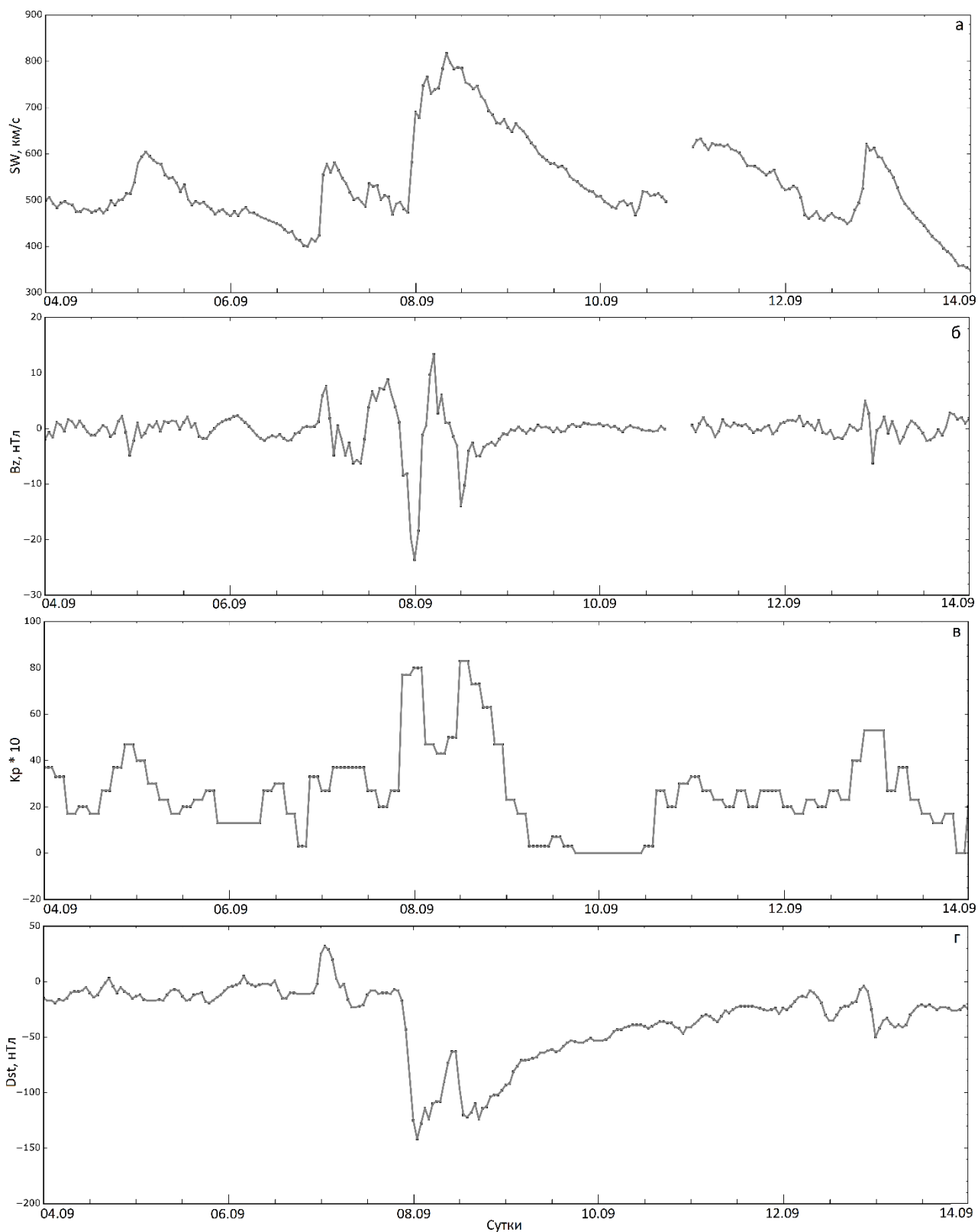


Рис. 5.6 – Данные межпланетной и магнитосферной активности в период 4-14 сентября 2017 года по базе данных OMNI: скорость солнечного ветра (а), B_z компонента межпланетного магнитного поля (б), планетарный K_p -индекс (в), Dst -индекс (г).

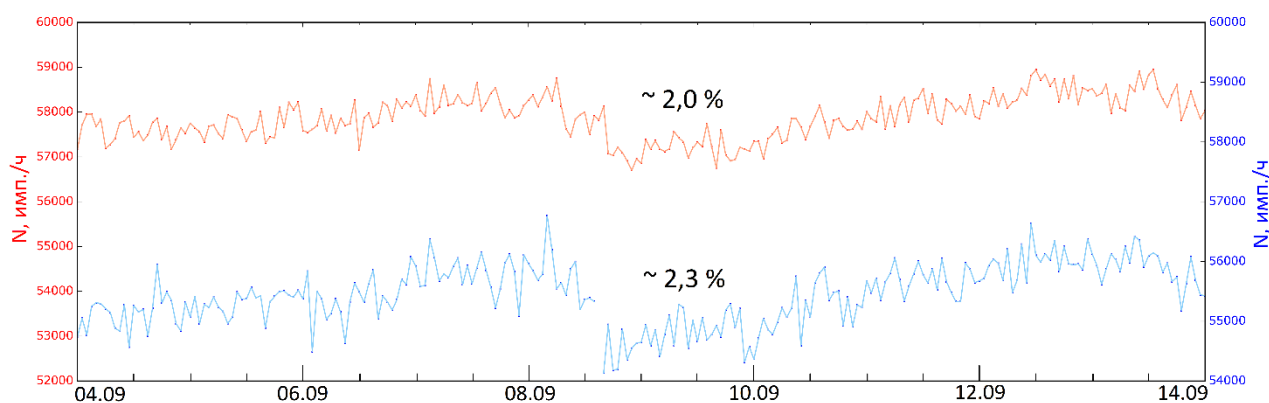


Рис. 5.7 – Вариации потоков КЛ в период 4-14 сентября 2017 года. Данные канала TEL (с учётом барометрического эффекта) установки CARPET-ASTANA: CARPET-ASTANA 0 – красная линия, CARPET-ASTANA 1 – синяя линия.

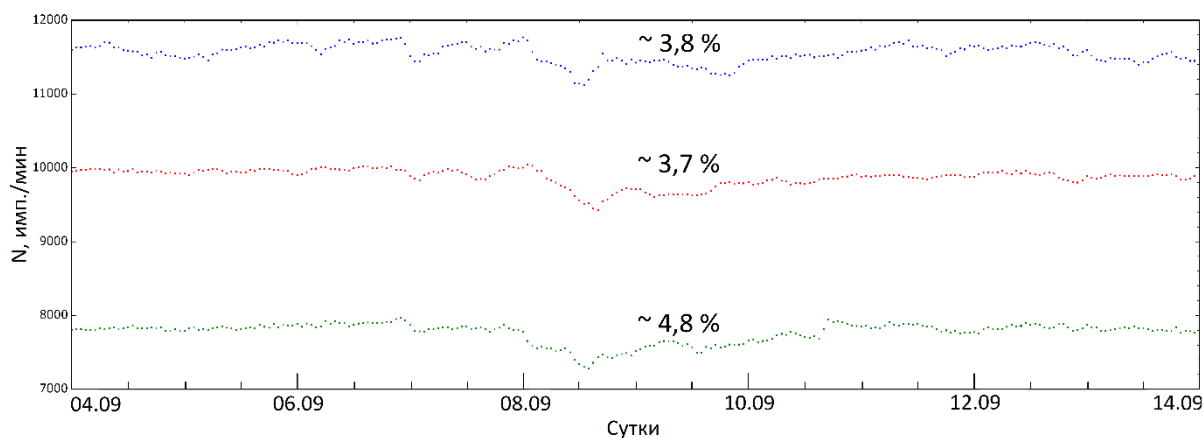


Рис. 5.8 – Вариации потоков КЛ в период 4-14 сентября 2017 года. Нейтронных мониторов: Юнгфрауйох (Jungfraujoch) – синяя линия, Алматы – красная линия, Апатиты – зелёная линия.

5.1.2 События в мае 2019 г.

В апреле-мае 2019 г произошло существенное понижение потоков КЛ вследствие Форбуш-эффекта. На рис. 5.9 а приведён график темпа счёта московского нейтронного монитора (данных с учётом барометрического эффекта) за 2019 г. Форбуш-эффект выделен на графике голубым цветом. Понижение также наблюдается на установках CARPET-МОСКВА (рис. 5.9 б-5.9 в) и НД 0 МОСКВА (рис. 5.9 г).

В данный период (примерно, с 28 апреля по 18 мая 2019) года наблюдалась серия незначительных Форбуш-эффектов. Регулярные события на Солнце препятствовали восстановлению потоков КЛ. После 13-го мая активность на Солнце снизилась и потоки КЛ начали постепенно восстанавливаться с 18 мая (рис. 5.10) [114].

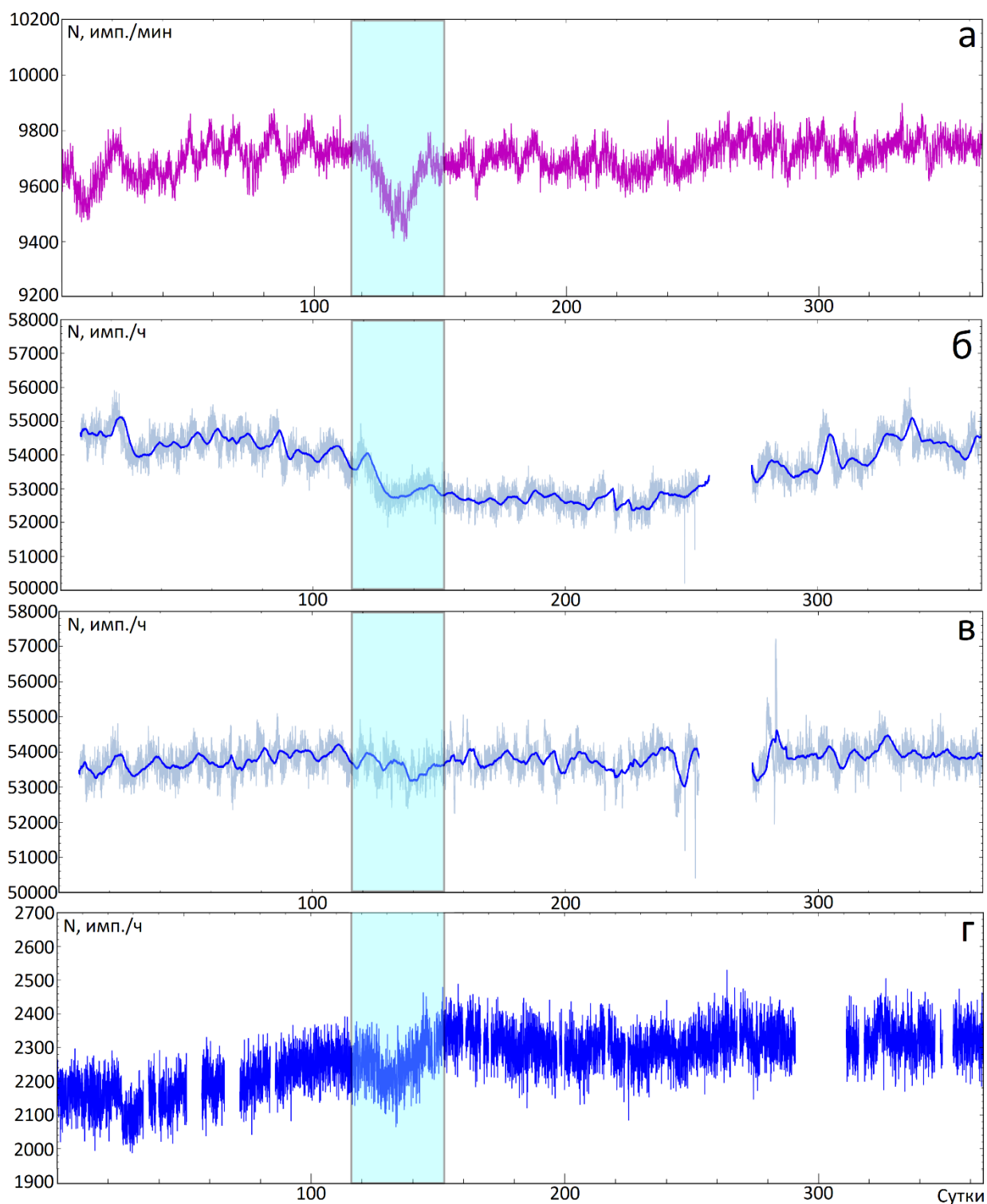


Рис. 5.9 – Вариации потоков КЛ за 2019 г: (а) московский нейтронный монитор, (б) CARPET-МОСКВА (данные с учётом барометрического эффекта), (в) CARPET-МОСКВА (данные с учётом барометрического и температурного эффектов), (г) НД 0 МОСКВА (данные с учётом барометрического эффекта).

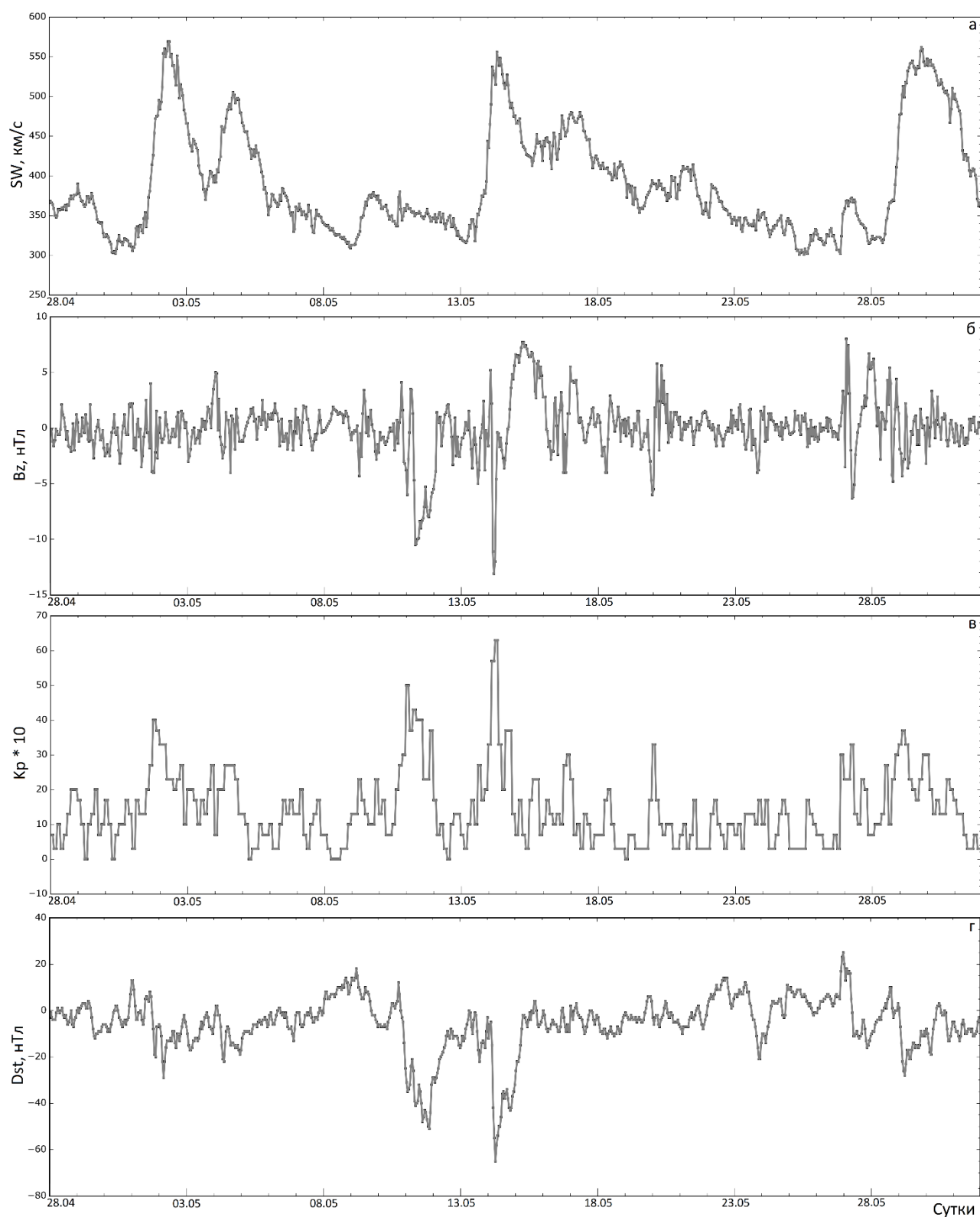


Рис. 5.10– Данные межпланетной и магнитосферной активности в период 28 апреля - 31 мая 2019 года по базе данных OMNI: скорость солнечного ветра (а), B_z компонента межпланетного магнитного поля (б), планетарный K_p -индекс (в), Dst -индекс (г).

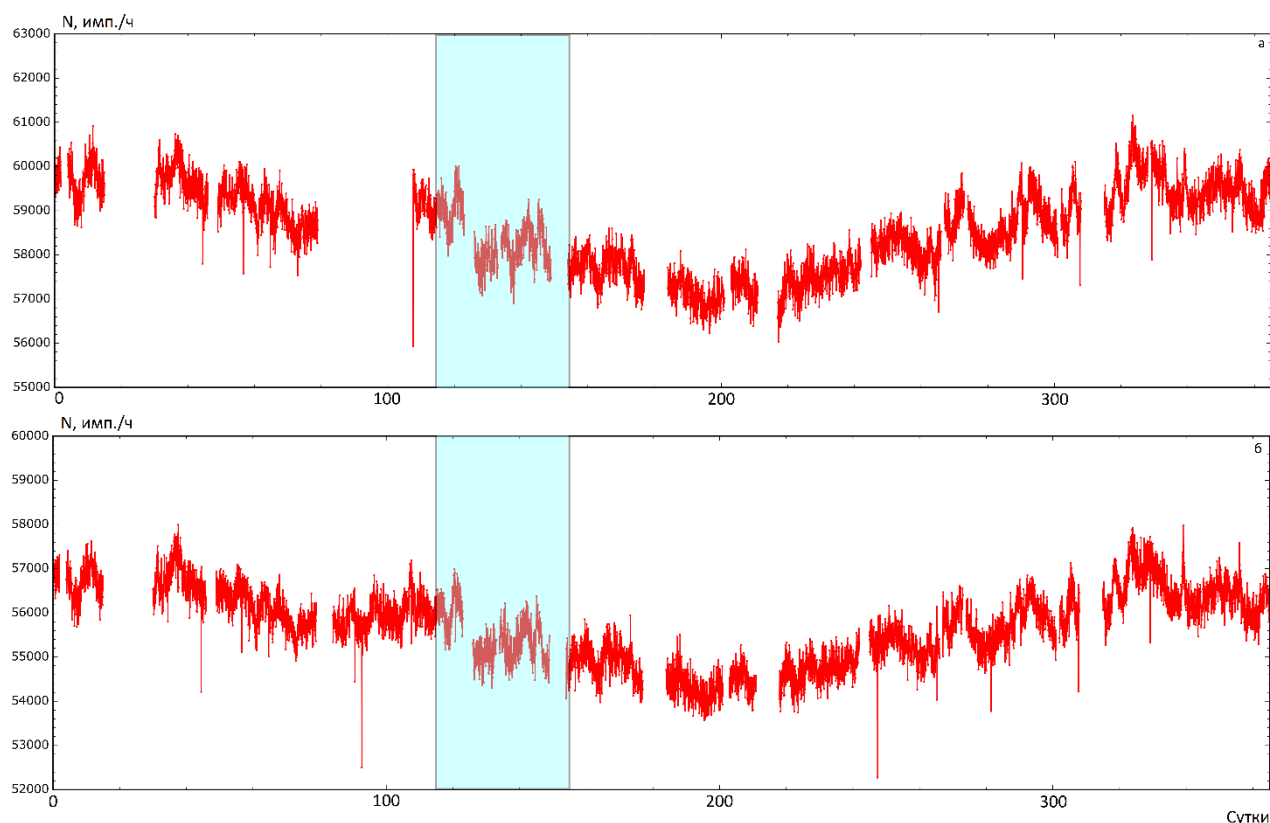


Рис. 5.11 – Вариации потоков КЛ за 2019 г. по данным установки CARPET-ASTANA (данные с учётом барометрического эффекта): модуль 0 (а), модуль 1 (б).

На рис. 5.11 приведены графики темпа счёта установок CARPET-ASTANA 0 и 1 с учётом барометрического эффекта. В указанном временном интервале (выделено голубым цветом) также наблюдается понижение темпа счёта, однако данные вариации происходят на фоне существенного температурного эффекта. Также присутствует сильная прерывистость данных.

Установки НД CASLEO и НД ASTANA в заданный временной интервал (май 2019 г.) были отключены.

5.2 Вариации КЛ и приземного электрического поля в январе 2016 г. в CASLEO

В последние годы возрос интерес к процессам в атмосфере Земли, происходящим во время грозовой активности, которые проявляются в виде световых и γ -вспышек (т.н. TGF, TLE и др.), спрайтов, голубых джетов, внутриоблачных разрядов, разрядов земля-облако, наблюдаемых в приземной атмосфере и тропосфере. Также существуют работы о вариациях потоков заряженных частиц, γ -квантов и нейтронов, происходящие при значительных вариациями приземного электрического поля [115-120].

В данном разделе представлены экспериментальные данные, полученные в астрономическом космолетном комплексе CASLEO в январе 2016 года во время грозовой активности. Для измерений вариаций электрического поля используется электростатический флюксметр EFM-100 (рис. 3.1; Voltek, США) [121], установленный в непосредственной близости от детекторов КЛ.

Таблица 5.1 – События в январе 2016 г в CASLEO, характеризующиеся возрастаниями потоков вторичных КЛ на установках CARPET-CASLEO и «Гамма-спектрометр» во время грозовой активности.

Дата	Время, UTC	CARPET, %,	«Гамма-спектрометр», %	НД, %	ΔE , кВ/м
5.01.2016	~14-19	11	22	-	-10 ÷ +13
	~21-22	10	8	-	-12 ÷ +2
7.01.2016	~8-10	6	5	-	-8 ÷ +4
	~18-20	5	7	-	-4 ÷ +3
8.01.2016	~7-8	-	2	-	0 ÷ +0.04
	~10-12	-	3	-	0 ÷ +0.04
20.01.2016	~18-20	2	5	-	-1 ÷ +4.5
	~20-22	6	9	-	-7 ÷ +8.5
	~23-24	2	2	-	-2 ÷ +2
23.01.2016	~1-3	2	3	-	-11 ÷ +4
	~4-6	3	1	-	-7 ÷ +9
	~6,5-14	4-6	9	-	-7 ÷ +2
	~22-24	4	9	-	-7 ÷ +5
24.01.2016	~1-2	4	7	-	-9 ÷ +15
	~3-4	2	1	-	-5 ÷ +3
31.01.2016 - 1.02.2016	~21-04	21	28	-17	-15 ÷ +17 -12 ÷ +2

На рис. 5.12 приведены вариации потоков КЛ (имп./мин) на установках CARPET-CASLEO, «Гамма-спектрометр» (модуль 0) и НД 0 CASLEO относительно вариаций электрического поля (кВ/м) по данным 20 января 2016 г. На модулях CARPET-CASLEO и «Гамма-спектрометр» выделяются 3 интервала возрастания темпа счёта, длительностью более 1 часа. Каждое возрастание начиналось при кратковременных вариациях электрического поля (рис. 5.12 г). Далее напряженность электрического поля была близка к фоновому уровню.

В таблице 5.1 приведены события января 2016 г., во время которых были зарегистрированы возрастания темпа счёта заряженной компоненты КЛ и γ -излучения. В первой колонке указана дата события. Во второй колонке – интервал времени (UTC). В третьей колонке приводятся амплитуды возрастаний (%) темпа счёта в канале UP модуля CARPET-CASLEO. В четвёртой колонке приводятся амплитуды возрастаний (%) темпа счёта

модуля 0 «Гамма-спектрометра» ($E > 100$ кэВ). В пятой колонке приводятся амплитуды возрастаний (%) темпа счёта модуля 0 НД. В шестой колонке приводятся вариации (ΔE , кВ/м) электрического поля относительно невозмущенного уровня.

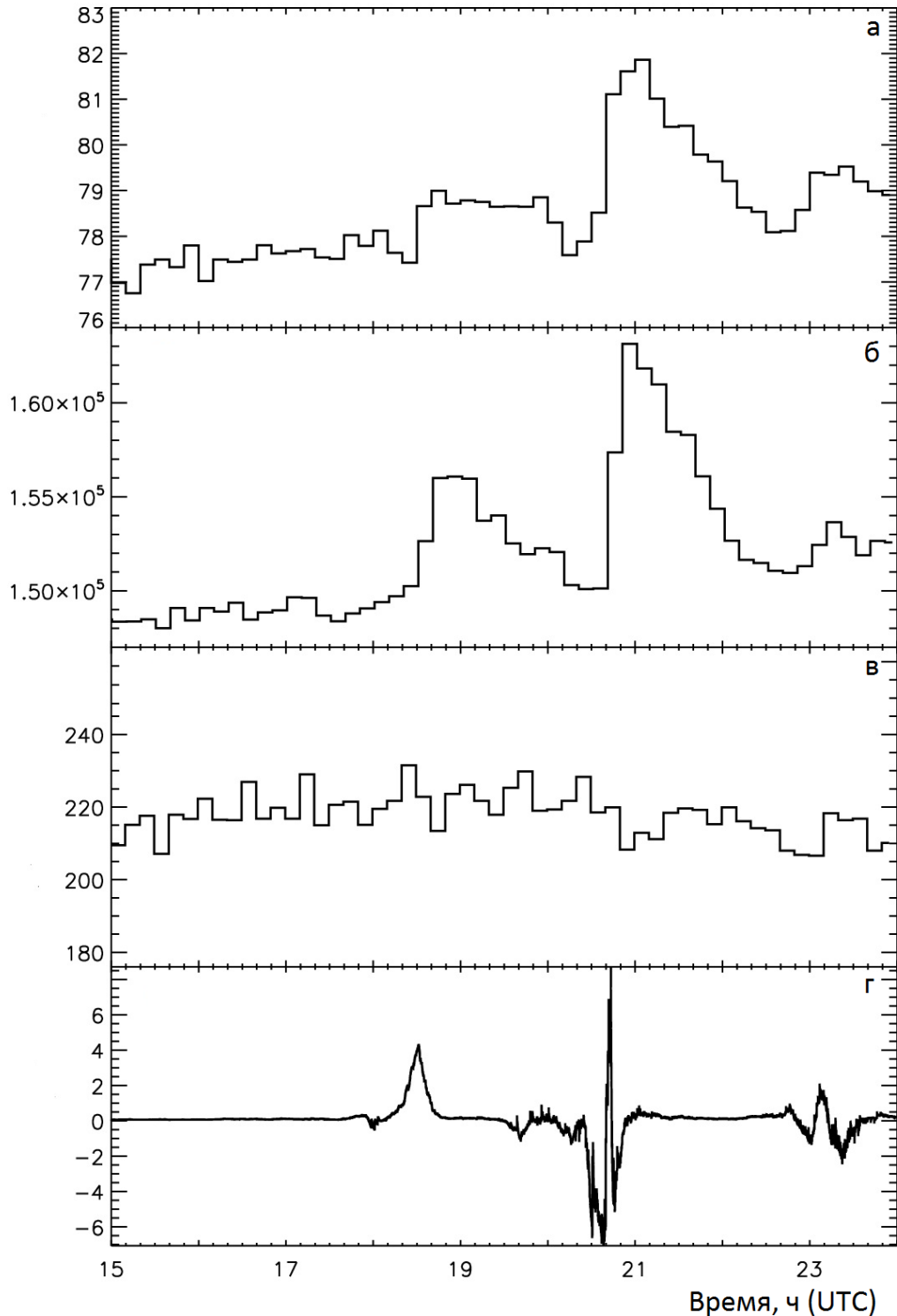


Рис. 5.12 – Данные измерений 20 января 2016 г.: (а) темп счёта в канале UP CARPET-CASLEO, (б) темп счёта установки «Гамма-спектрометр» ($E > 100$ кэВ), (в) темп счёта модуля 0 НД CASLEO, (г) напряженность электрического поля E , кВ/м.

Основные характеристики зарегистрированных событий:

1. Длительность возрастаний темпа счёта заряженной компоненты КЛ и γ -излучения на установках CARPET-CASLEO и «Гамма-спектрометр» составляла до нескольких часов. Возрастаний на НД зафиксировано не было.
2. Амплитуды возрастаний темпа счёта установок CARPET-CASLEO и «Гамма-спектрометр» не превышали 30% относительно фонового уровня. При этом, наблюдались кратковременные вариации напряженности электрического поля в диапазоне от -15 кВ/м до +17 кВ/м.

Выводы к главе 5

Установки CARPET и НД, являющиеся детекторами низкоэнергичной компоненты вторичных КЛ, при этом также чувствительны к вариациям первичных КЛ, в частности, к Форбуш-эффектам порядка нескольких процентов.

Для установок CARPET-МОСКВА и НД 0 МОСКВА был проведён сравнительный анализ данных на предмет совпадений с данными Каталога Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений за 2019 г. Для надёжной регистрации на установках CARPET, величина «MagnM» должна быть $\geq 0,7$, а для установок НД должна быть $\geq 1,2$.

На примере событий 2017 и 2019 гг. показана важность учёта метеорологических эффектов. Особенно температурного эффекта на установках CARPET, для которых он является наиболее значимым. Также было показано, что амплитуда понижений на установках CARPET и НД является сопоставимой по величине с вариациями, полученными на нейтронных мониторах. В целом, данные установки, с учётом вышесказанного, чувствительны к ФЭ.

На примере анализа событий, зарегистрированных в январе 2016 г. в CASLEO показана возможная связь событий, характеризующихся резким возрастанием темпов счёта КЛ и грозовой активностью. На установках «CARPET» и «Гамма-спектрометр» наблюдаются возрастания до 30%. В то же время, на установках НД отсутствуют вариации нейтронной компоненты.

Заключение

Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Разработаны 3 типа новых установок для регистрации вторичных КЛ: «CARPET», «Нейтронный детектор» (НД) и «Гамма-спектрометр». При разработке данных установок за основу была взята концепция модульности: несколько идентичных независимых установленных рядом модулей позволяют проводить взаимные калибровки, повышается надёжность, задача масштабируемости решается путём добавления нового модуля.
 - Установка CARPET предназначена для детектирования заряженной компоненты вторичных космических лучей. В качестве детектирующих элементов в которой применены газоразрядные счётчики СТС-6. Установка CARPET регистрирует частицы следующих энергий: в каналах UP и LOW: электроны и позитроны с энергией $E > 200$ кэВ, протоны с $E > 5$ МэВ, мюоны с $E > 1,5$ МэВ, фотоны (эффективность $< 1\%$) с $E > 20$ кэВ. В канале совпадений TEL регистрируются более энергичные частицы: электроны с энергиями $E > 5$ МэВ, протоны с $E > 30$ МэВ и мюоны с $E > 15,5$ МэВ. Помимо информации о потоках космических лучей, данная установка производит измерения метеорологической информации (температуры и давления) и служебной информации (питающие напряжения). Совокупность этих данных называется «телеметрия». Данные и телеметрия от одного модуля CARPET передаются на ПК по двум независимым интерфейсам RS-232. На сегодняшний день существуют 5 модулей CARPET данного типа: два модуля установлены в КАССТ (Эр-Рияд, Саудовская Аравия), два модуля установлены в ЕНУ им. Гумилёва (Нур-Султан, Республика Казахстан), один модуль установлен на ДНС ФИАН (Долгопрудный, Московская область).
 - Установка «Нейтронный детектор», предназначена для детектирования нейтронной компоненты вторичных космических лучей. В качестве детектирующего элемента использованы гелиевые счётчики СНМ-18, установленные между двумя слоями полиэтиленового замедлителя. Данная установка также производит измерения метеорологической информации и служебной информации. Аналогично CARPET, данные и телеметрия передаются на ПК по двум независимым интерфейсам RS-232. На сегодняшний день существуют 6 модулей «Нейтронный детектор»: три модуля установлены в CASLEO (Сан-Хуан, Аргентина), два модуля

установлены на ДНС ФИАН (Московская область, Долгопрудный), один модуль установлен в ЕНУ им. Гумилёва (Нур-Султан, Республика Казахстан).

- Установка «Гамма-спектрометр», предназначена для детектирования γ -излучения с энергиями $E \leq 5$ МэВ. В качестве детектора использован скинтиллятор NaI(Tl) диаметром 76,2 мм и толщиной 76,2 мм и фотоэлектронный умножитель Hamamatsu R1307 диаметром 76 мм. Сигналы от детектирующих модулей подаются на АЦП USB3000. Передача данных АЦП на ПК осуществляется по интерфейсу USB. Разрешающая способность $\Delta E/E$ «Гамма-спектрометра» по ширине пика изотопа ^{40}K на его полувысоте $\cong 13,7\%$. На сегодняшний день существуют 4 модуля установки «Гамма-спектрометр», установленные в CASLEO (Сан-Хуан, Аргентина).
- 2. Для установок «CARPET», «Нейтронный детектор» и «Гамма-спектрометр» было разработано программное обеспечение, основными функциями которого являются: запись, визуализация и первичная обработка данных на ПК.
- 3. Разработан пакет программ для обработки экспериментальных данных установок «CARPET», «Нейтронный детектор» и «Гамма-спектрометр».
- 4. Для установок «CARPET» и «Нейтронный детектор» определён барометрический коэффициент.
- 5. Для модуля CARPET-МОСКВА, с помощью данных высотного зондирования ЦАО (Долгопрудный, Московская область) был определён температурный коэффициент по методу эффективного уровня генерации и интегральным методом.
- 6. Проведена оценка геометрического фактора установки CARPET-МОСКВА.
- 7. Разработана методика калибровки «Гамма-спектрометра» по спектральным линиям природных источников γ -излучения.
- 8. На примере установок CARPET-МОСКВА и НД 0 МОСКВА по данным за 2019-2020 гг. показано наличие корреляции с данными московского нейтронного монитора. $R \approx 0,4$ для НД, $R \approx 0,4-0,5$ для CARPET.
- 9. При сравнении данных за 2019 г. установок CARPET и НД с Каталогом Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений выявлено, что установки CARPET надёжно детектируют Форбуш-эффекты (ФЭ) для событий, параметр «MagnM» которых $\geq 0,7$. Установки НД надёжно детектируют ФЭ с параметром «MagnM» $\geq 1,2$.

В заключение выражаю глубокую признательность и благодарность своему научному руководителю В. С. Махмутову за поддержку, помощь, обсуждение результатов, научное руководство и за предоставленную возможность заниматься интересными исследованиями.

Хочу поблагодарить Г. А. Базилевскую, Ю. И. Стожкова, А. К. Свиржевскую за ценные советы, консультации и значительную помощь в подготовке текста.

Выражаю глубокую благодарность О. С. Максумову, А. Н. Квашнину, С. В. Викторову, С. В. Мизина, А. А. Квашнину за участие в обсуждениях, разработке и сборке аппаратуры.

Благодарю Г. И. Плугарь, О. А. Шишкову, П. Ю. Шишкова за неоценимый вклад в организацию работы.

Благодарю сотрудников мастерской ДНС ФИАН за изготовление корпусов и элементов конструкции приборов.

Хочу также поблагодарить коллективы CASLEO, KACST и ЕНУ за помощь при установке аппаратуры, организацию рабочего процесса, а, также, за поддержание инфраструктуры в исправном состоянии с момента запуска и по настоящее время.

Выражаю благодарность всем бывшим и настоящим членам коллектива ДНС ФИАН, за тёплую и доброжелательную атмосферу, поддержку и всяческую помощь при выполнении работы.

Литература

1. *Дорман Л.И., Фейнберг Е.Л.* Вариации космических лучей. УФН, 1956, т. 59, 189-228.
2. *Мурзин В.С.* Астрофизика космических лучей: Уч. пособие для вузов. М.: Логос, 2007.
3. *Chilingarian A., Karapetyan T., Melkumyan L.* Statistical analysis of the Thunderstorm Ground Enhancements (TGEs) detected on Mt. Aragats. *Advances in Space Research*, 2013, Vol. 52, № 6, pp. 1178-1192, DOI: 10.1016/j.asr.2013.06.004.
4. *Chilingarian A., Mailyan B.* Recovering of the TGE electron and gamma ray energy spectra. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2013, Vol. 409, 012214, DOI: 10.1088/1742-6596/409/1/012214.
5. *Chilingarian A., Khanikyants Y., Rakov V.A., Soghomonyan S.* Termination of thunderstorm-related bursts of energetic radiation and particles by inverted intracloud and hybrid lightning discharges. *Atmospheric Research*, 2020, Vol. 233, 104713, DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.104713.
6. *Torii, T., Sugita, T., Kamogawa, M., Watanabe, Y., Kusunoki, K.* Migrating source of energetic radiation generated by thunderstorm activity, *Geophys. Res. Lett.*, 2011, 38, L24801, DOI:10.1029/2011GL049731.
7. *Chubenko, A.P., Antonova V.P., Kryukov S.Y., Piscal V.V., Ptitsyn M.O., Shepetov A. L., Vildanova L. I., Zybin K. P., Gurevich A.V.* Intensive X-ray emission bursts during thunderstorms, *Phys. Lett. A*, 2000, 275, pp. 90–100, DOI: 10.1016/S0375-9601(00)00502-8.
8. *Gurevich A.V., Chubenko A.P., Karashtin A.N., Mitko G.G., Naumov A.S., Ptitsyn M.O., Ryabov V.A., Shepetov A.L., Shlyugaev Yu.V., Vildanova L.I., Zybin K.P.*, Gamma-ray emission from thunderstorm discharges, *Phys. Lett. A*, 2011, 375, 1619–1625, DOI: 10.1016/j.physleta.2011.03.005.
9. *Shepetov A., Antonova V., Kalikulov O., Kryakunova O., Karashtin A., Lutsenko V., Mamina S., Mukashev K., Piscal V., Ptitsyn M., Ryabov V., Sadykov T., Saduev N., Salikhov N., Shlyugaev Yu., Vildanova L., Zhukov V., Gurevich A.* The prolonged gamma ray enhancement and the short radiation burst events observed in thunderstorms at Tien Shan, *Atmospheric Research*, 2020, Vol. 248, 105266, DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105266.
10. *Wada Y., Enoto T., Nakamura Y., Morimoto T., Sato M., Ushio T., Nakazawa K., Yuasa T., Yonetoku D., Sawano T., Kamogawa M., Sakai H., Furuta Y., Makishima K.*

- Tsuchiya H.* High peak-current lightning discharges associated with downward terrestrial gamma-ray flashes, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, Vol. 125, № 4, DOI: 10.1029/2019JD031730.
11. *Kelley N., Smith D., Dwyer J., Splitt M., Lazarus, S., Martinez-McKinney F., Hazelton B., Grefenstette B. Lowell A., Rassoul H. K.* Relativistic electron avalanches as a thunderstorm discharge competing with lightning, *Nat. Commun.*, 2015, Vol. 6, 7845, DOI: /10.1038/ncomms8845.
 12. *Reames D.V.* Solar Energetic Particles. A Modern Primer on Understanding Sources, Acceleration and Propagation. Springer, 2021, 225 p. DOI: 10.1007/978-3-030-66402-2.
 13. *Ginzburg V.L., Syrovatsky S.I.* Origin of Cosmic Rays. Supplement of the Progress of the Theoretical Physycs, 1961, № 20.
 14. *Abbasi R.U. et al. (High Resolution Fly's Eye Collaboration)* First Observation of the Greisen-Zatsepin-Kuzmin Suppression, *Phys. Rev. Lett.*, 2008, Vol. 100, 101101, DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.101101.
 15. *Болоздыня А.И., Ободовский И.М.* Детекторы ионизирующих частиц и излучений. Принципы и применение: Учебное пособие / А.И. Болоздыня, И.М. Ободовский – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012. –208 с.
 16. *Adriani O. et. al. (PAMELA Collaboration)* Ten Years of PAMELA in Space, *Riv. Nuovo Cim*, 2017, Vol. 40, pp. 473–522, DOI: 10.1393/ncr/i2017-10140-x.
 17. *Гальпер А.М.* Космические лучи. -2-е изд., исп. и доп. М.: МИФИ, 2002. -172 с.
 18. *Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A., Kvashnin A.N., Makhmutov V.S., Svirzhevskaya A.K.* Long-term (50 years) measurements of cosmic ray fluxes in the atmosphere, *Advances in Space Research*, 2009, Vol. 44, № 10, DOI: 10.1016/j.asr.2008.10.038.
 19. *Charakhchyan A.N., Svirzhevskaya A.K., Stozhkov Yu.I., Charakhchyan T.N., Kuzmin I.A.* Latitude–longitude stratospheric measurements of cosmic ray intensity, In: *Proceedings of the 12th International Cosmic Ray Conference, Hobart, Australia, 1971*, 5, pp. 2043–2052.
 20. *Bazilevskaya G.A., Usoskin I.G., Fluckiger E.O., Harrison R.G., Desorgher, L., Butikofer R., Krainev M.B., Makhmutov V.S., Stozhkov Y.I., Svirzhevskaya A.K., Svirzhevsky N.S., Kovaltsov G.A.* Cosmic ray induced ion production in the atmosphere, *Space Sci. Rev.*, 2008, Vol. 137 № 1, pp. 149–173, DOI: 10.1007/s11214-008-9339-y.

21. *Stozhkov Yu.I., Pokrevsky P.E., Okhlopkov V.P.* Long-term negative trend in cosmic ray flux. *J. Geophys. Res.*, 2000, Vol. 105, № A1, pp. 9–17, DOI: 10.1029/1999JA900385.
22. *Stozhkov Y.I., Svirzhevsky N.S., Makhmutov V.S., Svirzhevskaya, A.K.* Long-term cosmic ray observations in the atmosphere. In: *Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference*, 2001, Hamburg, SH, pp. 3883–3886.
23. *Stozhkov, Y.I., Okhlopkov, V.P., Svirzhevsky, N.S.* Cosmic ray fluxes in present and past times. *Sol. Phys.*, 2004, Vol. 224, pp. 323–333, DOI: 10.1007/s11207-005-5193-1.
24. *Stozhkov Y., Makhmutov V., Svirzhevsky N.* Analysis of cosmic ray data from regular balloon experiments and Voyager-1, 2 spacecraft, In: *Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference*, Vol. 1 (SH), Merida, Mexico, 2008, pp. 819–822.
25. *Makhmutov V.S., Desorgher L., Bazilevskaya G.A., Fluckiger E., Raulin, J.-P.*, Evaluation of solar proton spectra using balloon cosmic ray observations and Monte Carlo simulation results. *Adv. Space Res.*, 2007, Vol. 39 № 9, 1460–1463, DOI: 10.1016/j.asr.2007.01.042.
26. *Blake J.B., Selesnick R.S., Baker D.N., Kanekal S.* Studies of relativistic electron injection events in 1997 and 1998, *J. Geophys. Res.*, 2001, Vol. 106 (A9), 19157–19168, DOI: 10.1029/2000JA003039.
27. *Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Krainev M.B.* Characteristics of the energetic electron precipitation into the Earth's polar atmosphere and geomagnetic conditions, *Adv. Space Res.*, 2003, Vol. 31 № 4, pp. 1087–1092, DOI: 10.1016/S0273-1177(02)00814-1.
28. *Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Desorgher L., Fluckiger, E.* Precipitating electron events in October 2003 as observed in the polar atmosphere, *Adv. Space Res.*, 2006, Vol. 38 № 8, pp. 1642–1646, DOI: 10.1016/j.asr.2006.01.016.
29. *Базилевская Г.А., Калинин М.С., Крайнев М.Б., Махмутов В.С., Свиржевская А.К., Свиржевский Н.С., Стожков Ю.И., Филиппов М.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б.* Высыпания магнитосферных электронов в атмосферу Земли и электроны внешнего радиационного пояса, *Известия РАН. сер. физ.*, 2017, т. 81, № 2, с. 248–251, DOI: 10.7868/S0367676517020077.
30. *Ermakov V.I.* Lightning initiation by galactic cosmic rays. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Atmospheric Electricity*, 1992, St. Petersburg, Russia, 3, pp. 485–488.

31. *Ermakov V.I., Stozhkov Y.I.* New mechanism of thundercloud electricity and lightning production. In: Proceedings of the 11th International Conference on Atmospheric Electricity, 1999, Guntersville, USA, NASA/CP-1999-209261, pp. 242–245.
32. *Ermakov, V.I., Stozhkov, Yu.I.* Cosmic ray fluxes in the atmospheric processes. In: Proceedings of the International Solar Cycles Studies Symposium on «Solar Variability as an Input to the Earth's Environment», 2003, Tatranska Lomnica, Slovakia (ESA SP-535), pp. 359–362.
33. *Ermakov V.I., Bazilevskaya G.A., Pokrevsky P.E., Stozhkov Yu.I.* Ion balance equation in the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 1997, Vol. 102 (D19), 23413–23419, DOI: 10.1029/97JD01388.
34. *Stozhkov Y.I.* The role of cosmic rays in the atmospheric processes, *J. Phys.*, 2003, G 29 (5), 913–923.
35. *Svirzhevskaya A.K., Svirzhevsky N.S., Stozhkov Yu.I.* Step-like variations of cosmic rays and their relation to an inclination of the heliospheric current sheet. In: Proceedings of the 27th International Cosmic Ray Conference, 2001, Hamburg, SH, pp. 3843–3846.
36. *Григорьев В. Г., Гололобов П. Ю., Кривошапкин П. А., Крымский Г. Ф., Янке В. Г.* Распределение космических лучей в гелиосфере по данным сети станций мюонных телескопов. *Изв. РАН сер. физ.*, 2019, т. 83 № 5, с. 606-609, DOI: 10.1134/S0367676519050144.
37. Мюонные телескопы ИКФИА: [сайт]. URL: <https://ikfia.ysn.ru/myuonnye-teleskopy/> (дата обращения: 08.04.2021).
38. *Fuji Z., Sakakibara S., Fujimoto K., Ueno H.* Multi directional cosmic ray intensities, Nagoya, 1986-1988. Report of cosmic-ray research laboratory. Nagoya University, Nagoya. Japan. 1990.
39. *Kuwabara T., Bieber J.W., Clem J., Evenson P., Pyle R., Munakata K., Yasue S., Kato C., Akahane S., Koyama M., Fujii Z., Duldig M.L., Humble J.E., Silva M.R., Trivedi N.B., Gonzalez W.D., Schuch N.J.* Real-time cosmic ray monitoring system for space weather *Space Weather*, 2006, Vol. 4, S08001, DOI:10.1029/2005SW000204.
40. *Munakata K., Kato C., R.R.S. Mendonca, Tokumaru M.* Long-term variation of galactic cosmic ray intensity observed with the Nagoya multidirectional muon detector, *PoS ICRC2019 1129*, 2020, DOI: 10.22323/1.358.1129.
41. *Karapetyan G., Ganeva M., Hippler R.* Directional sensitivity of MuSTAnG muon telescope *J. Space Weather Space Clim.*, 2013, Vol. 3, № A16, DOI: 10.1051/swsc/2013040

42. *Ganeva M., Peglow S., Hippler R., Berkova M., Yanke V.* Seasonal variations of the muon flux seen by muon telescope MuSTAnG, *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, Vol. 409, № 1, 012243, DOI: 10.1088/1742-6596/409/1/012242.
43. Мюонный годоскоп УРАГАН: [сайт]. URL: <http://ununevod.mephi.ru/uragan.html> (дата обращения: 08.04.2021).
44. *Barbashina N.S., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G., Mannocchi G., Petrukhin A.A., Saavedra O., Timashkov D.A., Trincherо G., Chernov D.V., Shutenko V.V., Yashin I.I.* The URAGAN wide-aperture large-area muon hodoscope. *Instruments and Experimental Techniques*, 2008, Vol. 51, №2, pp.180-186, DOI:10.1134/S002044120802005X.
45. *Astapov I.I., Barbashina N.S., Dmitrieva A.N., Kokoulin R.P., Petrukhin A.A., Shutenko V.V., Yakovleva E.I., Yashin I.I.* Local anisotropy of muon flux - the basis of the method of muon diagnostics of extra-terrestrial space. *Advances in Space Research*, 2015, Vol. 56, № 12, pp. 2713–2718. DOI: 10.1016/j.asr.2015.05.039.
46. *Yashin I.I., Astapov I.I., Barbashina N.S., Borog V.V., Dmitrieva A.N., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G., Petrukhin A.A., Shutenko V.V., Yakovleva E.I.* Real-time data of muon hodoscope URAGAN. *Advances in Space Research*, 2015, Vol. 56, № 12, pp. 2693–2705. DOI: 10.1016/j.asr.2015.06.003.
47. Нейтронный монитор ИКФИА: [сайт]. URL: <https://ikfia.ysn.ru/nejtronnyj-monitor/> (дата обращения: 11.04.2021).
48. Нейтронный монитор RUSCOSMICS: [сайт]. URL: <http://ruscosmics.ru/NM.htm> (дата обращения: 11.04.2021).
49. *Мизин С.В., Махмутов В. С., Максумов О.С., Квашинин А.Н.* Применение многоконвейерного программирования для физического эксперимента. Кр. сообщ. по физике ФИАН, 2011, №2, с. 8-18.
50. *De Mendonca R.R.S., Raulin J.-P., Makhmutov V.S., Stozhkov Yu. I., Kvashnin A.N., Maksumov O.S., Mizin S.V., Fernandez G.* Observation of cosmic ray and electric field variations in the surface atmosphere. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2009, Vol. 73, pp.404–406, DOI: 10.3103/S106287380903037X.
51. *De Mendonca R.R.S., Raulin J.-P., Makhmutov V.S., Correia E., Kaufmann P.* Multiple time scales study of the modulation of the cosmic ray flux. *Cosmic Rays Physics and Astrophysics: Proc. 3rd School on Cosmic Rays and Astrophysics. AIP Conf. Proc.*, 2009, Vol. 1123, pp. 249-250.

52. *De Mendonca R.R.S., Raulin J.-P., Echer E., Makhmutov V.S., Fernandez G.* Comparison of the integral and empirical temperature correction methods using the CARPET detector data. Proc. 32nd ICRC, Beijing, Chine, 2011, Vol. 11, pp. 190-193, DOI: 10.7529/ICRC2011/V11/0715.
53. *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, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2011, Vol. 73, № 11-12, pp. 1410-1416, DOI: 10.1016/j.jastp.2010.09.034.
54. *Makhmutov V., Raulin J.-P., De Mendonca R.R.S., Bazilevskaya G.A., Correia E., Kaufmann P., Marun A., Fernandez G., Echer E.* Analysis of cosmic ray variations observed by the CARPET in association with solar flares in 2011-2012. J. Physics: Conf. Ser., 2013, Vol. 409 №1, 012185.
55. *De Mendonca R.R.S., Raulin J.-P., Echer E., Makhmutov V.S., Fernandez G.* Analysis of atmospheric pressure and temperature effects on cosmic ray measurements. J. Phys.: Conf. Ser., 2013, Vol. 409, 01218.
56. *Махмутов В.С., Базилевская Г.А., Стожков Ю.И., Ролан Ж.-П., Филиппов М.В.* Анализ возрастных космических лучей, зарегистрированных в октябре-ноябре 2013 г. Изв. РАН, сер. физ., 2015, т. 79, № 5, с. 624-626 DOI: 10.7868/S0367676515050312.
57. *Makhmutov V., Bazilevskaya G., Stozhkov Y., Philippov M., Raulin J.-P., Morzabaev A., Giniyatova S.* Unusual cosmic ray increases observed during several solar flares in 2011-2013. Proc. Sci., 2015, PoS(ICRC2015)065.
58. *Kirkby J. et al. (CLOUD Collaboration)* Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation. Nature, 2011, Vol. 476, pp. 429-433, DOI: 10.1038/nature10343.
59. *Riccobono F. et al. (CLOUD Collaboration)* Oxidation Products of Biogenic Emissions Contribute to Nucleation of Atmospheric Particles, Science, 2014, Vol. 344, № 6185, pp. 717-721, DOI: 10.1126/science.1243527.
60. *Almeida, J. et al. (CLOUD Collaboration)* Molecular understanding of sulphuric acid-amine particle nucleation in the atmosphere, Nature, 2013, Vol. 502, pp. 359-363, DOI: 10.1038/nature12663.
61. *Dunne M.E. et al. (CLOUD Collaboration)* Global atmospheric particle formation from CERN CLOUD measurements, Science, 2016, Vol. 354, № 6316, pp. 1119-1124, DOI: 10.1126/science.aaf2649.

62. 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. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2020, Vol. 200, 105194, DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105194.
63. Maghrabi A., Makhmutov V., Aldosari A., Almutairi M., Altilasi M., Philippov M., Kalinin E., Alshehri A., Alfadhel R., Almshari B., Alrashied J., Almutairi E., Alrashide B. Preliminary Results from CARPET charge particles detector located in high cut off rigidity. *Proceedings of The 36th International Cosmic Ray Conference PoS(ICRC2019)*, 2019, Vol. 358, p. 1115. DOI: 10.22323/1.358.1115
64. Maghrabi A., Almutairi M., Aldosari A., Altilasi M., Alshehri A. Charged particle detector-related activities of the KACST radiation detector laboratory, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2021, DOI: 10.1080/16878507.2021.1877393.
65. Philippov M.V., Makhmutov V.S., Stozhkov Yu.I., Maksimov 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. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2020, Vol. 959, 16356, DOI: 10.1016/j.nima.2020.163567.
66. Тулеков Е.А., Махмутов В.С., Базилевская Г.А., Стожков Ю.И., Морзабаев А.К., Филиппов М.В., Ерхов В.И., Дюсембекова А.С. Наземная установка для изучения вариаций космических лучей в городе Нур-Султан. *Геомагнетизм и аэронавигация*, 2020, т. 60, № 6, с. 704–709. DOI: 10.31857/S0016794020060139.
67. Morzabaev A.K., Giniyatova Sh.G., Shakhanova G.A., Makhmutov V.S. Evaluation of CARPET hardware and software potentialities. *Bulletin of the University of Karaganda-physics*, 2018, Vol. 2, № 90, pp. 81-87.
68. Тулеков Е.А., Морзабаев А.К., Махмутов В. С., Ерхов В. И., Филиппов М. В. Вариации космических лучей в период 2016-2019 гг. по данным наблюдений экспериментального комплекса ЕНУ. *Вестник ЕНУ им. Л. Н. Гумилёва. Физика. Астрономия*, 2020, т. 133, № 4, с. 79-85, DOI: 10.32523/2616-6836-2020-133-4-79-85.
69. Филиппов М.В., Махмутов В.С., Стожков Ю.И., Максумов О.С. Наземная установка для детектирования заряженной компоненты космических лучей

- CARPET. Приборы и техника эксперимента, 2020, № 3, с. 109–117. DOI: 10.31857/S0032816220030039.
70. Характеристики высоковольтного преобразователя PHV 12-0.5k 1000p: [сайт]. URL: <https://www.tracopower.com/int/ru/model/phv-12-0-5k1000p> (дата обращения: 13.04.2021).
71. Характеристики низковольтного преобразователя TEN 3-1211: [сайт]. URL: <https://www.tracopower.com/products/ten3.pdf> (дата обращения: 13.04.2021).
72. Характеристики датчика давления BMP085: [сайт]. URL: <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Bosch/BMP085.pdf> (дата обращения: 13.04.2021).
73. Характеристики датчика температуры DS18B20: [сайт]. URL: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temp/DS18B20.pdf> (дата обращения: 13.04.2021).
74. Характеристики аналого-цифрового преобразователя MCP3201: [сайт]. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21290F.pdf> (дата обращения: 13.04.2021).
75. Характеристики микроконтроллера ATmega168: [сайт]. URL: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-9365-Automotive-Microcontrollers-ATmega88-ATmega168_Datasheet.pdf (дата обращения: 13.04.2021).
76. Характеристики интерфейсной микросхемы MAX232: [сайт]. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/max232.pdf> (дата обращения: 13.04.2021).
77. Характеристики преобразователя TML 30252: [сайт]. URL: <https://www.tracopower.com/products/tml-primary.pdf> (дата обращения: 13.04.2021).
78. Дорман Л.И. Метеорологические эффекты космических лучей. М.: Наука, 1972. — 211 с.
79. Dorman, L.I. Cosmic Rays in the Earth's Atmosphere and Underground, Kluwer, Dordrecht, Netherlands, 2004. - 855 p.
80. Riadigos I., Garcia-Castro D., Gonzalez-Diaz D., Perez-Munuzuri. Atmospheric temperature effect in secondary cosmic rays observed with a 2 m² ground-based tRPC detector. Earth and Space Science, Vol. 7, e2020EA001131, DOI: 10.1029/2020EA001131.
81. Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1970. — 296 с.

82. Гладуш М.Г., Гуденко А.В., Извекова Ю.Н., Кузьмичёв С.Д., Максимычев А.В., Попов П.В., Филатов Ю.Н. Модели и концепции физики: механика. Лабораторный практикум. Обработка результатов измерений. — М.: МФТИ, 2011. — 42 с.
83. Berkova M.D., Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G. Temperature effect of the muon component of cosmic ray and practical possibilities of its accounting. Proc. 21st ECRS. Kosice, Slovakia, 9–12 September 2008, pp. 123–126.
84. Zazyan M., Ganeva M., Berkova M., Yanke V., Hippler R., Atmospheric effect corrections of MuSTAnG data, J. Space Weather Space Clim., 2015, Vol. 5, id. A6, DOI: 10.1051/swsc/2015007.
85. Ganeva M., Peglow S., Hippler R., Berkova M., Yanke V., Seasonal variations of the muon flux seen by muon telescope MuSTAnG. J. Phys. Conf. Ser., 2013, 409, 012242, 201. DOI: 10.1088/1742-6596/409/1/012242.
86. Dmitrieva A. N., Astapov I. I., Kovylyaeva A. A., Pankova D. V., Temperature effect correction for muon flux at the Earth surface: estimation of the accuracy of different methods, Journal of Physics: Conference Series, 2013, 409, 012130, DOI: 10.1088/1742-6596/409/1/012130.
87. База данных московского нейтронного монитора [сайт]. URL: <http://cr0.izmiran.ru/mosc/main.htm> (дата обращения 06.05.2021).
88. Makhmutov V., Bazilevskaya G., Stozhkov Yu., Philippov M., Yair Y., Yaniv R., Harrison G., Nicoll K., Aplin K. Cosmic ray measurements in the atmosphere at several latitudes in October, 2014. Proceedings of The 34th International Cosmic Ray Conference PoS(ICRC2015), 2016, Vol. 236, 392. DOI: 10.22323/1.236.0392
89. Casolino M. et al. (PAMELA Collaboration) Launch of the space experiment PAMELA, Advances in Space Research, 2008, Vol. 42, № 3, pp. 455-466, DOI: /10.1016/j.asr.2007.07.023.
90. Adriani O. et al. (PAMELA Collaboration) An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5–100 GeV, 2009, Nature, Vol. 458, pp. 607–609, DOI: 10.1038/nature07942.
91. Adriani O. et al. (PAMELA Collaboration) The discovery of geomagnetically trapped cosmic-ray antiprotons, The Astrophysical Journal Letters, 2011, 737: L29 (5pp), DOI: 10.1088/2041-8205/737/2/L29.
92. Adriani O. et al. (PAMELA Collaboration) Measurement of boron and carbon fluxes in cosmic rays with the PAMELA experiment, The Astrophysical Journal, 2014, 791:93 (11pp), DOI: 10.1088/0004-637X/791/2/93.

93. Филиппов М.В., Стожков Ю.И., Махмутов В.С., Максумов О.С., Викторов С.В., Квашинин А.Н., Квашинин А.А. Разработка компактного наземного нейтронного детектора. Изв. РАН, сер. физ., 2015, т. 79, № 5, с. 763–766. DOI: 10.7868/S036767651505021X.
94. Филиппов М.В., Махмутов В.С., Стожков Ю.И., Ролан Ж.-П., Калинин Е.В. Исследование вариаций потоков нейтронов с помощью наземного нейтронного детектора. Изв. РАН, сер. физ., 2019, т. 83, № 5, с. 670–672. DOI: 10.1134/S0367676519050132.
95. Филиппов М.В., Махмутов В.С., Стожков Ю.И., Максумов О.С., Raulin J.-P., Tacza J. Наземная установка для детектирования нейтральной компоненты космических лучей “Нейтронный детектор”. Приборы и техника эксперимента, 2020, № 5, с. 96–103. DOI: 10.31857/S0032816220050298.
96. Характеристики низковольтного преобразователя TEN 12-2112: [сайт]. URL: <https://www.tracopower.com/products/ten10.pdf> (дата обращения: 16.04.2021).
97. Характеристики высоковольтного преобразователя CA20P-T: [сайт]. URL: <https://www.xppower.com/product/CA-T-Series> (дата обращения: 16.04.2021).
98. Характеристики низковольтного преобразователя TEN 12-15252: [сайт]. URL: <https://www.tracopower.com/int/ru/model/tmp-15252> (дата обращения: 16.04.2021).
99. Куликов С.А., Калинин И.В., Морозов В.М., Новиков А.Г., Пучков А.В., Черников А.Н., Шабалин Е.П. Измерение спектров холодных нейтронов на макете криогенного замедлителя реактора ИБР-2М. Письма в ЭЧАЯ, 2010, т. 7, №1(157), с.95-100.
100. Романюк Ю.А. Основы цифровой обработки сигналов. В 3-х ч. Ч.1. Свойства и преобразования дискретных сигналов: Учебное пособие. -2е изд., перераб. М.: МФТИ, 2007. —332 с.
101. Филиппов М.В., Махмутов В.С., Квашинин А. Н., Максумов О.С., Стожков Ю.И., Raulin J.-P., Tacza J. Наземная установка для детектирования космических лучей “Гамма-спектрометр” в астрономическом комплексе CASLEO. Приборы и техника эксперимента, 2021, № 4, с. 74-78, DOI: 10.31857/S0032816221040030.
102. Характеристики сцинтилляторов ScintiTech: [сайт] URL: <http://www.scintitech.com/> (дата обращения: 17.04.2021).
103. Характеристики фотоэлектронного умножителя Hamamatsu R1307: [сайт]. URL: <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/type/R1307/index.html> (дата обращения: 17.04.2021).

104. Характеристики низковольтного преобразователя TML 05212: [сайт]. URL: <https://www.tracopower.com/int/ru/model/tml-05212> (дата обращения 17.04.2021).
105. Характеристики аналого-цифрового преобразователя USB3000 [сайт]. URL: <https://www.r-technology.ru/products/adc/usb3000.php> (дата обращения 17.04.2021).
106. *Ford K., Harris J.R., Shives R., Carson J., Buckle J.* Remote Predictive Mapping 2. Gamma Ray Spectrometry: A Tool for Mapping Canada's North, 2008, Geoscience Canada, Vol. 35. № 3–4. pp. 109-126.
107. *Grasty R.L.* Gamma ray spectrometric methods in uranium exploration theory and operational procedures Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores. Geological Survey of Canada, Economic Geology Report 31, 1979, pp. 147-161.
108. База данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений [сайт]. URL.: <http://spaceweather.izmiran.ru/rus/dbs.html> (дата обращений 17.06.2021).
109. Данные измерений потоков протонов космическими аппаратами GOES [сайт]. URL: <https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-proton-flux> (дата обращения 23.04.2021).
110. База данных OMNI [сайт]. URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> (дата обращения 24.04.2021).
111. База данных нейтронного монитора JungfrauJoch [сайт]. URL: <http://cr0.izmiran.ru/jung/main.htm> (дата обращения 25.04.2021).
112. База данных нейтронного монитора Алматы [сайт]. URL: <http://cr0.izmiran.ru/aatb/main.htm> (дата обращения 25.04.2021).
113. База данных нейтронного монитора Апатиты [сайт]. URL: <http://cr0.izmiran.ru/apty/main.htm> (дата обращения 25.04.2021).
114. *Трефилова Л.А., Кобелев П.Г., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г.* Понижение интенсивности космических лучей в мае 2019 года в 24-м солнечном цикле. “Physics of Auroral Phenomena”, 2020, Proc. XLIII Annual Seminar, Apatity, pp. 80-83, DOI: 10.37614/2588-0039.2020.43.019.
115. *Chubenko A.P., Amurina I.V., Antonova V.P., Kokobaev M.M., Kryukov S.V., Nam R.A., Nesterova N.M, Oskomov V.V., Piscal V.V., Ptitsyn M.O., Sadykov T.Kh., Shepetov A.L., Vildanova L.I., Zybin K.P., Gurevich A.V.* Effective growth of a number of cosmic ray electrons inside thundercloud. Phys. Letter A, 2003, Vol. 309, № 1–2. pp. 90-102, DOI: 10.1016/S0375-9601(03)00062-8.
116. *Chilingarian A., Daryan A., Arakelyan K., Hovhannisyan A., Mailyan B., Melkumyan L., Hovsepyan G., Chilingaryan S., Reymers A., Vanyan L.* Ground-based observations

of thunderstorm-correlated fluxes of high-energy electrons, gamma rays, and neutrons. *Phys. Rev. D.* 2010, Vol.82, 043009, DOI: 10.1103/PhysRevD.82.043009.

117. *Лидванский А.С., Хаердинов Н.С.* Динамика космических лучей в электростатическом поле атмосферы и генерация частиц грозowymi облаками. *Изв. РАН. сер. физ.*, 2007, т. 71. № 7, с. 1060-1062.
118. *Gjesteland T., Ostgaard N., Collier A.B., Carlson B.E., Eyles C., Smith D.M.* A new method reveals more TGFs in the RHESSI data. *Geophysical Research Letters*, 2012, Vol. 39, L05102, DOI: 10.1029/2012GL050899.
119. *Kozlov V.I., Mullayarov V.A., Starodubtsev S.A., Toropov A.A.* Neutron bursts associated with lightning cloud-to-ground discharges. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, Vol. 409, 012210, Doi:10.1088/1742-6596/409/1/012210.
120. *Алексеевко В.В., Громушкин Д.М., Джампуев Д.Д., Куджаев А.У., Михайлова О.И., Стенькин Ю.В., Степанов В.И., Щёголев О.Б., Сулаков В.П., Яшин И.И.* Вариации нейтронного потока во время гроз. *Изв. РАН. сер. физ.*, 2015, т. 79, № 5, с 739, DOI: 10.7868/S036767651505004X.
121. Руководство по эксплуатации монитора электрического поля EFM-100 [сайт]. URL: https://www.boltek.com/EFM-100C_Manual_121415.pdf (дата обращения 09.05.21).