МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

УДК 53.082

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО БАРОРЕЛЕ ДЛЯ СТРАТОСФЕРНЫХ РАДИОЗОНДОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

А. Н. Квашнин, Д. С. Тесленко

В рамках программы модернизации стратосферного радиозонда для космических лучей было разработано электронное барореле, сконструированное с использованием современной элементной базы. В данной статье рассматривается его конструкция и характеристики. Приводится также сравнение результатов тестовых полётов с электронным барореле и полётов с механическим барореле во время аналогичной солнечной активности 1978 *года. По результатам всех испытаний рекомендовано использовать электронное барореле в схеме радиозонда.*

Ключевые слова: барореле, радиозонд, методика, полёты, космические лучи.

Введение. На Долгопрудненской научной станции ФИАН в течение нескольких циклов солнечной активности (с 1957 года) ведутся регулярные измерения потоков космических лучей с помощью радиозондов, запускаемых в стратосферу [1, 2]. За это время конструкция радиозонда претерпела несколько изменений. Первые конструкции были выполнены на радиолампах, затем были использованы полупроводниковые радиоэлементы (одноканальный вариант) и, наконец, в 1968 году был создан двухканальный вариант. Общим для всех конструкций радиозондов является детектор заряженных частиц – счётчик СТС6. Для определения высоты полёта радиозонда использовался механический бародатчик. Принципиальная радиосхема зонда и описание его работы приводилось в более ранних публикациях [3–5], поэтому здесь на рис. 1 мы приводим только его блок-схему.

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: kvashninan@lebedev.ru.

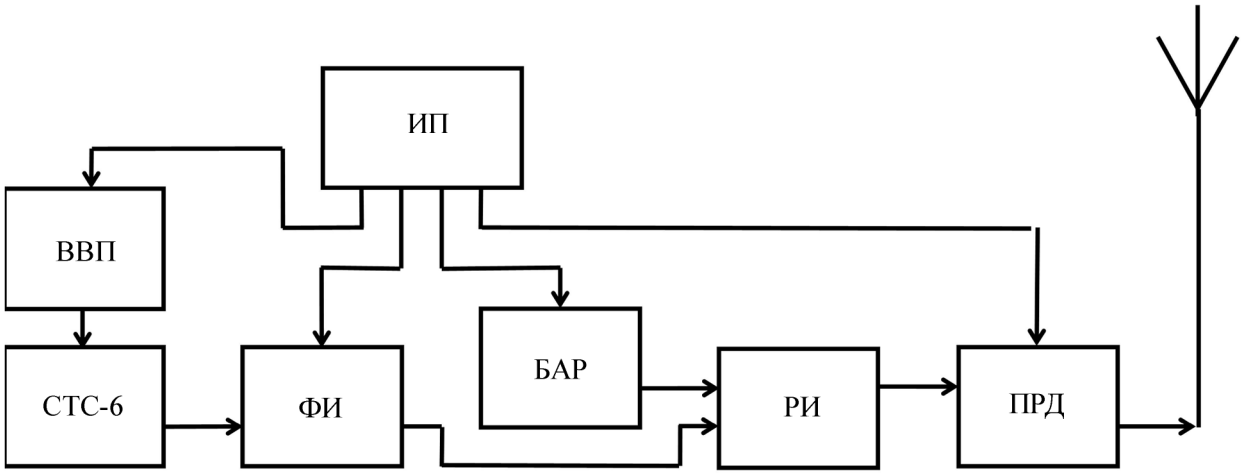

Рис. 1: *Блок-схема радиозонда: ВВП – высоковольтный преобразователь, СТС6 – детектор заряженных частиц, ФИ – формирователь импульса, БАР – барореле, РИ – расширитель импульса, ИП – источник питания, ПРД – радиопередатчик.*

До начала двухтысячных годов для измерения высоты подъёма радиозонда применялся механический бародатчик заводского изготовления. Но завод прекратил их выпуск и мы были вынуждены начать изготовление бародатчиков силами своей механической мастерской. Механическое барореле нуждается в ручной калибровке каждого бародатчика, достаточно трудоемко и дорого в производстве, а для стабилизации механических напряжений анероидной коробки, возникающих при её изготовлении, требует большой временной выдержки (до нескольких месяцев). Эти моменты отсутствуют в электронном бародатчике. Кроме того, стоимость механического бародатчика выше чем электронного. Современное развитие электроники позволяет заменить механический бародатчик его электронным аналогом. На Долгопрудненской научной станции ФИАН было разработано и протестировано электронное барореле. Тестирование проводилось в лабораторных условиях на барокамере, барореле отдельно и в составе конструкции зонда. Затем была проведена проверка в условиях реальных полётов радиозондов.

Электронное барореле. В состав электронного барореле входят: цифровой бародатчик MS5611 (паспортный диапазон рабочих температур –40. . . +85 °C), микроконтроллер ATmega8L 8AU, герконовое реле K1SIP-1A03, преобразователь напряжения HT75335 и кварцевый резонатор HC–49. На рис. 2 приведена принципиальная схема барореле.

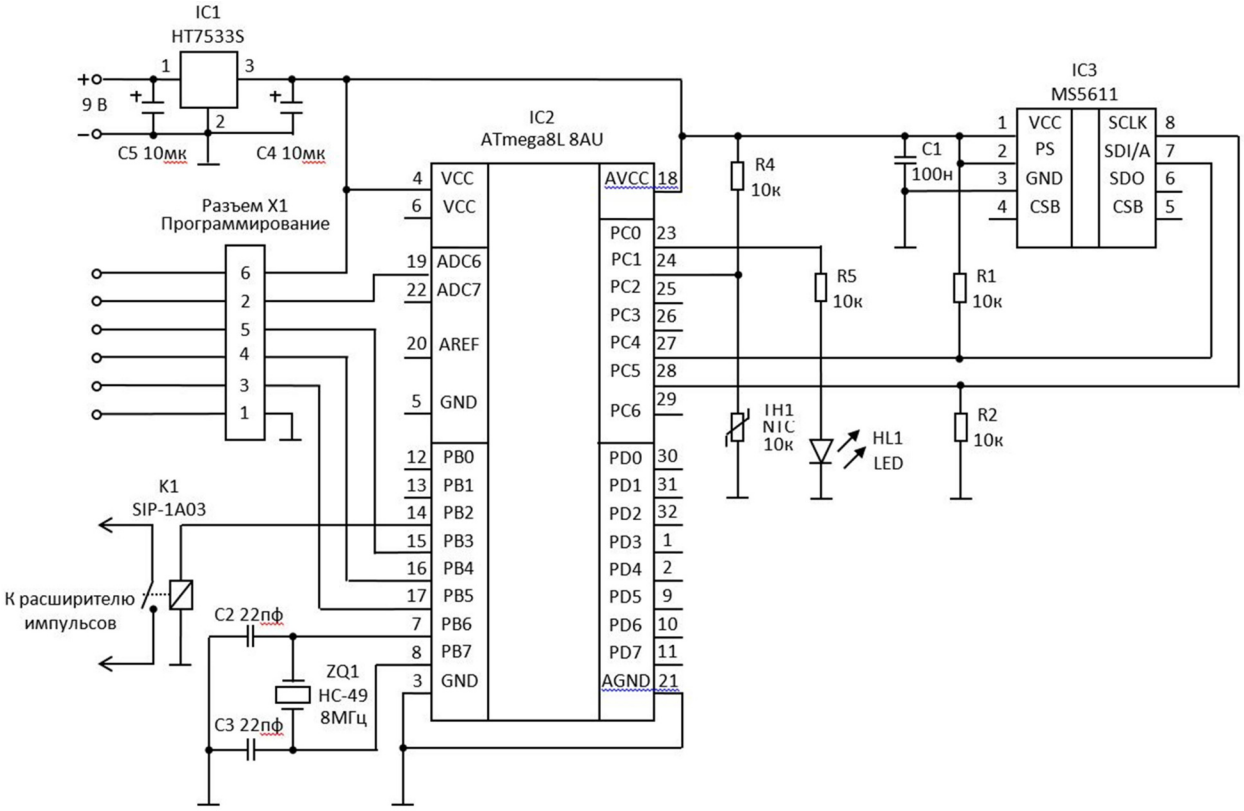

Рис. 2: *Принципиальная схема барореле: HT75335 – преобразователь питания, SIP-1A03 – герконовое реле, X1 – разъём для программирования микроконтроллера, ATmega8L 8AU – микроконтроллер, MS5611 – бародатчик, HC–49 – кварцевый резонатор.*

Питание радиозонда осуществляется от сборки батарей “крона” 9 В, а для барореле требуется напряжение в 3.3 В, поэтому барореле питается через преобразователь HT75335, вырабатывающий это напряжение. Потребление барореле составляет 7 мА.

Задача барореле – обеспечить информацию о высоте подъёма радиозонда. Зависимость показаний барореле от температуры не должна превышать 5% в диапазоне температур от +30 °C до –30 °C по всем высотам (давлениям) атмосферы до 10 мм рт.ст.

Как работает барореле? В память микроконтроллера записываются значения давлений, при которых должно происходить замыкание или размыкание контактов герконового реле. Величины этих давлений приведены в табл. 1.

Программа проверяет значения давлений, приходящие от бародатчика, и сравнивает их с давлениями из табл. 1, записанными в память микроконтроллера. Когда эти

значения совпадают, с микроконтроллера на герконовое реле подаётся (или снимается) напряжение, что приводит, соответственно, к замыканию или размыканию контактов реле. Выходы герконового реле соединены со входом расширителя импульсов схемы радиозонда (рис. 1). Замыкание контакта реле присоединяет параллельно конденсатору во входной цепочке расширителя импульсов дополнительный конденсатор, что увеличивает ширину приходящих импульсов до 1200 мкс. При размыкании реле дополнительный конденсатор отсоединяется и длительность импульсов восстанавливается (до 800 мкс). Радиопередатчик передаёт зарегистрированные и сформированные импульсы на землю. На наземном пункте приёма сигналов радиозонда регистрируется количество импульсов и время момента изменения их ширины. Пользуясь этой информацией и данными табл. 1, мы можем построить график зависимости давления от времени и по нему определять высоту радиозонда (давление) в любой момент времени. Регистрация количества импульсов осуществляется ежеминутно. Таким образом, зная счёт в минуту и высоту зонда в данную минуту, возможно определить распределение числа импульсов от космических лучей по всем высотам. Поэтому, для получения корректной информации, точность определения высоты крайне важна.

Таблица 1

14 *точек давления, в которых должно срабатывать барореле*

№ контакта	Состояние контакта	Давление, мм рт.ст.	Состояние контакта	Давление, мм рт.ст.
1	замкнут	272	разомкнут	221
2	замкнут	171	разомкнут	132
3	замкнут	99	разомкнут	76
4	замкнут	60	разомкнут	50
5	замкнут	39	разомкнут	30
6	замкнут	23	разомкнут	13
7	замкнут	10	разомкнут	4

Так как в стратосфере зонд подвергается воздействию достаточно низких температур необходимо было провести проверку работы барореле в этих условиях. С этой целью барореле помещалось в пенопластовую коробку, заполненную сухим льдом. Через стенку внутрь коробки пропускался конец спиртового термометра. Конец термометра находился в непосредственной близости от барореле. Коробку помещали в барокамеру так, чтобы была видна шкала термометра. Подводили питание к барореле и начина-

ли снижать давление в барокамере, фиксируя температуру по термометру, а величину давления, в моменты срабатывания барореле, по ртутному манометру. Результаты эксперимента приведены на рис. 3.

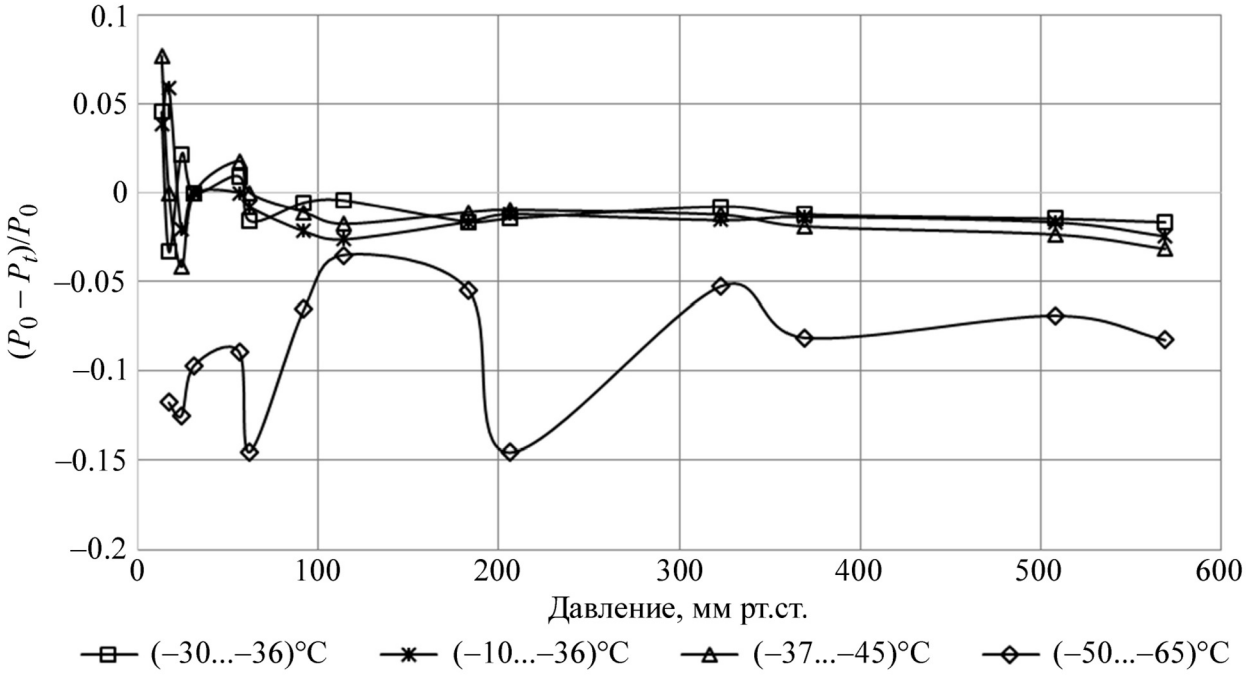

Рис. 3: *Относительные отклонения градуировки электронного барореле при охлаждении от градуировки при комнатной температуре* $(P_0 - P_t)/P_0$*, где* P_0 *– измерения при* 17 °*C,* P_t *– измерения при замораживании. Давление регистрируется в моменты замыкания и размыкания контактов барореле.*

На рис. 3, в качестве примера, приведены данные градуировки барореле в диапазоне четырех различных интервалов температур. Первая цифра диапазона–температура в начале градуировки, вторая цифра–температура в конце градуировки. По вертикальной оси рис. 3 отложено отношение разности давлений, определяемых барореле в барокамере при 17 °C (P_0) и давлений, определяемых барореле в барокамере при заморозке (P_t), к давлениям, определяемым барореле в барокамере при 17 °C (в точках, указанных в табл. 1). По горизонтальной оси – давление в мм рт. ст. Из рисунка видно, что отклонения при охлаждении до –45 °C лежат в пределах (3–4)%, за исключением давлений меньше 10 мм рт.ст., что обусловлено увеличением относительной неточности за счёт неточности считывания показаний ртутного манометра (порядка 0.5 мм) и малой величины самого давления. При охлаждении в интервале (–50. . .–65) °C отклонение резко

увеличивается (до 15%) и становится нестабильным, а при –65 °C барореле перестаёт работать.

Ранее проведённые нами измерения показали, что температура внутри зонда во время полёта не понижается ниже –30 °C. Поэтому данные, полученные в наших экспериментах при охлаждении барореле, позволяют считать возможным (в пределах температурного режима внутри радиозонда и допустимой 5% неточности) использование его в радиозондах, запускаемых в стратосферу. По паспортным данным требованию по диапазону давлений (3–760) мм рт.ст. бародатчик также удовлетворяет.

Тестовые полёты. Было изготовлено и прокалибровано 10 барореле. Барореле были установлены в радиозонды и с мая месяца по сентябрь 2023 года проведены девять тестовых полётов радиозондов в стратосферу. В результате получено 9 высотных кривых распределения счёта радиозонда в минуту в зависимости от давления атмосферы (г/см^2).

Рис. 4: *Полёты с электронным барореле (пояснения в тексте).*

Для проверки правильности работы барореле из этих полётов были отобраны две группы, по три полёта в каждой, с одинаковым счётом в минуту в максимуме высотной кривой 2650 имп./мин и 2300 имп./мин, которые приведены в виде графика на рис. 4. Из рисунка видно хорошее совпадение формы кривых в каждой группе, что указывает на устойчивую и корректную работу барореле. Некоторые расхождения в ходе кривых связаны с плохими условиями приёма сигналов. Например, при раскачивании зонда

на подвеске и снижения, при этом, уровня амплитуды сигналов до уровня шумов и, в результате, пропусков при записи.

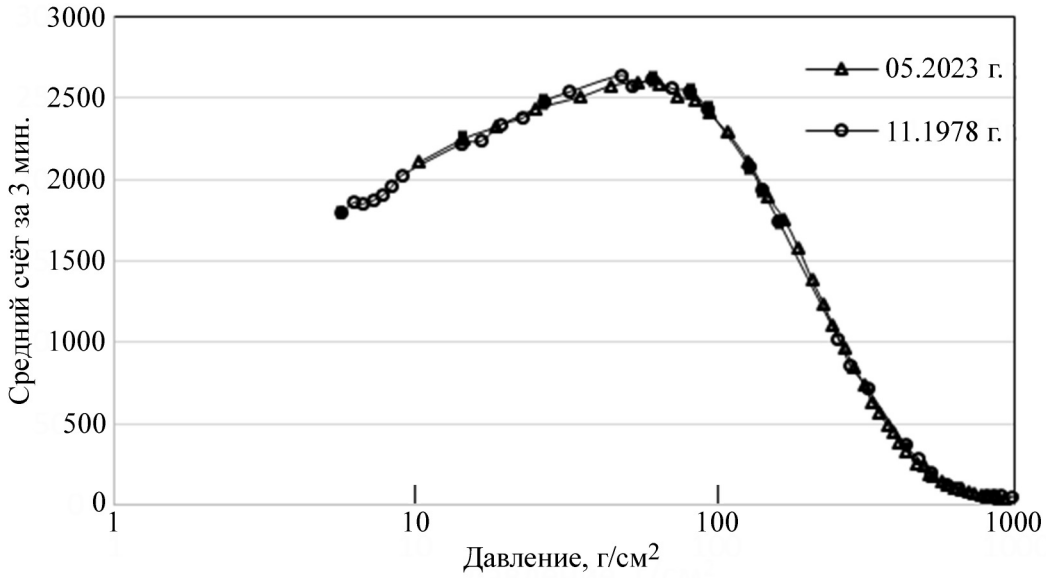

Рис. 5: *Сравнение полётов с электронным барореле с полётом с механическим бародатчиком (пояснения в тексте).*

Проведено сравнение данных, полученных в полётах с применением электронных барореле, с данными, полученными в полётах с механическим барореле заводского изготовления. Сравнение проводилось для измерений во время положительных циклов и во время периодов, близких к максимуму Солнечной активности в 1978 и в 2023 годах. Сравнивались усреднённые данные двух высотных кривых при полетах с электронным барореле за май 2023 г. и высотной кривой в ноябре 1978 года с таким же счётом в минуту радиозонда в максимуме высотной кривой, как и в мае 2023 г. На рис. 5 приведены высотные кривые этих полётов.

Хорошее совпадение, в пределах статистических ошибок, кривых указывает как на корректную работу электронного барореле, так и на правильность методики подготовки прибора (радиозонда) в течение многолетних измерений, и, в результате, на высокую надёжность полученного многолетнего ряда данных потоков космических лучей.

Выводы.

1. Созданное барореле работает стабильно, с точностью определения давления не хуже 5%, и может использоваться в стратосферных радиозондах.

2. Методика подготовки радиозондов и измерений достаточно надёжна и полученные результаты подтверждают достоверность многолетнего ряда данных о потоках космических лучей, полученных с помощью радиозонда.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ю. И. Стожков, В. С. Махмутов, Н. С. Свиржевский, Успехи Физических Наук **192**(9), 1054 (2022). DOI: 10.3367/UFNe.2021.06.039215.
[2] G. A. Bazilevskaya, A. K. Svirzhevskaya, Space Science Reviews **85**(3-4), 431 (1998). DOI: 10.1023/A:1005029832052.
[3] П. Н. Агешин, А. Н. Чарахчьян, Геомагнетизм и аэрономия **6**(3), 617 (1966).
[4] А. К. Свиржевская, Ю. И. Стожков, Труды Всесоюзной конференции по физике космических лучей, Ташкент, 1968, ч. 2, вып. 3, стр. 63, 1969.
[5] Ю. И. Стожков, Модуляция космических лучей солнечной активностью и общим магнитным полем солнца, диссертация на соискание учёной степени доктора физ.-мат. наук, стр. 17, 1970, LPI.

Поступила в редакцию 15 декабря 2023 г.
После доработки 19 апреля 2024 г.
Принята к публикации 14 мая 2024 г.