

УДК 539.121.7

Н. Л. Григоров, В. Е. Нестеров, И. Д. Рапопорт,
И. А. Савенко, Г. А. Скуридин

ИЗМЕРЕНИЕ НА ИСЗ «ПРОТОН-1» И «ПРОТОН-2»
ЭФФЕКТИВНОГО СЕЧЕНИЯ НЕУПРУГОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
С ЯДРАМИ УГЛЕРОДА ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ
 $10^{10} \div 10^{12}$ эв

На ИСЗ «Протон-1» и «Протон-2» измерялись эффективные сечения неупругого взаимодействия протонов с ядрами углерода в интервале энергий от 10^{10} до 10^{12} эв методом выбывания из пучка на двух независимых половинах прибора СЭЗ-14. Величина σ_{p-c} оказалась равной (221 ± 3) мб в интервале энергий $(1,6 \div 3,6) \cdot 10^{10}$ эв, (227 ± 4) мб в интервале энергий $(4,4 \div 8) \cdot 10^{10}$ эв, (242 ± 3) мб при энергиях $(1,2 \div 2,2) \cdot 10^{11}$ эв и равной (270 ± 5) мб при энергии $(4 \div 6) \cdot 10^{11}$ эв после усреднения по данным четырех независимых измерений на ИСЗ «Протон-1» и «Протон-2».

Величина σ_{p-c} при энергии $1,1 \cdot 10^{12}$ эв равна 256 ± 15 мб (результат измерения на одной из половин СЭЗ-14 на ИСЗ «Протон-2»). Таким образом, зарегистрирован 20%-ный рост при изменении энергии протонов от 10^{10} до 10^{12} эв.

Измерение энергетической зависимости эффективных сечений при высоких и сверхвысоких энергиях представляет большой интерес как для физики космических лучей, так и для физики элементарных частиц [1].

Измерения при больших энергиях в настоящее время могут быть выполнены только с использованием космических лучей, являющихся пока единственным источником частиц высоких и сверхвысоких энергий. Однако измерения сечений с использованием частиц космических лучей [2—18] в нижней части атмосферы сопряжены с рядом трудностей, связанных с малой интенсивностью частиц и сложным составом космических лучей.

Использование ионизационного калориметра за пределами атмосферы позволяет в значительной мере преодолеть эти трудности, так как при таких измерениях интенсивность протонов примерно в 10^3 — 10^4 раз больше, чем на высотах гор, и отсутствует примесь π^\pm -мезонов и других вторичных однозарядных частиц в составе космических лучей. Измерения эффективных сечений неупругого взаимодействия протонов с ядрами углерода в интервале энергий от 10^{10} до 10^{12} эв за пределами атмосферы были впервые проведены на космических станциях «Протон-1» и «Протон-2». Предварительные результаты измерений на ИСЗ «Протон-1» были сообщены в работе [19].

В данной статье приводятся результаты дополнительной обработки данных, полученных на «Протон-1», а также результаты обработки значительно большего статистического материала, полученного на «Протон-2».

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения эффективного сечения неупругого взаимодействия на ИСЗ «Протон-1» и «Протон-2» проводились с помощью прибора СЭЗ-14, подробно описанного в работе [20]. Там же изложен и метод измерений.

Сущность его заключалась в том, что поочередно (в течение примерно 10 час.) измерялся поток протонов, проходящих мишень из углерода или калориметре энергию больше некоторого фиксированного значения E_i ($i = 1 \div 9$). (Значению $i = 1$ соответствовала энергия $E_1 = 10^{10}$ эв. Значению $i = 9$ соответствовала энергия $E_9 \approx 10^{14}$ эв. Весь диапазон энергий от 10^{10} до 10^{14} эв был разбит на равные интервалы в логарифмической шкале.) Таким образом, отбирались события, условно обозначаемые $Z_1 N_1 E_{c_i}$ (Z_1 означает, что электрический заряд частицы равен 1, N_1 означает, что через детектор взаимодействий проходит одна частица с единичным зарядом, E_{c_i} означает, что в ионизационном калориметре первичной частицей выделена энергия $\geq E_i$). Аналогичные события ($Z_1 N_1 E_{c_i}$) измерялись и при удалении мишеней из прибора.

На каждой половине СЭЗ-14, представляющей собой самостоятельный прибор, через 10—12 час. интенсивность событий типа $Z_1 N_1 E_{c_i}$ измерялась поочередно с мишенью из графита $N_C(E_i)$, с мишенью из полиэтилена $N_P(E_i)$ и без мишеней $N_0(E_i)$.

Как показано в работе [20], измеренные интенсивности определяют величину соответствующих эффективных сечений неупругого взаимодействия протонов на ядрах углерода и водорода

$$\sigma_{p-c}(E_i) = \frac{A \ln [N_0(E_i)/N_C(E_i)]}{x_C N_{AB}}$$

где A — атомный вес углерода, x_C — толщина графитовой мишени, равная $30,6$ г/см², N_{AB} — число Авогадро.

Следует отметить, что результат измерения сечения не зависит от точного знания величин аппаратных параметров, а также от возможных изменений с ростом энергии доли энергии, измеряемой ионизационным калориметром прибора СЭЗ-14. Последнее может приводить только к погрешностям при определении энергии.

ИЗМЕРЕНИЯ НА ИСЗ «ПРОТОН-1»

За время измерений на «Протон-1» положение мишеней изменялось 25 раз. При этом измерения без мишеней производились на 12 сеансах, с графитовой мишенью на 9 сеансах на I половине и на 7 сеансах на II половине СЭЗ-14.

Для каждого сеанса связи и каждого положения мишеней определялась средняя за сеанс скорость счета протонов, не испытавших взаимодействия (события $Z_1 N_1 E_{c_i}$). За единицу времени при этом был принят интервал между двумя последовательными опросами каждого телеметрического канала, равный примерно 9 сек. Длительность измерений с данным положением мишени во время полета «Протона-1» была различной на разных сеансах. Ввиду небольшого числа измерений с каждым положением мишени сеансы, на которых измерения производились меньше 10—12 час., не исключались из рассмотрения, хотя они и имели меньшую статистическую обеспеченность.

При определении средней скорости счета протонов на каждом сеансе выкидывались интервалы времени, соответствующие прохождению спутника через Бразильскую аномалию, поскольку на этих участках нарушалась нормальная работа прибора, по-видимому, вследствие перегрузки пропорциональных счетчиков. (В районе Бразильской аномалии происходит опускание внутреннего радиационного пояса на малые высоты, вслед-

ствие чего наблюдается резкое возрастание интенсивности протонов и электронов.) Положение аномалии устанавливалось на каждом сеансе путем анализа широтной зависимости интенсивности протонов с энергией, большей 400 Мэв, регистрируемой прибором СЭЗ-1 на том же спутнике.

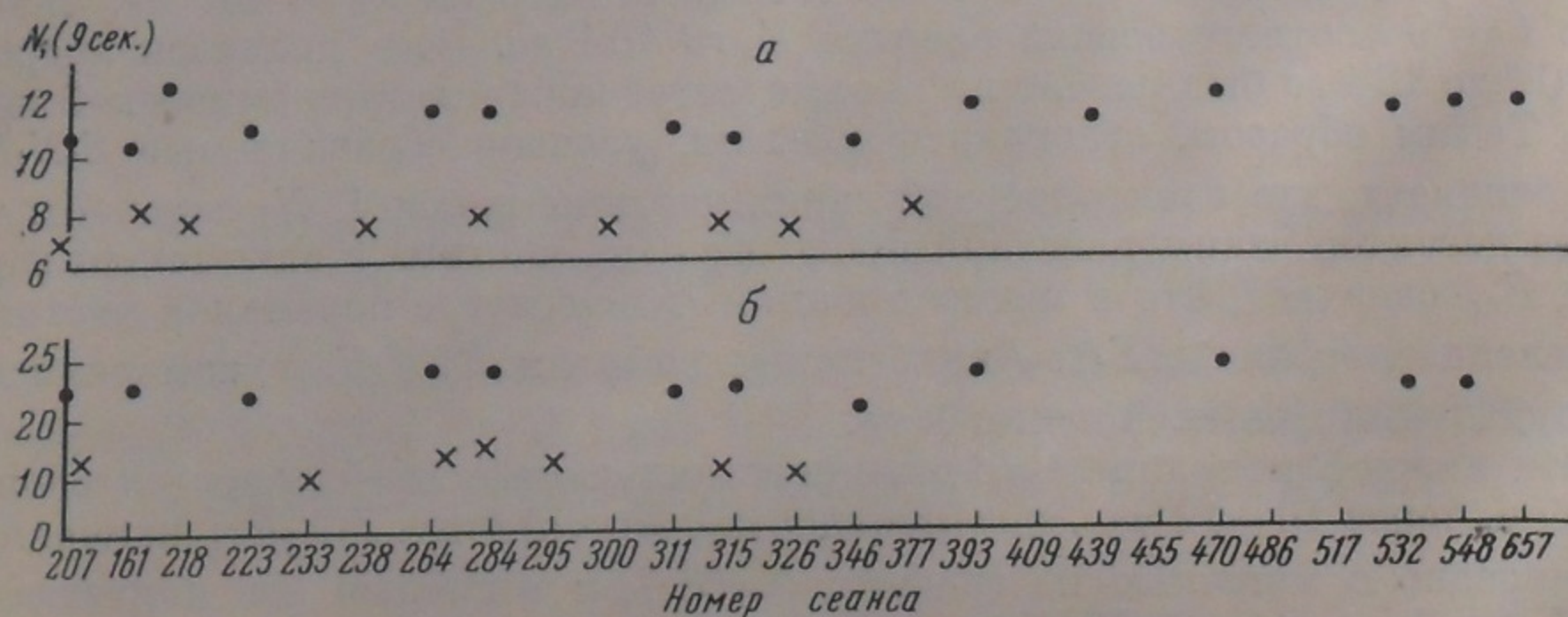


Рис. 1. Зависимость средней за сеанс интенсивности событий $Z_1N_1E_c$, от времени по данным измерений на ИСЗ «Протон-1».

a — I половина СЭЗ-14, *b* — II половина СЭЗ-14. Точки — без мишени, крестики — с графитовой мишенью. По оси абсцисс отложен номер витка орбиты спутника, на котором был сеанс связи и была передана на Землю запомненная информация; по оси ординат — средняя за сеанс скорость счета событий, отнесенная к интервалу между двумя опросами телеметрического канала, равному примерно 9 сек. (деления по оси ординат (*b*) — 10, 15, 20, 25)

События $Z_1N_1E_{c4}$ регистрировались по статистической программе измерений [20] на каждой половине СЭЗ-14 для пяти значений выделенной энергии в калориметре ($i = 1 \div 5$), каждое из которых примерно в три раза превышало предыдущее. События $Z_1N_1E_c$, при определении сечений

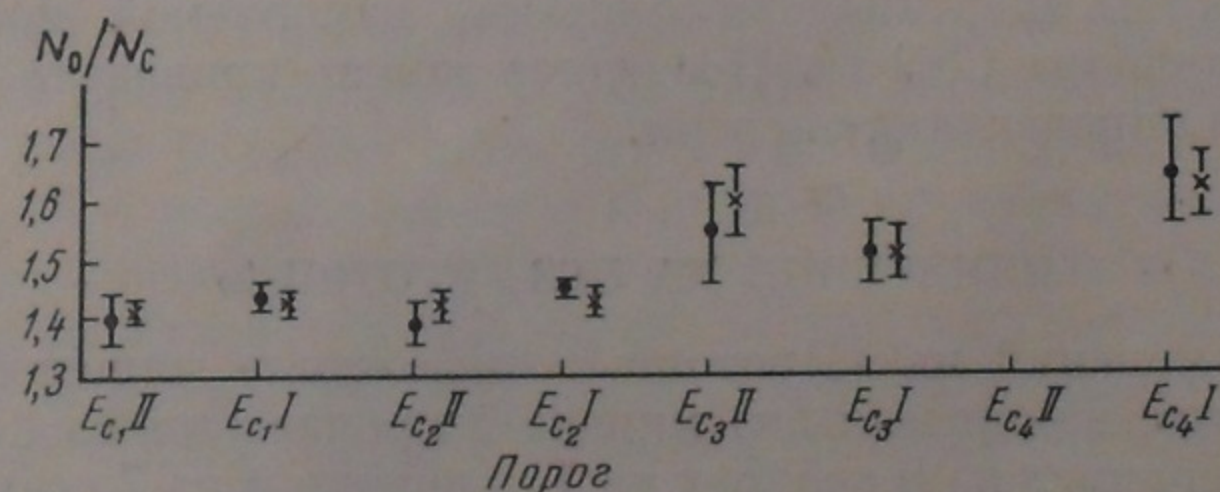


Рис. 2. Отношение скоростей счета без мишени и с графитовой мишенью при разных энергывыделениях в калориметре по данным измерений на «Протоне-1».

Точки — метод усреднения интенсивностей, крестики — метод усреднения отношений интенсивностей (для лучшего сопоставления разных методов обработки точки и крестики смещены друг относительно друга).

По оси абсцисс отложены энергетические пороги в калориметре (шкала произвольная), римскими цифрами указан номер половины СЭЗ-14

были исключены из рассмотрения из-за малого их числа. Так, при измерениях с графитом на I половине СЭЗ-14 было зарегистрировано всего 41 такое событие, на II половине — 192. Следовательно, в этом случае величина сечения могла быть получена лишь с очень большой ошибкой (см. правую точку на рис. 3 в работе [19], где для увеличения статистики были объединены результаты измерений с графитом и полиэтиленом на II половине СЭЗ-14 при энергии E_5).

При определении средней скорости счета событий $Z_1N_1E_c$, вносилась поправка на просчет в связи с тем, что данное событие было заведено в си-

стеме «оперативной памяти» на один триггер и, следовательно, можно было запоминать только 0 или 1 событие за время между двумя последовательными опросами телеметрического канала, а средняя плотность регистрируемых событий оказалась сравнительно большой (около 0,4 на одно измерение без мишеней). При такой средней плотности событий становится вероятным попадание нескольких событий в интервал между двумя опросами. При этом четное число событий будет давать 0, нечетное — 1. По-

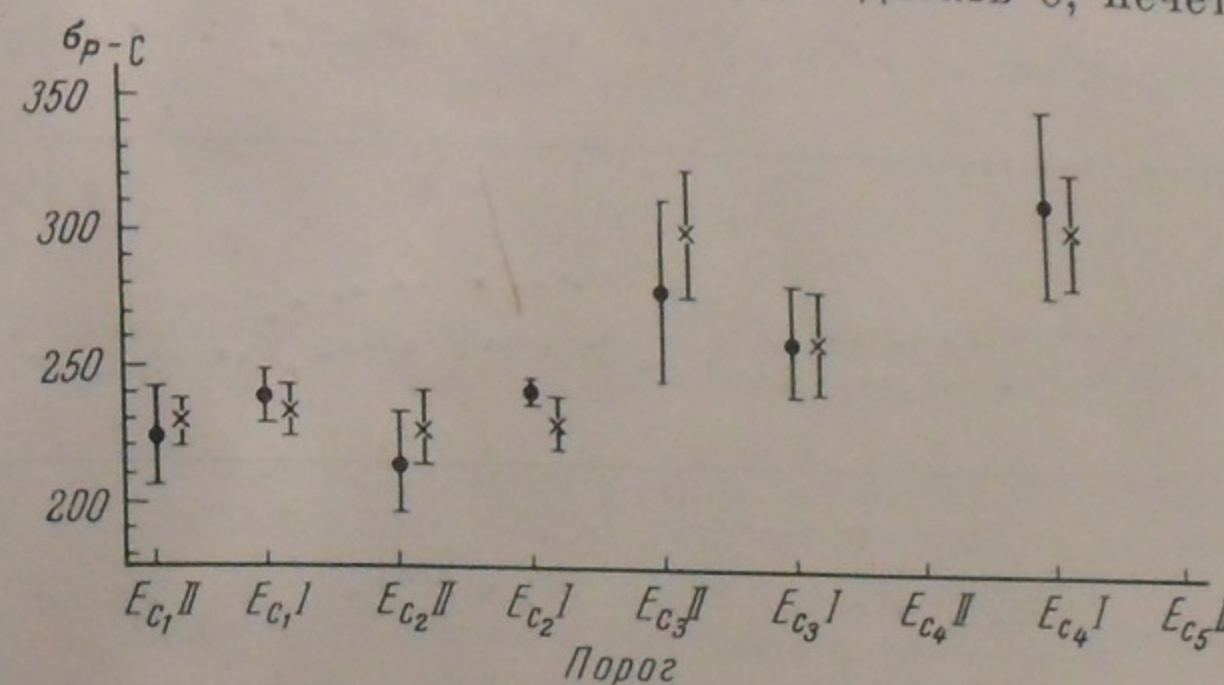


Рис. 3. Зависимость эффективного сечения неупругого взаимодействия протонов с ядрами углерода по данным «Протона-1».

Обозначения те же, что и на рис. 2

правка на просчет вносилась для средних за сеанс значений интенсивностей путем использования распределения Пуассона (для распределения Пуассона была вычислена сумма вероятностей нечетного числа событий для разных средних плотностей событий). Указанная поправка при измерениях без мишеней достигала на I половине СЭЗ-14 величины 1,5—1,7, а на II половине — 2,2.

При определении средних скоростей событий $Z_1N_1E_{c1}$, $Z_1N_1E_{c2}$ и $Z_1N_1E_{c4}$ поправки не вносились. На рис. 1 представлены результаты определения средней за сеанс скорости счета событий $Z_1N_1E_c$, при измерениях без мишени и с графитовой мишенью в течение всего полета «Протона-1». Обработка экспериментальных данных, полученных на «Протоне-1», была проведена двумя методами. При обработке первым методом усреднялись отдельно скорости счета при измерениях без мишени и с графитовой мишенью, находились средние квадратичные ошибки и определялась величина отношения средних скоростей счета без мишени и с ней.

При обработке вторым методом усреднялись отношения скоростей счета без мишени и с ней на смежных сеансах измерения и находилась средняя квадратичная ошибка этого отношения.

На рис. 2 представлены результаты измерения на «Протоне-1» отношения скоростей счета без мишени и с графитовой мишенью. Из рис. 2 видно, что оба метода обработки дают одинаковый результат и приводят к росту указанного выше отношения, а следовательно, и эффективного сечения неупругого взаимодействия протонов с ядрами углерода (рис. 3).

ИЗМЕРЕНИЯ НА ИСЗ «ПРОТОН-2»

Так же как и на «Протоне-1», на «Протоне-2» был установлен прибор СЭЗ-14. В этом приборе был расширен динамический диапазон статистической регистрации интенсивности событий $Z_1N_1E_{ci}$ путем выделения для этой программы измерений дополнительных телеметрических каналов, что позволило, в частности, избежать необходимости внесения поправок на

просчет для событий $Z_1N_1E_{c_3}$. Кроме того, статистическая программа измерений событий $Z_1N_1E_{c_1}$ была распространена на область больших энергий вплоть до E_{c_4} . Измерения на «Протоне-2» отличались от измерений на «Протоне-1» значительно большей статистической обеспеченностью, большим числом перемещений мишеней.

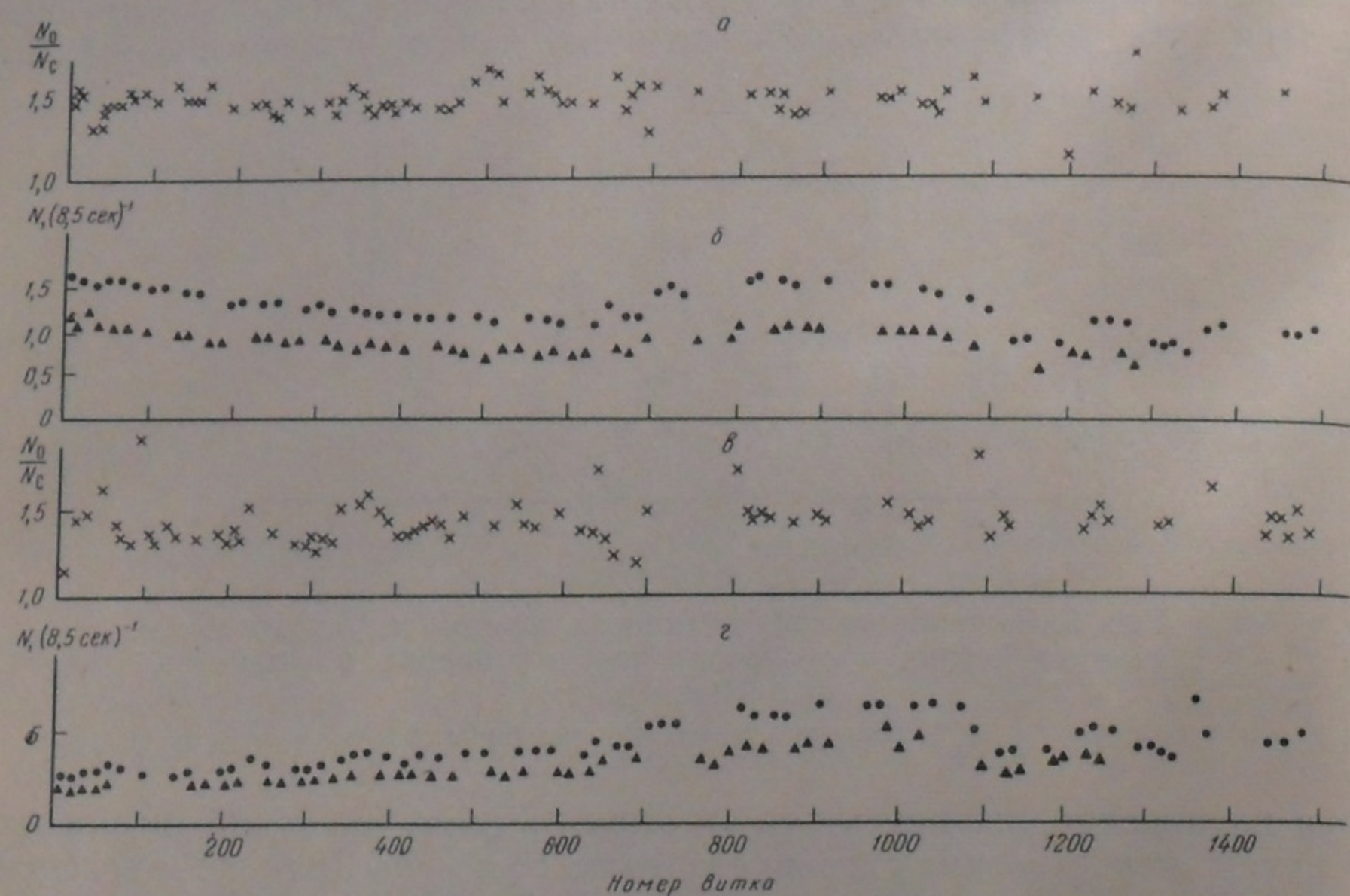


Рис. 4. Временная зависимость средней за сеанс интенсивности событий $Z_1N_1E_{c_2}$ и отношения интенсивностей этих событий при измерениях на смежных сеансах без мишени и с графитом («Протон-2»).

а, б — I половина СЭЗ-14; в, г — II половина СЭЗ-14. Круги — без мишени (N_0), треугольники — с графитовой мишенью (N_c), крестики — отношение интенсивностей. По оси абсцисс отложен номер витка орбиты спутника, на котором был сеанс связи и была передана на Землю запомненная информация.

За время полета «Протона-2» было проведено 62 сеанса измерений без мишеней и 58 сеансов на I половине СЭЗ-14 и 59 сеансов на II половине с графитовой мишенью. При этом длительность сеансов измерений обычно составляет 8—10 час. и лишь в четырех случаях была меньше 1,5 час.

При обработке информации, полученной на «Протоне-2», также как и на «Протоне-1», определялась для каждого сеанса средняя за сеанс скорость счета событий $Z_1N_1E_{c_1}$ при измерениях без мишени и с графитовой мишенью. Единицей времени являлся интервал времени между последовательными опросами каждого телеметрического канала, равный примерно 8,5 сек. При этом предполагалось, что эта величина оставалась постоянной в процессе измерений на «Протоне-2».

На рис. 4 приведена для всего полета «Протона-2» зависимость средней за сеанс интенсивности событий $Z_1N_1E_{c_2}$ от времени. Из рис. 4 видно, что в начале полета спутника происходило монотонное изменение скорости счета, обусловленное, как это показывает сопоставление со скоростью счета «толчков ионизации» в калориметре [21], дрейфом чувствительности ФЭУ в тракте измерения энергии. Из рис. 4 также видно, что начиная примерно с сеансов на 600 витках характер изменения интенсивностей на I и II половинах прибора СЭЗ-14 стал одинаковым. Эти изменения, по-видимому, в основном связаны с изменением времени между последовательными опросами телеметрического канала. Чтобы исключить влияние на величину N_0/N_c монотонных изменений интенсивностей событий, обра-

ботка результатов измерений, выполненных на «Протоне-2», велась вторым методом, т. е. брались отношения интенсивностей, измеренных на смежных сеансах.

На рис. 4 приведена временная зависимость отношения N_0/N_c , полученная по результатам обработки данных измерений как на I, так и на

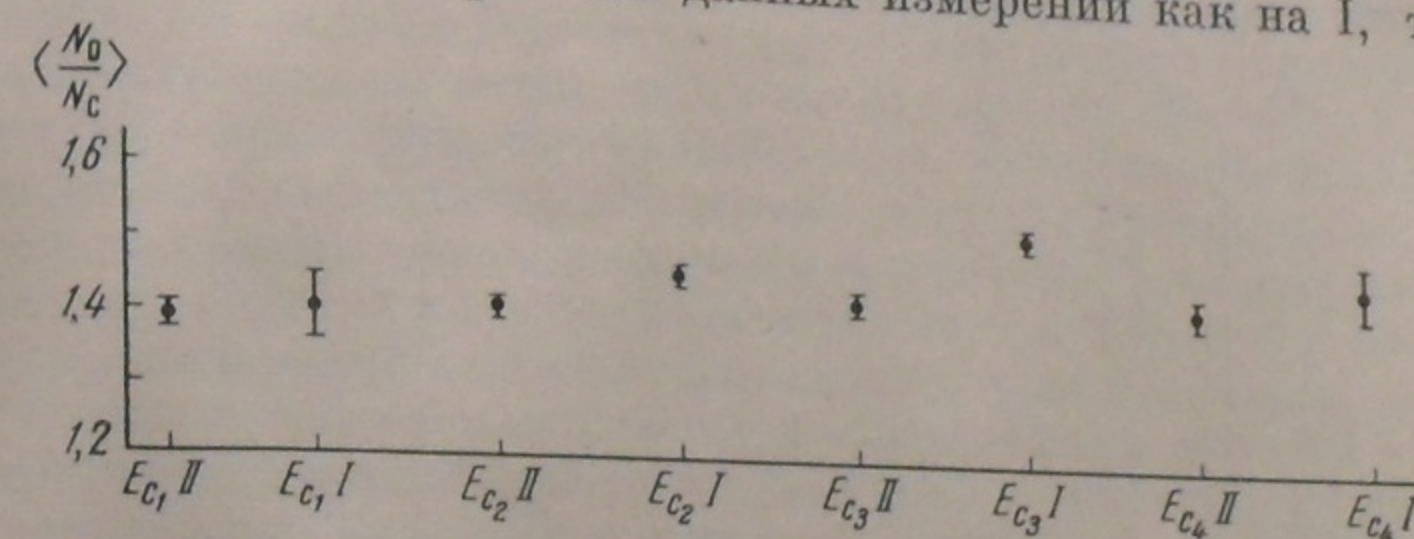


Рис. 5. Среднее значение отношения скоростей счета без мишени и с графитом при разных энерговыделениях в калориметре по данным измерений на «Протоне-2».

Обозначения по оси абсцисс те же, что и на рис. 2

II половине СЭЗ-14 для числа событий $Z_1N_1E_{c_2}$. Из рис. 4 видно, что отношение интенсивностей N_0/N_c не испытывает каких-либо монотонных изменений, хотя каждая из величин (N_0 и N_c) монотонно меняется во времени. По этой причине обработка полученных экспериментальных данных производилась только методом усреднения отношений интенсивности на

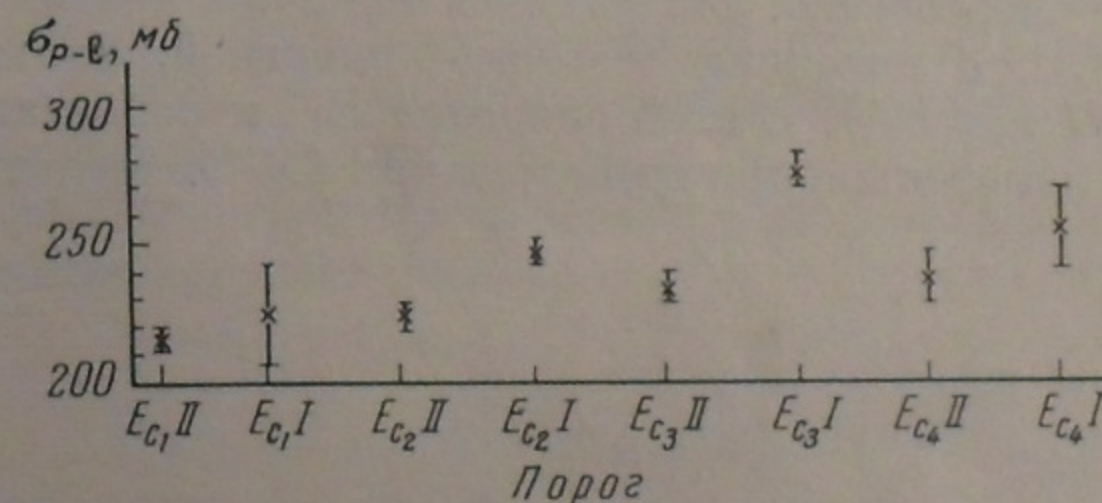


Рис. 6. Эффективные сечения неупругого взаимодействия протонов с ядрами углерода по данным «Протона-2».

Обозначения по оси абсцисс те же, что и на рис. 2

смежных сеансах. Результаты обработки событий $Z_1N_1E_{c_1-4}$ приведены на рис. 5 и 6. На этих рисунках указаны средние квадратичные ошибки. Для событий $Z_1N_1E_{c_1}$ на I половине СЭЗ-14 ошибка является большой, поскольку вследствие каких-то нарушений в системе регистрации имеется небольшое число сеансов (в начале и в конце полета спутника), на которых была запись этих событий.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставление рис. 3 и 6 показывает, что по данным измерений на ИСЗ «Протон-1» и «Протон-2» наблюдается одинаковая тенденция к росту сечения неупругого взаимодействия протонов с ядрами углерода при увеличении энергии протонов.

Измеренные значения эффективных сечений необходимо было приписать энергии частиц, для которых производились измерения. Это делалось следующим образом. Минимальное энерговыделение в калориметре, приводящее к срабатыванию порога, определялось по данным наземных изме-

рений, выполненных на μ -мезонах космических лучей с использованием радиотехнических градуировок. Порогу E_i должна соответствовать, в среднем, энергия первичных частиц $E_i^0 = 2E_i$, так как в ионизационном калориметре прибора СЭЗ-14 протоны выделяют, в среднем, 50% своей энергии [21]. Но эта энергия является минимальной для данного интегрального

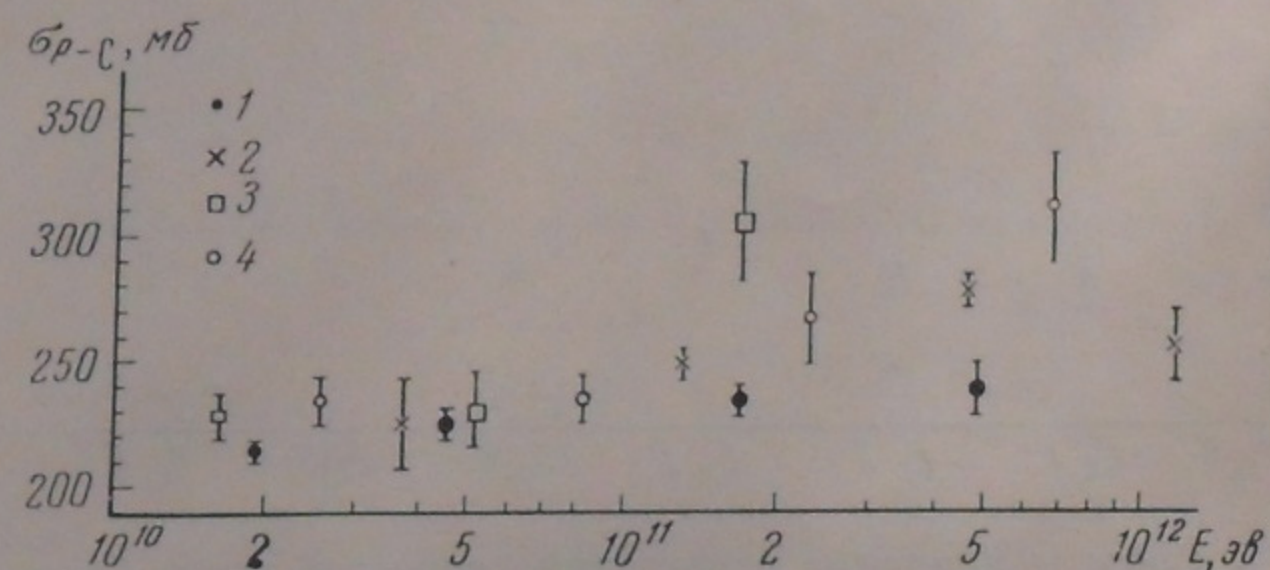


Рис. 7. Энергетическая зависимость эффективного сечения неупругого взаимодействия протонов с ядрами углерода по данным измерений «Протона-1» и «Протона-2».

1 — «Протон-2» (II половина СЭЗ-14), 2 — «Протон-2» (I половина), 3 — «Протон-1» (II половина), 4 — «Протон-1» (I половина)

дискриминатора, если отвлечься от флуктуаций в ионизации. По энергетическому спектру протонов, измеренному в том же эксперименте [21], мы находили такую энергию E_i^* , для которой половина частиц обладает энергией от E_i^0 до E_i^* , а половина частиц — энергией, большей E_i^* , т. е. $N(\geq E_i^0) = 2N(E \geq E_i^*)$. С этой энергией E_i^* и сопоставлялось эффективное сечение, измеренное при срабатывании i -го энергетического порога.

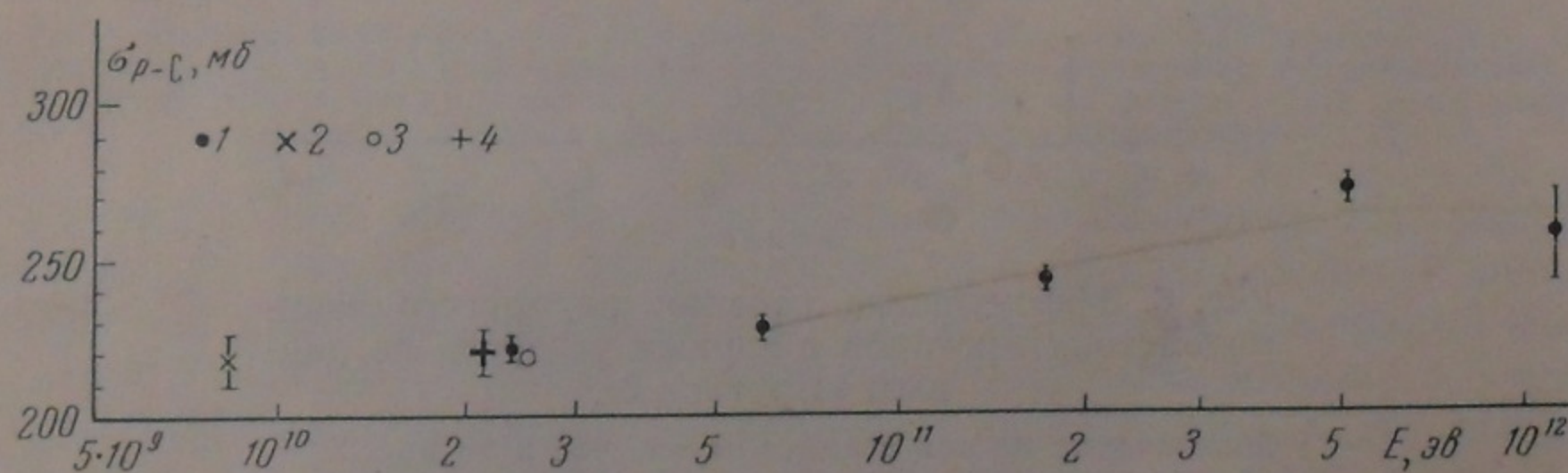


Рис. 8. Средневзвешенные значения эффективных сечений по данным измерений на «Протоне-1» и «Протоне-2».

1 — σ_{p-c} «Протон-1» и «Протон-2», 2 — σ_{n-c} ускорители [22], 3 — σ_{p-c} ускорители [23], 4 — данные работы [24], из которых вычтено сечение квазиупругого рассеяния (σ_{p-c} ускорители). Точка при энергии $1,1 \cdot 10^{12}$ эв не подвергалась усреднению. Она получена в результате непосредственных измерений (см. рис. 7)

Результаты такого сопоставления представлены на рис. 7, где приведены данные как для «Протона-1», так и для «Протона-2». Как видно из рис. 7, разброс экспериментальных значений σ_{p-c} , полученных на ИСЗ, «Протон-1» и «Протон-2» обеими половинами СЭЗ-14, лежит в пределах экспериментальных ошибок измерений. Поэтому допустимо усреднение результатов всех измерений.

Такое усреднение с учетом статистического веса каждой точки, приведенной на рис. 7, было нами выполнено; его результаты приведены на рис. 8. Из данных, приведенных на рис. 8, видно, что регистрируемый рост сечения с ростом энергии протонов существенно превосходит ошибки измерений. Величина эффективного сечения неупругого взаимодействия про-

тонов с ядрами углерода оказалась при этом равной (221 ± 3) мб в интервале энергий $(1,6 \div 3,6) \cdot 10^{10}$ эв, (227 ± 4) мб в интервале энергий $(4,4 \div 8) \cdot 10^{10}$ эв, (242 ± 3) мб при энергии $(1,2 \div 2,2) \cdot 10^{11}$ эв и равной (270 ± 5) мб при энергии $4 \cdot 10^{11} \div 6 \cdot 10^{11}$ эв.

По принципу проведенного измерения σ_{p-c} случаи, когда первичный протон создавал в мишени δ -электрон достаточно высокой энергии, чтобы быть зарегистрированным детектором взаимодействия как вторая частица, делении величины эффективного сечения неупругого взаимодействия случаем образования δ -электронов должны быть отнесены к категории прохождения протонов через мишень без взаимодействия в ней, т. е. в измеренное значение σ_{p-c} должна быть внесена соответствующая поправка.

Легко показать, что если вероятность образования в мишени δ -электрона, регистрируемого детектором взаимодействия как вторая частица, равна W_δ , то в измеренную величину сечения $\sigma_{изм}$ должна быть внесена поправка, равная

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma_{изм}} = - \frac{W_\delta}{\ln(N_0/N_C)}$$

Величина W_δ определялась двумя методами.

Первый метод заключался в следующем.

а) Был проведен расчет спектра δ -электронов, выходящих из мишени $N_\delta(E, E_0)dE$ и созданных первичными протонами со степенным спектром с энергией $\geq E_0$.

б) Была рассчитана вероятность $\omega(E)$ того, что протон, сопровождаемый δ -электроном с энергией E , падающим на свинцовый фильтр детектора взаимодействия, окажется за «окном», соответствующим регистрации одной релятивистской частицы.

в) Была рассчитана вероятность регистрации δ -ливней, созданных первичными частицами с энергией $\geq E_0$:

$$W_\delta(\geq E_0) = \int_0^{E_{max}} N_\delta(E, E_0) \omega(E) dE$$

Расчет дал значения W_δ , приведенные в таблице. Используя вычисленные значения W_δ и измеренные значения N_0/N_C , получим величины поправок $\Delta\sigma/\sigma_{изм}$ на δ -электроны при разных энергиях, приведенные также в таблице.

$E_0, \text{ эв}$	$\geq 6 \cdot 10^9$	$\geq 10^{10}$	$\geq 2 \cdot 10^{10}$	$\geq 4 \cdot 10^{10}$	$\geq 9,4 \cdot 10^{10}$	∞
$W_\delta(\geq E_0)$	0,4	0,6	1,1	1,3	1,6	1,7
$\frac{\Delta\sigma}{\sigma_{изм}}, \%$	-1,2	-1,8	-3,3	-3,8	-4,5	-4,1

Из таблицы видно, что зависимостью вероятности δ -ливней от E_0 объяснить наблюдаемый рост σ с ростом E_0 невозможно, так как при переходе от $2 \cdot 10^{10}$ к $6 \cdot 10^{11}$ эв экспериментально измеренное эффективное сечение возрастает на $20 \pm 2,5\%$, в то время как за счет δ -ливней оно должно возрастать (по расчету) примерно на 1%.

Второй метод заключался в экспериментальном измерении числа δ -ливней, создаваемых в приборе СЭЗ-14 космическими мюонами при постановке на их пути мишени из графита толщиной в $30,6 \text{ г/см}^2$. В этом эксперименте регистрировались мюоны с энергией $\geq 0,6 \cdot 10^9$ эв, что экви-

валентно протонам с $E_0 \gtrsim 6 \cdot 10^9$ эв с точки зрения образования δ -электронов.

Эксперимент дал $W_\delta = (1,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-2}$, что в пределах ошибки совпадает с расчетной величиной. Ввиду незначительности поправки на δ -электроны она в окончательный результат, изображенный на рис. 8, не вносилась.

Измерения, выполненные на ускорителях, показали (рис. 8), что при $E = 8,3$ Гэв $\sigma_{n-c} = 218 \pm 8$ мб [22], при $E = 24$ Гэв $\sigma_{p-c} = 218$ мб [23]. Повторные измерения σ_{p-c} , проведенные при энергии 21,5 Гэв той же группой экспериментаторов, но в условиях «хорошей геометрии», привели к большему значению сечения, равному 254 ± 7 мб [24]. Однако в работе [24] величина «сечения поглощения» 254 ± 7 мб была получена путем вычитания из измеренной величины полного сечения (335 мб) упругого рассеяния, равного 81 мб. При этом учитывалось только когерентное упругое, а «квазиупругое» рассеяние не учитывалось, и, следовательно, относилось к процессам, дающим вклад в сечение поглощения. Поскольку в экспериментах с космическими лучами «квазиупругое» рассеяние не дает вклада в измеряемые сечения неупругого взаимодействия, мы проинтегрировали численно приведенную в работе [24] зависимость дифференциального сечения рассеяния от величины передаваемого четырехмерного импульса и нашли, что сумма когерентного упругого сечения и «квазиупругого» сечения равна 114 мб, а следовательно, величина неупругого сечения протонов с ядрами углерода равна 221 мб. Эта величина приведена на рис. 8.

Полученный в результате измерений характер зависимости $\sigma(E_0)$ от E_0 , показанный на рис. 8, можно было бы объяснить тривиальной причиной — просчетом части взаимодействий при малых энергиях протонов, который приводит к завышению числа регистрируемых событий $Z_1 N_1 E_{c_i}$ при измерениях с графитом и, следовательно, к занижению отношения N_0/N_c и величин измеряемого сечения σ_{p-c} . Этот просчет может возникнуть из-за того, что при малых энергиях протонов вторичные частицы разлетаются под большими углами к направлению первичного протона и из-за больших геометрических размеров мишени в некоторой доле случаев могут не попадать в детектор взаимодействия. С ростом энергии протонов происходит коллимация вторичных частиц и растет их число, поэтому вероятность просчета должна достаточно быстро убывать с ростом E_0 .

То обстоятельство, что полученное нами значение σ при $E \simeq 2 \cdot 10^{10}$ эв с точностью до ошибок измерений совпадает со значением σ , полученным на ускорителе, показывает, что если просчет взаимодействий в приборе СЭЗ-14 и существует, то он весьма незначителен и может быть оценен как разность значений σ , измеренных нами и на ускорителе [24]. Эта разность равна 1 ± 8 мб, т. е. величине недостаточной, чтобы объяснить изменение σ на 45 ± 7 мб при переходе от энергии протонов $2 \cdot 10^{10}$ к $5 \cdot 10^{11}$ эв.

Кроме того, сам характер зависимости σ от E не тот, который следовало бы ожидать при существовании значительного просчета взаимодействий при малых энергиях протонов. В этом случае можно было бы ожидать быстрое возрастание σ в интервале энергий $2 \cdot 10^{10} \div 10^{11}$ эв, так как уже при $E = 10^{11}$ эв средняя множественность рождаемых заряженных частиц около $7 \div 8$ и средний угол их разлета $\sim 5 \div 10^\circ$, что практически исключает просчет взаимодействий. Полученные нами результаты показывают, что основной рост σ происходит при энергиях $> 10^{11}$ эв (на $\sim 15\%$), в то время как в интервале $2 \cdot 10^{10} - 10^{11}$ эв σ возрастает всего на $\sim 5\%$.

Известно, что до настоящих измерений имевшиеся в литературе данные о величине σ , полученные с помощью космических лучей, не указывали на изменение величины эффективного сечения неупругого взаимодей-

ствия с легкими ядрами с ростом энергии нуклонов. Нам представляется, что имеются две причины, объясняющие этот факт. Первая та, что все приведенные измерения σ , выполненные в космических лучах, как правило, проводились при одной энергии частиц, той минимальной энергии, которая соответствовала «порогу» срабатывания данной установки. При этом точность измерения σ , ограниченная прежде всего статистикой регистрируемых частиц, редко достигала $7 \div 10\%$. Вторая причина заключается в том, что для решения вопроса о существовании или отсутствии зависимости σ от E приходилось сравнивать результаты измерений, выполненных на разных установках с применением различных экспериментальных средств. Какие при этом могут возникнуть различия, видно на примере двух работ, выполненных почти идентичными установками: в одном случае с применением годоскопа [18], в другом — с применением искровой камеры [17]. В обеих работах авторы на высоте гор измеряли эффективное сечение неупругого взаимодействия нейтронов космических лучей с энергией $\sim 60 \div 70$ Гэв с ядрами углерода. В работе [17] было получено $\sigma_{n-c} = 256 \pm 16$ мб, а в работе [18] — $\sigma_{n-c} = 200 \pm 24$ мб.

В работе [15], выполненной на высоте ~ 10 км с ионизационными камерами для протонов с энергией $\sim 2 \cdot 10^{11}$ эв¹, было получено $\sigma_{n-c} = 218 \pm 20$ мб. Естественно, что эти и аналогичные по точности данные не могут выявить изменений σ , составляющих $\sim 20\%$, так как при сравнении результатов, полученных разными установками, слабая зависимость σ от E может быть завуалирована разными методическими погрешностями, присущими различным установкам.

При измерениях на ИСЗ «Протон-1» и «Протон-2» остается еще не выясненной роль событий, возникающих при попадании в прибор частиц первичных космических лучей сбоку и с противоположной стороны прибора вследствие вращения спутника. Однако эта причина вряд ли может привести к завышению измеряемых эффективных сечений при высоких энергиях.

Из общих соображений представляется естественным ожидать уменьшение роли этих случаев с ростом энергии первичных частиц. В самом деле, как для ливней, падающих на прибор сбоку (из окружающих прибор элементов конструкции и аппаратуры спутника), так и для ливней, созданных в ионизационном калориметре частицей, входящей в прибор через нижнее основание СЭЗ-14, характерным будет возрастание среднего числа частиц (с ростом E_0), падающих на детектор взаимодействия, и пропорциональные счетчики. При этом вероятность такой комбинации, когда в пропорциональном счетчике и детекторе взаимодействия регистрируется только по одной частице, будет падать с ростом E_0 , т. е. удельный вес «паразитных событий» должен падать с ростом E_0 . Поэтому, если бы «паразитные события» были ответственны за наблюдаемое возрастание σ , тогда следовало бы ожидать большее значение σ при малых энергиях и не рост, а уменьшение σ с возрастанием энергии первичных частиц. Естественно, что для окончательного выяснения влияния этих эффектов желательно проведение измерений новой методикой, позволяющей видеть характер регистрируемых взаимодействий.

Авторы выражают глубокую признательность С. Н. Вернову, Е. Л. Фейнбергу, Л. Б. Окуню, И. Л. Розенталю за интерес к настоящей работе и Р. Н. Басиловой, К. Н. Шарвиной, Л. П. Любимовой, Е. И. Коган-Ласки-

¹ Авторы работы [15] относят измерение σ_{p-c} к средней (по спектру) энергии протонов. Мы их данные пересчитали с учетом правильного определения пороговой энергии $E_{пор}$ [25] для их установки и отнесли σ к «половинной» энергии E , удовлетворяющей условию $N(\geq E_{пор}) = 2N(\geq E)$.

ной, Г. Н. Злотину, И. Н. Кикнадзе, Р. С. Бродской, З. В. Михеевой, Л. Н. Акопян, Н. М. Гордеевой, В. Ф. Новикову, Г. В. Мостяевой, Т. В. Голубинской — за помощь при обработке полученных экспериментальных данных.

Дата поступления
30 января 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. А. Тер-Мартirosян. Сб. «Вопросы физики элементарных частиц», 5. Изд-во АН Арм. ССР, 1966, стр. 479.
2. G. Cocconi. Phys. Rev., 75, 1074, 1949.
3. W. D. Walker, S. P. Walker, K. Greissen. Phys. Rev., 80, 546, 1950.
4. E. P. George, A. C. Jason. Proc. Phys. Soc., A63, 1081, 1950.
5. R. H. Rediker, H. S. Bridge. Phys. Rev., 79, 206, 1950.
6. H. W. Boehmer, H. S. Bridge. Phys. Rev., 85, 863, 1952.
7. W. D. Walker, H. P. Duller, J. D. Sorrels. Phys. Rev., 86, 865, 1952.
8. R. R. Brown. Phys. Rev., 87, 999, 1952.
9. С. А. Азимов, Н. А. Добротин, А. Л. Любимов, Х. П. Рыжкова. Изв. АН СССР. Сер. физ., 17, 1, 1953.
10. M. Cervasi, G. Fidicaro, L. Mezetti. Nuovo Cim., 1, 301, 1955.
11. J. G. Askowith, K. Sitte. Phys. Rev., 97, 159, 1955.
12. К. И. Алексеева, Н. Л. Григоров. Докл. АН СССР, 115, 259, 1957.
13. Н. М. Кочарян, Г. С. Саакян, З. А. Киракосян. Ж. эксперим. и теорет. физ., 35, 1335, 1958.
14. R. W. Williams. Phys. Rev., 98, 1393, 1955.
15. В. И. Рубцов, Ю. А. Смородин, Б. В. Толкачев. Ж. эксперим. и теорет. физ., 44, 462, 1963.
16. Б. В. Толкачев. Сб. «Вопросы физики элементарных частиц», 3. Изд-во АН Арм. ССР, 1963, стр. 272.
17. V. N. Bolotov, M. I. Devishev, L. F. Klimanova, A. P. Shmeleva. Proc. Internat. Conf. Cosmic Rays, 1965, p. 863; А. В. Алакоз, В. Н. Болотов, М. И. Девишев, Л. Ф. Климанова, А. П. Шмелева. Докл. на Всесоюз. конф. по физике космич. лучей, Алма-Ата, октябрь 1966.
18. G. Vozoki, E. Fenutes, G. Christov, N. Ahabalian, B. Betev, S. T. Kavlafov. Proc. Int. Conf. Cosmic Rays, 1965, p. 870.
19. Р. Н. Баилова, Н. Л. Григоров, Г. П. Кахидзе и др. Изв. АН СССР. Сер. физ., 30, 1610, 1966.
20. Н. Л. Григоров, Г. П. Кахидзе, В. Е. Нестеров и др. Наст. номер, стр. 383.
21. Н. Л. Григоров, В. Е. Нестеров, И. Д. Рапопорт, И. А. Савенко, Г. А. Скуридин, А. Ф. Титенков. Наст. номер, стр. 395.
22. В. С. Пантуев, М. Н. Хачатурян. Ж. эксперим. и теорет. физ., 42, 909, 1962.
23. A. Ashmore, G. Cocconi, A. N. Diddens, A. M. Wetherell. Phys. Rev. Lett., 5, 576, 1960.
24. G. Bellettini, G. Cocconi, A. N. Diddens, E. Lillethum, G. Matthiede, J. P. Scanlon, A. M. Wetherell. Nucl. Phys., 79, 609, 1966.
25. Х. П. Бабаян, Г. А. Дулян, В. А. Собиняков, Ч. А. Третьякова, В. Я. Шестоперов. Изв. АН СССР. Сер. физ., 30, 1614, 1966.

УДК 551.521.1

Н. Н. Володичев, Н. Л. Григоров, И. А. Савенко

ИЗУЧЕНИЕ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

Излагаются результаты изучения химического состава и энергетического спектра космических лучей в области зарядов ядер $Z \geq 30$, выполненные с помощью черенковского спектрометра на космических станциях «Протон-1» и «Протон-2».

Изучение химического состава первичного космического излучения имеет важное значение для всей проблемы происхождения космических лучей. Химический состав космических лучей вплоть до заряда $Z = 28$ изучен достаточно хорошо. Данные же о составе космического излучения в области сверхтяжелых ядер с $Z \geq 30$ очень малочисленны и весьма противоречивы.

Первые сведения о регистрации сверхтяжелых ядер в космических лучах относятся к 1948 г., когда с помощью ядерных эмульсий и камеры Вильсона в верхних слоях атмосферы в первичном потоке были обнаружены ядра различных элементов вплоть до $Z \sim 40$ [1, 2]. В работе [2] авторы сообщают, что на одно ядро с зарядом 41 ± 4 было зарегистрировано 28 ядер с $Z \geq 10$. В работе [3] те же авторы приводят данные о регистрации одного ядра с зарядом, значительно превышающим заряд железа, на 161 зарегистрированное ядро с зарядом $Z \geq 10$.

Позднее в работе [4] сообщается о регистрации ядра с зарядом 49 ± 3 методом ядерной эмульсии, поднятой на баллоне на большую высоту. Автор отнес его к ядру олова. Тот же автор в работе [5] сообщает о регистрации ядра с $Z > 34$. Для распространенности таких ядер в космических лучах по отношению к ядрам железа, кобальта и никеля он дает оценку 0,3.

На Международной конференции по космическим лучам в Лондоне в 1965 г. сообщалось о регистрации черенковским счетчиком двух ядер с $Z \sim 40$ на 204 ядра с $Z \geq 20$ [6] и одного ядра с $Z \simeq 32$ на ~ 100 ядер с $Z \geq 20$ методом фотоэмульсий [7].

С появлением искусственных спутников Земли существенно расширились возможности изучения сверхтяжелых ядер космических лучей как за счет существенного увеличения времени наблюдения, так и за счет уменьшения количества вещества перед регистрирующей аппаратурой. Первые эксперименты такого рода описаны в работе [8]. На 3-м ИСЗ с помощью черенковского счетчика было зарегистрировано одно ядро с $Z > 30 \div 40$ за десять суток полета. Авторы дали оценку для отношения потоков ядер с $Z > 30 \div 40$ и с $Z \geq 15$, равную $(1 \div 3) \cdot 10^{-4}$.

Усредненная по работам [2, 3, 5—7] распространенность сверхтяжелых ядер в космических лучах по данным самих авторов и пересчитанная к ядрам с $Z \geq 20$ [9] составляет $\sim 10^{-2}$. Выпадает лишь результат работы [8], по которой оценка распространенности сверхтяжелых ядер в космических лучах на два порядка ниже.

Представляет интерес сопоставление полученных данных по распространенности сверхтяжелых ядер в космических лучах с их распростра-