

А.Н. Чарахчьяном была удостоена Ленинской премии (1976 г.).

Примерно 15–20 лет назад стало ясным, что КЛ являются необходимой составляющей во всех электрических явлениях, наблюдаемых в атмосфере Земли [14]. КЛ теряют в атмосфере большую часть энергии, которая идёт на ионизацию и возбуждение атомов воздуха. КЛ создают ионы практически на всех высотах атмосферы — от уровня Земли до ≈ 35 км. Эти ионы обеспечивают работу глобальной электрической цепи, участвуют в образовании грозных облаков. Высокоэнергичные космические частицы с энергиями более 10^{14} эВ образуют ливни в земной атмосфере, состоящие из множества вторичных заряженных частиц. Во время грозы по одному из ионизованных треков этих частиц распространяются молниевые разряды.

Через процесс образования заряженных центров конденсации (ионы, рождённые КЛ, прилипают к нейтральным центрам конденсации) КЛ влияют на рост облачности и грозной облачности, что, в свою очередь, сказывается на уровне осадков. Наблюдается уменьшение уровня осадков во время резких падений потоков КЛ (так называемых форбуш-понижений) и увеличение осадков после прихода на Землю дополнительных потоков частиц, ускоренных в мощных солнечных вспышках [14].

С 2009 г. на ускорителе в ЦЕРНе с участием сотрудников Долгопрудненской научной станции ФИАН проводится международный эксперимент "Cloud", главная цель которого заключается в установлении физических механизмов влияния заряженных частиц на атмосферные характеристики.

6. Будущее регулярных наблюдений космических лучей в земной атмосфере

Несмотря на финансовые и кадровые трудности, которые переживает наша наука за последние примерно 20 лет, регулярные наблюдения потоков заряженных частиц в атмосфере продолжают осуществляться благодаря грантам РФФИ и программам Президиума РАН.

Безусловно, необходимо проводить эти измерения и исследовать модуляционные эффекты в космических лучах в период текущего и последующих солнечных циклов. С большой вероятностью, ближайшие циклы солнечной активности будут аномально низкими. Это позволит разработать практическую модель, связывающую процессы на Солнце и в космических лучах. Ценность этих исследований состоит в обоснованном прогнозе космической погоды в солнечной системе. Такой прогноз необходим для обеспечения радиационной безопасности длительных космических полётов.

Новым направлением, в котором КЛ играют определяющую роль, является изучение их связи с электрическими явлениями, наблюдаемыми в земной атмосфере. КЛ ответственны за все наблюдаемые атмосферные электрические явления. В последние годы много работ посвящено исследованию влияния потоков КЛ на атмосферные процессы и климат Земли.

Сотрудники, занятые в эксперименте по мониторингу космических лучей в атмосфере Земли, приложат все усилия для получения новых экспериментальных данных и новых научных результатов в ближайшие десятилетия.

7. Заключение

Сергей Николаевич Вернов обладал уникальной интуицией в выборе перспективных направлений исследований в области физики КЛ. Одной из самых удачных и плодотворных идей, выдвинутых им в далёкие 30-е годы прошлого века, было исследование КЛ в атмосфере Земли. Предложенный им метод частого регулярного стратосферного зондирования принёс фундаментальные знания о модуляционных эффектах КЛ, их связи с солнечной активностью и о роли КЛ в атмосферных процессах. Эти исследования до сих пор успешно продолжаются, дают новые результаты и имеют большие перспективы на будущее.

Список литературы

1. Вернов С Н, в сб. *Труды Всесоюз. конф. по изучению стратосферы, 31 марта–6 апреля 1934 г.* (Л.-М.: Изд-во АН СССР, 1935) с. 423
2. Vernoff S *Nature* **135** 1072 (1935)
3. Вернов С Н *ДАН СССР* **14** 263 (1937)
4. Вернов С Н *Изв. АН СССР* (5/6) 738 (1938)
5. Вернов С Н *ДАН СССР* **23** 141 (1939)
6. Вернов С Н, Миронов А В *ДАН СССР* **23** 138 (1939)
7. Вернов С Н и др. *ДАН СССР* **68** 253 (1949)
8. Зацепин Г Т *ДАН СССР* **57** 993 (1949)
9. Базилевская Г А, Стожков Ю И, в сб. *Академик Сергей Николаевич Вернов: к 100-летию со дня рождения* (М.: Изд-во МГУ, 2010) с. 315
10. Шафер Г В, Шафер Ю Г *Прецизионные наблюдения космических лучей в Якутске* (Новосибирск: Наука, 1984) 733 с.
11. Чарахчьян А Н *УФН XXXIII* **83** 35 (1964) [Charakhch'yan A N *Sov. Phys. Usp.* **7** 358 (1964)]
12. Стожков Ю И и др. "Потоки космических лучей в максимуме кривой поглощения в атмосфере и на границе атмосферы (1957–2007)", Препринт № 14 (М.: ФИАН, 2007)
13. Stozhkov Y I et al. *Adv. Space Res.* **44** 1124 (2009)
14. Stozhkov Y I *J. Phys. G Nucl. Part. Phys.* **29** 913 (2003)

PACS numbers: **01.65.+g**, 94.20.wq, 96.50.S–
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201102m.0223

С.Н. Вернов и исследования космических лучей в Якутии

Е.Г. Бережко, Г.Ф. Крымский

Скоро будет отмечаться 100-летие с момента открытия космических лучей. Многие направления физики космических лучей связаны с именем Сергея Николаевича Вернова, его коллег, учеников и последователей. Когда С.Н. Вернов начинал исследования, прошло всего 20 лет после открытия космических лучей, о которых тогда мало что было известно: было не ясно, являются ли они заряженными частицами, какова масса и заряд этих частиц, где и как они возникают. В своих пионерских работах С.Н. Вернов смог ответить на некоторые из этих вопросов, а на другие вопросы искали, находили и продолжают находить ответы его многочисленные коллеги и последователи, составляющие обширную научную школу С.Н. Вернова.

Е.Г. Бережко, Г.Ф. Крымский. Институт космофизических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, РФ
E-mail: berezhko@ikfia.ysn.ru, krymsky@ikfia.ysn.ru

Формированию этой школы, поддержке соответствующих исследований в разных регионах СССР и за его пределами Сергей Николаевич уделял много времени и щедро расходовал на это свою колоссальную энергию. Мы считаем своим долгом осветить некоторую часть этой огромной работы: становление исследований в области физики космических лучей в одном из самых удалённых регионов страны — в Якутии.

Начало этим работам было положено в довоенный период благодаря энтузиазму молодого выпускника Томского университета Ю.Г. Шафера. Ю.Г. Шафер начинает в 1938 г. изучение космических лучей на кафедре физики в Якутском педагогическом институте. Вместе с директором института он направляет в ФИАН адресованное Д.В. Скобельцыну письмо, в котором сообщается, что институт утвердил план научно-исследовательских работ на 1939 г. по регистрации космического излучения и сопоставлению данных космической радиации с барометрическим, температурным, геомагнитными факторами, интенсивностью солнечной радиации и явлениями северных сияний на широтах Якутской республики. В письме также отмечалось, что ранее было получено предварительное согласие Д.В. Скобельцына и С.Н. Вернова "путём письменной связи консультировать эту работу и оказывать ей всемерную поддержку". Авторы просили Д.В. Скобельцына "в случае необходимости защитить своим авторитетом постановку этой темы в плане научной работы института перед Наркомпросом РСФСР". С этого момента в течение многих последующих десятилетий С.Н. Вернов являлся научным руководителем работ, ведущихся по этой тематике в Якутске.

В 1947 г. была создана Якутская научно-исследовательская база АН СССР. Председатель Совета филиалов и баз АН СССР академик В.Г. Волгин писал президенту АН СССР С.И. Вавилову: "При определении структуры Якутской базы Академии наук СССР были учтены ходатайства Физического института АН СССР им. Лебедева, Института земного магнетизма Главного управления Гидрометслужбы при Совете Министров СССР, Второго научно-исследовательского института физики МГУ и представителей якутских научных учреждений о включении в программу работ Базы исследований в области космических лучей и организации при Якутской базе АН СССР Станции космических лучей". Для ведения этой работы был рекомендован вернувшийся с фронта Ю.Г. Шафер. Постановлением Президиума АН СССР от 25 декабря 1947 г. был утверждён состав Учёного совета Якутской базы в количестве 30 человек. В него вошёл доктор физико-математических наук С.Н. Вернов.

В том же 1947 г. академик В.Г. Волгин и директор Научно-исследовательского института земного магнетизма (теперь Институт земного магнетизма и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН)) Н.В. Пушков обратились к академику С.И. Вавилову с обоснованием необходимости создания на территории СССР сети станций непрерывной регистрации космических лучей, оснащённых прецизионной аппаратурой, которую предполагалось закупить в США. Поскольку попытки закупить эту аппаратуру — ионизационные камеры — не дали результата, было решено разработать отечественные приборы. Ю.Г. Шаферу, получившему соответствующее задание, была создана

возможность организовать её на базе лаборатории космических лучей Научно-исследовательского института ядерной физики (НИИЯФ) МГУ. Работа с самого начала пользовалась поддержкой С.Н. Вернова. К ней были привлечены конструкторские и технологические силы, имевшиеся в НИИЯФ. Эту часть работы возглавил заведующий мастерскими А.С. Муратов. Н.Л. Григоров, имевший опыт разработки и изготовления высокоточных крутильных электрометров оригинальной конструкции, также был привлечён к этой работе. Вот что он написал в воспоминаниях: "Опытный образец (прибор С-2) был разработан и изготовлен в течение 1947–1948 гг. Он представлял собой сферическую стальную камеру объёмом в 20 л, наполненную химически чистым аргонном. Внутри основной камеры находилась компенсационная камера, в которой ионизационный ток создавался β -частицами радиоактивного препарата. Компенсационный ток по величине равен току, создаваемому космическими лучами в основной камере, но имеет противоположный знак. Поэтому прибор измерял отклонения ионизационного тока, созданного космическими лучами, от некоторого среднего значения, компенсируемого током компенсационной камеры. Этот так называемый нуль-метод обеспечивал высокую чувствительность прибора".

Опытный образец ионизационной камеры в 1948 г. прошёл успешные испытания в Якутске. За разработку и создание прибора коллективу в составе Ю.Г. Шафера, Н.Л. Григорова и А.С. Муратова в 1950 г. была присуждена Сталинская премия.

На базе опытного образца были разработаны ионизационные камеры АСК-1 и АСК-2 объёмом 900 и 50 л. В течение 1950–1952 гг. на заводе "Физприбор" были изготовлены первые серии этих приборов и ими были оснащены девять советских станций космических лучей.

Прецизионные регистраторы на некоторых станциях проработали более 30 лет, а прибор АСК-1, установленный в Якутске в 1953 г., продолжает функционировать и сейчас! Сеть станций, помимо её научного значения, сыграла роль "катализатора", способствовавшего запуску научных исследований на обширной территории СССР.

Уже в первый период работы новой аппаратуры в Якутске удалось детально проверить теорию метеорологических вариаций интенсивности космических лучей, созданную Е.Л. Фейнбергом и Л.И. Дорманом. Резко континентальный климат Якутии способствовал изучению годовых вариаций, предсказываемых этой теорией. Причина этих вариаций состоит в том, что с повышением температуры атмосферы её вертикальная протяжённость увеличивается и мюоны, образованные в верхних слоях атмосферы в столкновениях космических лучей с атомами атмосферы, на пути к прибору испытывают более частые распады, что уменьшает их наблюдаемую интенсивность.

Вариации интенсивности космических лучей, измеряемые ионизационной камерой, наблюдались во время прохождения циклонов и во время магнитных бурь. Наблюдались также периодические вариации, имеющие период солнечных суток. Высказывалось предположение, что последние также связаны с колебаниями температуры атмосферы. Однако А.И. Кузьмин, используя данные температурного зондирования в Якутске и применив теорию метеоэффектов, показал, что введение

температурных поправок приводит не к уменьшению, а к увеличению амплитуды суточных вариаций. Было доказано, что прибор наблюдает анизотропию космических лучей [1].

Исследованию характеристик этого явления, раскрытию его физической природы и изучению следствий, вытекающих из этих результатов, были посвящены экспериментальные и теоретические работы А.И. Кузьмина и его учеников в течение многих лет. Для этого были сконструированы мюонные телескопы, состоящие из газоразрядных счётчиков Гейгера–Мюллера. Счётчики помещались в лотки по несколько штук, а лотки располагались в три горизонтальных ряда, один над другим. Система совпадений отбирала одновременные срабатывания счётчиков во всех трёх рядах. При этом лотки, в которых схема отбирала совпадения, комбинировались таким образом, чтобы отбирать события прохождения мюона с севера или с юга (с востока–запада). Каждая такая комбинация лотков именовалась мюонным телескопом. Соответственно телескопы, регистрирующие мюоны из северного и южного направлений, образовывали систему "скрещенных телескопов". Скрещенные телескопы были установлены на поверхности земли и в шахте, в штреках на глубинах 7, 20 и 60 м водного эквивалента (реальная глубина примерно в 1,8 раза меньше). Якутский подземный комплекс скрещенных телескопов явился инструментом, с помощью которого удалось очень точно определить характеристики анизотропии космических лучей и её энергетический спектр, а также спектры других вариаций космических лучей.

Комплекс скрещенных телескопов позволил выделить суточные вариации интенсивности космических лучей, обусловленные анизотропией их углового распределения в околоземном космическом пространстве. Эти вариации, в отличие от вариаций любой другой природы, в том числе метеорологического происхождения, различались в разных телескопах по амплитуде и фазе. Зная геометрию телескопов, можно было определить точные параметры анизотропии. Исследования анизотропии и её изменений со временем позволили установить её физическую природу. В среднем наблюдаемая анизотропия обусловлена избытком космических лучей, приходящих на вечернюю сторону Земли. Её природа обусловлена переносом космических лучей солнечным ветром и вмороженным в него межпланетным магнитным полем [2]. Этот перенос создаёт направленное движение частиц космических лучей радиально от Солнца. Дефицит космических лучей во внутренней Солнечной системе, возникающий вследствие этого, компенсируется их диффузией внутрь. Если бы межпланетное магнитное поле было полностью неупорядоченным (турбулентным), то диффузия внутрь создавала бы также радиально направленное движение космических лучей, но только в сторону Солнца. В итоге в стационарных условиях не наблюдалось бы никакой анизотропии. Однако межпланетное поле имеет регулярную компоненту, которая вытянута в радиальном направлении и закручена вращением Солнца в спираль Архимеда. Поэтому диффузия космических лучей происходит преимущественно под углом к радиальному направлению. Диффузия в радиальном направлении уравнивается конвективным выносом космических лучей солнечным ветром, тангенциальная же компонента диффузионного потока, направленная

перпендикулярно линии Солнце–Земля, оказывается нескомпенсированной. Подсчёт величины этого эффекта показал, однако, что теория даёт величину на 15–20 % меньшую, чем наблюдается в эксперименте.

Разрешение парадокса связано с адиабатическим изменением энергии быстрых заряженных частиц, которое они испытывают, распространяясь в рассеивающей среде: в расширяющейся среде энергия частиц уменьшается, а в случае сжимающейся среды — увеличивается.

Плазма солнечного ветра повсеместно испытывает расширение. Поэтому внутри орбиты Земли происходят потери энергии частицами космических лучей, что обуславливает их дополнительный дефицит. Компенсация этого дефицита дополнительной диффузией устраняет парадокс. Разрешение парадокса привело к установлению правильного уравнения переноса космических лучей [2] для их функции распределения $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \nabla(\kappa \nabla f) - \mathbf{w} \nabla f + \nabla \mathbf{w} \frac{\mathbf{p}}{3} \frac{\partial f}{\partial p}.$$

Здесь t — время, $\mathbf{r}$ — радиус-вектор, $\mathbf{p}$ — импульс частиц космических лучей. Первый член в правой части описывает пространственную диффузию космических лучей с тензором диффузии κ ; второй — конвективный перенос, обусловленный движением рассеивающей среды со скоростью $\mathbf{w}$; третий член описывает адиабатическое изменение энергии космических лучей в сжимаемой среде. Несколько позднее это уравнение было выведено в работе Е. Паркера [3], а затем на основе последовательного кинетического подхода — А.З. Долгиновым и И.Н. Топтыгиным [4].

Уравнение переноса, как оказалось, способно описывать процессы ускорения частиц в тех средах, в которых вместо расширения имеет место сжатие. Такая ситуация реализуется на фронтах ударных волн, где реализуются условия для наиболее эффективного ускорения космических лучей — процесса регулярного ускорения. Когда была решена задача об ускорении заряженных частиц сильной ударной волной [5], Сергей Николаевич Вернов высоко оценил полученный результат и представил статью в *Доклады АН СССР*. Следует упомянуть о том, что у С.Н. Вернова были свои эксперты, на мнение которых он мог опираться. Чаще всего в их роли выступали сотрудники НИИЯФ МГУ. В данном случае его внимание к полученному решению привлек Борис Аркадьевич Тверской. Обнаруженный механизм регулярного ускорения имеет довольно широкие приложения в астрофизике космических лучей (см., например, обзор [6]). Развитие теории регулярного ускорения космических лучей в остатках сверхновых, в особенности нелинейной теории, последовательно учитывающей обратное воздействие ускоренных частиц на структуру и динамику ударной волны [7], даёт веские основания полагать, что наблюдаемый спектр космических лучей с энергией вплоть до 10^{17} эВ формируется в галактических остатках сверхновых (см. обзоры [8, 9]). Важно отметить, что нелинейная теория способна детально предсказывать свойства нетеплового излучения остатков сверхновых, порождаемого ускоренными в остатках космическими лучами. Сравнивая предсказания теории для индивидуальных остатков сверхновых с измерениями, которые ведутся в широком диапазоне длин волн — от радиодиапазона до гамма-диапазона включительно, можно получать решающие подтверждения относительно как

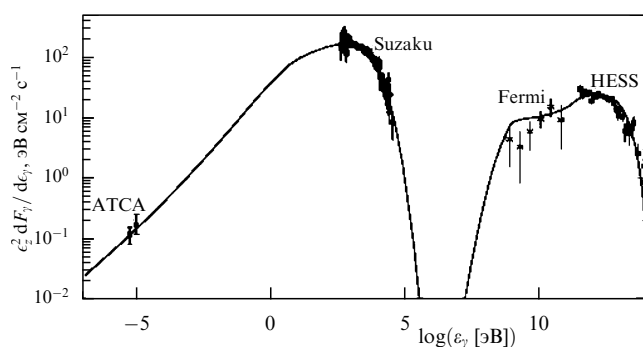


Рис. 1. Поток энергии нетеплового излучения остатка сверхновой RXJ1713.7-3946 как функция энергии фотонов, рассчитанный в рамках кинетической нелинейной теории ускорения космических лучей [10]. Приведены также результаты измерений радиоизлучения (телескоп ATCA (Australia Telescope Compact Array)), рентгеновского (космическая обсерватория "Suzaku") и ТэВ-ного излучения (система гамма-телескопов HESS (HighEnergy Stereoscopic System)). Представлены также измерения ГэВ-ного излучения, полученные космической гамма-обсерваторией им. Ферми в 2009 г.

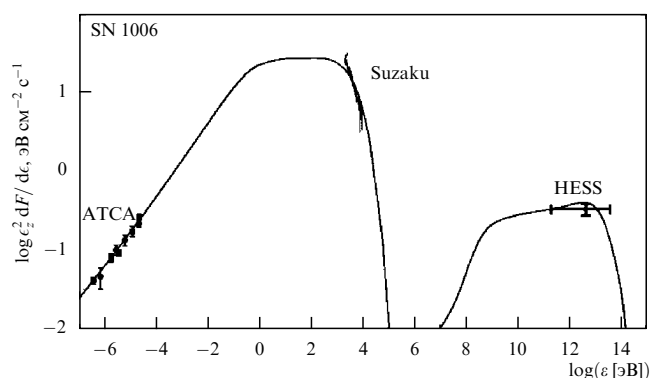


Рис. 2. Поток энергии нетеплового излучения остатка сверхновой SN 1006 как функция энергии фотонов, рассчитанный в рамках кинетической нелинейной теории ускорения космических лучей [11]. Приведены также результаты измерений радиоизлучения (радиотелескоп ATCA), рентгеновского (космическая обсерватория "Suzaku") и ТэВ-ного излучения (система HESS).

природы нетеплового излучения остатков, так и происхождения наблюдаемого спектра космических лучей. В качестве примера на рис. 1 и 2 приведены результаты расчётов потока энергии нетеплового излучения остатков сверхновых RXJ1317.7-3946 и SN 1006 как функции энергии фотонов совместно с данными измерений. Как видно из рисунков, результаты теории хорошо согласуются с экспериментальными данными. Это даёт основания утверждать, что в указанных остатках с высокой эффективностью происходит генерация космических лучей, согласующаяся с представлением о том, что галактические остатки сверхновых являются источником наблюдаемых космических лучей с энергией вплоть до 10^{17} эВ.

Регистрация космических лучей камерой АСК-1 в Якутске привела к зарождению исследований в ещё одном важном направлении. Ионизационный ток в камере, регистрируемый электрометром камеры, время от времени испытывает резкие (импульсные) усиления. В записи они выглядят как разрывы — "толчки". При изучении вариаций космических лучей толчки являются

помехой и устраняются при обработке. Сотрудник Института космофизических исследований и астрономии (ИКФИА) при Якутском филиале АН СССР Д.Д. Красильников обратил на них внимание и занялся изучением их природы. Спектр толчков по амплитуде оказался степенным с показателем, близким к показателю энергетического спектра космических лучей. Природа этих толчков связана с размножением в оболочке камеры продуктов взаимодействия ядерно-активных частиц (в основном пионов), а также с электромагнитными каскадами, вызванными тормозными фотонами от мюонов высоких энергий. Посредством особых ухищрений Д.Д. Красильников добился избавления от толчков ядерно-активной природы и исследовал мюонные толчки. Интерес к каскадным процессам побудил его к созданию малой установки широких атмосферных ливней (ШАЛ), состоящей всего из трёх лотков со счётчиками Гейгера — Мюллера. Со временем установка была расширена и стала включать в себя пять павильонов на площади около 1 га. Аккуратная обработка данных позволила найти верхний предел анизотропии частиц с энергией 10^{15} эВ с точностью не хуже 0,1 %, что было в то время (1967 г.) лучшим по точности результатом.

Типичные установки ШАЛ в 1950-е годы стали намного информативнее и больше по охватываемой площади. Наиболее крупными установками в СССР являлись установка НИИЯФ МГУ, которой руководил Г.Б. Христиансен, и Тянь-Шаньская установка ФИАНа, которой руководил С.И. Никольский. За рубежом в то время уже были построены установки ШАЛ площадью более чем 10 км². Уже в 1963 г. Сергей Николаевич поставил задачу проектирования установки ШАЛ, не уступающей по всем основным параметрам лучшим зарубежным аналогам. Работа по проектированию велась под его общим руководством. В ней активно участвовали С.И. Никольский и Г.Б. Христиансен. Работа резко активизировалась после того, как было открыто реликтовое излучение и было предсказано так называемое чернотельное обрезание спектра космических лучей при энергии 6×10^{19} эВ, неминуемо возникающее как результат энергетических потерь космических лучей вследствие их взаимодействия с фотонами реликтового излучения, если космические лучи предельно высоких энергий имеют внегалактическое происхождение. Местом создания установки был определён Якутск. Не последним аргументом в пользу такого выбора был опыт, накопленный в ИКФИА, и наличие в нём квалифицированных кадров. Как это часто бывает, принятие решения о финансировании работ не было лёгким и потребовало значительных усилий, прежде всего, со стороны С.Н. Вернова. Достаточно упомянуть, что первая реакция М.А. Лаврентьева, возглавлявшего Сибирское отделение АН СССР, оказалась не очень благоприятной. Положительного решения о сооружении Якутской установки ШАЛ удалось добиться во многом благодаря активным усилиям С.Н. Вернова. С.Н. Вернов неоднократно встречался с руководителями СО АН СССР. Им было организовано широкое обсуждение этой проблемы научной общественностью. В связи с этим достаточно привести выдержки из письма В.Л. Гинзбурга, адресованного вице-президенту АН СССР Б.П. Константинову: "Глубокоуважаемый Борис Павлович! Как мне сообщили, Вы хотели бы знать мое мнение по вопросу о целесообразности постройки большой установки для

исследования широких атмосферных ливней в г. Якутске. Мое отношение к этому проекту самое положительное ... Наконец, по существу, Якутская установка сможет дать сведения о спектре в интервале $3 \times 10^{17} - 10^{20}$ эВ, где почти нет данных и где можно ожидать существенного вклада метagalacticкой компоненты ... Итак, создание этой установки — это "чистое дело", важно только опять не опоздать и запустить её как можно скорее, а также иметь план расширения с расчётом до 10^{21} эВ. С искренним уважением Ваш В.Л. Гинзбург. 29 января 1968 г."

Усилия С.Н. Вернова увенчались успехом: 11 апреля 1968 г. вышло постановление Госкомитета по науке и технике при Совете Министров СССР о сооружении Якутской установки ШАЛ. В нём было сформулировано задание институту, выделены штаты и средства для капитального строительства. Более 200 организаций в той или иной мере были привлечены к созданию установки. С.Н. Вернов в ряде случаев лично принимал участие во встречах с руководством этих организаций.

Якутская установка ШАЛ была принята в эксплуатацию 14 апреля 1973 г. Установка представляет собой систему коррелированно работающих станций наблюдения, размещённых на площади 20 км² (к настоящему времени площадь уменьшена до 12 км²). Регистрация ШАЛ имеет целью определить основные характеристики космических лучей с энергиями более 10^{15} эВ: энергетический спектр, анизотропию и массовый состав. Особенностью Якутской установки ШАЛ является то, что она оснащена детекторами всех основных компонент ШАЛ: электронно-фотонной и мюонной компонент и черенковского света.

Регистрация черенковского света, благодаря тому что это излучение интегрируется по всей глубине атмосферы, даёт возможность довольно точно оценить суммарную энергию электронов, образованных в ливне, и, следовательно, получить надёжную оценку энергии первичной частицы. Эти измерения также позволяют прокалибровать электронно-фотонный канал регистрации.

Поскольку соотношение числа мюонов и электронов в ШАЛ при той же энергии частицы, породившей ШАЛ, чувствительно к массе частицы, регистрация мюонов позволяет оценивать массовый состав космических лучей.

За почти 40-летний период эксплуатации установка модернизировалась. Очередная модернизация производится и в настоящий период. Руководители работ на Якутской установке ШАЛ Н.Н. Ефимов и Д.Д. Красильников в группе авторов в 1982 г. были удостоены звания Лауреатов Ленинской премии.

Одной из основных характеристик космических лучей, изучаемых с помощью установок ШАЛ, является их энергетический спектр в области энергий более 10^{15} эВ. К концу XX в. был накоплен большой объём экспериментальных данных о спектре космических лучей сверхвысоких энергий, позволивший с уверенностью говорить о наличии ряда особенностей в спектре в области энергий $10^{15} - 10^{19}$ эВ. Наряду с установленным в 1958 г. сотрудниками НИИЯФ МГУ под руководством С.Н. Вернова изломом (теперь его принято называть коленом или первым коленом) — укрупнением спектра космических лучей при энергии 3×10^{15} эВ, были найдены другие особенности спектра: второе колено при энергии 5×10^{17} эВ и провал при энергии 6×10^{18} эВ (рис. 3). При

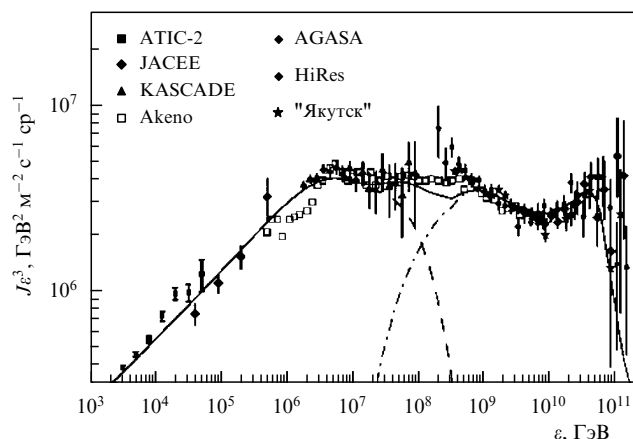


Рис. 3. Интенсивность космических лучей как функция их энергии [13]. Штриховой кривой показан спектр космических лучей, произведённых в галактических остатках сверхновых; штрихпунктирной — спектр от внегалактических источников; сплошная кривая представляет собой их сумму. Приведены результаты измерений, выполненные на баллонах (ATIC-2 (Advanced Thin Ionization Calorimeter), JACEE (Japanese-American Collaborative Emulsion Experiment)) и наземными установками ШАЛ KASCADE (Karlsruhe Shower Core and Array DEtector), "Akeno", AGASA, HiRes и Якутской установкой ШАЛ ("Якутск").

этом данные разных установок ШАЛ (Fly's Eye и HiRes в США, AGASA (Akeno Giant Air Shower Array) в Японии и Якутская установка) хорошо согласовывались между собой по форме измеренного спектра космических лучей, но различались по амплитуде и энергетическому положению особенностей спектра. Как неоднократно предполагалось (см., например, [12]), эти различия практически полностью устраняются, если определяемую в каждом эксперименте энергию ε индивидуальной частицы заменить величиной $\lambda\varepsilon$, где параметр λ лежит в пределах $0,8 < \lambda < 1,2$ (см. рис. 3, на котором приведены данные измерений на трёх упомянутых установках ШАЛ). Такая процедура вполне уместна, если учесть тот факт, что точность определения энергии космических лучей в таких экспериментах около 20 %.

До 2007 г. измерения не позволяли дать однозначного заключения о существовании чернотельного обрезания спектра космических лучей. Как видно из рис. 3, данные Якутской установки ШАЛ не противоречили наличию обрезания. Однако ввиду ограниченной статистики измерений при энергии $\varepsilon > 4 \times 10^{19}$ эВ сделать обоснованное заключение на основе этих измерений затруднительно. В то же время измерения на установке AGASA, более чем на порядок превосходившей Якутскую установку ШАЛ по светосиле, довольно определённо свидетельствовали об отсутствии какого-либо укрупнения спектра космических лучей при энергиях $\varepsilon < 10^{20}$ эВ. Только в 2007 г. в экспериментах HiRes и "Auger" с достаточной обоснованностью было установлено существование чернотельного обрезания. Этот факт достаточно определённо свидетельствует о том, что космические лучи максимально высоких энергий рождаются во внегалактических источниках. На повестке дня стоит проблема отыскания этих источников, установления спектра внегалактической компоненты космических лучей и экспериментального определения области перехода между двумя компонентами в наблюдаемом спектре космических лучей.

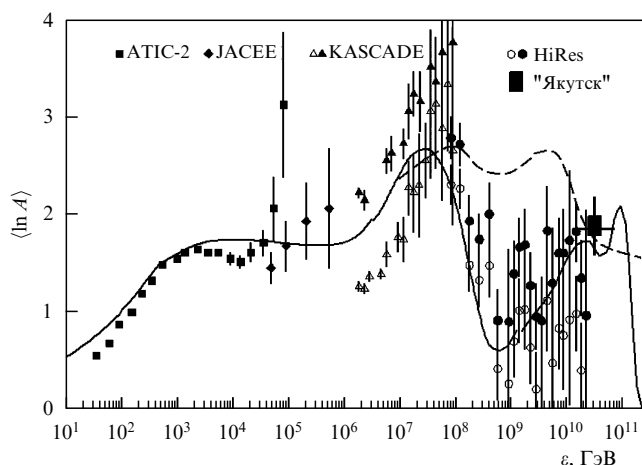


Рис. 4. Средний логарифм атомного числа космических лучей как функция энергии [16]. Сплошная и штриховая кривые отвечают двум разным сценариям формирования спектра космических лучей в области энергий $\varepsilon > 10^{17}$ эВ. Приведены результаты измерений, выполненные на баллонах (ATIC-2, JACEE) и наземными установками ШАЛ: KASCADE, HiRes и Якутской установкой [17] ("Якутск").

По соображениям энергетического характера наиболее вероятными внегалактическими источниками космических лучей предельно высоких энергий являются активные галактические ядра (см., например, [12]). В пользу этого свидетельствует корреляция направлений прихода космических лучей с энергиями $\varepsilon > 3 \times 10^{19}$ эВ с угловым местоположением активных галактических ядер, установленная в эксперименте "Auger" [14] и по измерениям на Якутской установке ШАЛ [15].

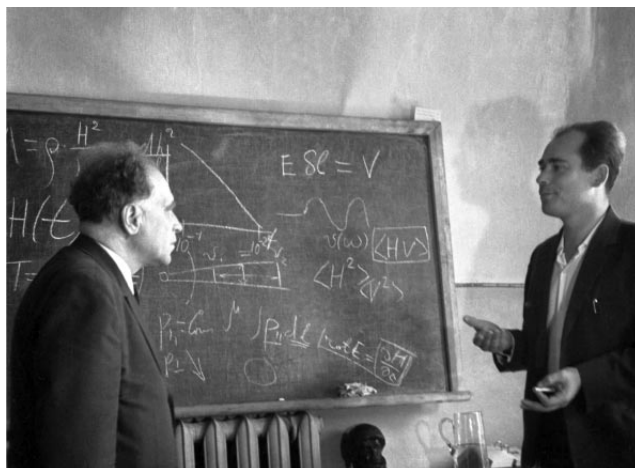
Существует два различных сценария формирования суммарного спектра космических лучей. В первом из них внегалактическая компонента преобладает при энергиях $\varepsilon > 2 \times 10^{17}$ эВ (см. рис. 3), тогда как во втором это происходит только при $\varepsilon > 10^{19}$ эВ. В последнем случае галактическая компонента доминирует в наблюдаемом спектре космических лучей при энергиях вплоть до $\varepsilon \approx 3 \times 10^{18}$ эВ. Остаётся неясным, способны ли галактические остатки сверхновых ускорять частицы до столь высокой энергии или помимо сверхновых в Галактике работает дополнительный источник (или механизм доускорения).

Важным является то обстоятельство, что двум упомянутым выше сценариям соответствует существенно разный массовый состав космических лучей в области энергий $\varepsilon > 10^{17}$ эВ (см. рис. 4, на котором приведены результаты расчётов среднего логарифма атомного числа космических лучей как функции их энергии для двух сценариев). Данные лучше согласуются с первым сценарием. Однако достаточно большая их неопределённость не позволяет сделать окончательного заключения на этот счёт. Для более надёжного определения массового состава космических лучей Якутская установка ШАЛ дооснащается (модернизируется) дифференциальными детекторами черенковского света, способными раздельно регистрировать черенковское излучение, приходящее с разных высот над уровнем наблюдения.

С момента организации Института космических исследований и астрономии (ИКФИ) СО РАН в 1962 г. его деятельность находилась в сфере внимания Сергея Николаевича Вернова. Возглавляемый им Научный



С.Н. Вернов (в центре) с якутскими космофизиками: слева от С.Н. Вернова — А.И. Кузьмин, справа — Г.В. Шафер и Ю.Г. Шафер (Якутск, 1967 г.).



С.Н. Вернов (слева) с Г.Ф. Крымским на семинаре в ИКФИА (Якутск, 1967 г.).

совет АН СССР по космическим лучам регулярно организовывал Всесоюзные конференции по физике космических лучей в разных городах нашей страны.

В 1967 г. силами ИКФИА была проведена очередная конференция в Академгородке под Новосибирском. С.Н. Вернов во время конференций организовал рабочее совещание в Институте ядерной физики. Перед началом конференции он посетил ИКФИА и на месте провёл обсуждение вопросов, связанных с созданием Якутской установки ШАЛ.

В Якутске Всесоюзные конференции по космическим лучам были проведены в 1962 г., 1977 г. и 1984 г. В 1972 г. на базе уже созданной установки ШАЛ был организован симпозиум, в работе которого приняли участие специалисты из научных центров СССР и стран Восточной Европы. Был рассмотрен широкий круг вопросов физики космических лучей, но особый акцент был сделан на космических лучах сверхвысокой энергии. Сергей Николаевич счёл необходимым сделать научный доклад в Якутском обкоме КПСС, на котором присутствовали все руководители республиканского уровня. Он посетил также практически созданную к тому моменту Якутскую установку ШАЛ.



С.Н. Вернов (на первом плане) с якутскими космофизиками (слева направо — А.И. Кузьмин, И.Е. Слепцов, А.С. Рымарь, В.А. Орлов, Д.Д. Красильников) на территории установки ШАЛ (Якутск, 1972 г.).

В 1976 г. Президиум СО АН в очередной раз рассматривал деятельность ИКФИА СО АН СССР. С.Н. Вернов, принимавший участие в заседании, сделал подробный доклад и дал высокую оценку научным достижениям института. Под эгидой Международного союза чистой и прикладной физики (IUPAP) раз в два года организуются конференции по космическим лучам в разных странах. Сергей Николаевич лично формировал советскую делегацию на каждую из этих конференций. С 1959 г. во всех конференциях принимали участие представители из Якутска.

Сергей Николаевич всячески способствовал установлению связей с нашими иностранными коллегами. В 1981 г. один из нас (Г.Ф.К.) получил приглашение из

Института ядерной физики в г. Гейдельберге (ФРГ) для работы там в качестве гостя. Сергей Николаевич оказал поддержку, и визит состоялся. В последующие годы сотрудничество между двумя институтами активизировалось, и оно продолжается на регулярной основе до сих пор.

В завершение следует сказать, что становление и развитие фундаментальных исследований в области физики космических лучей в Якутии состоялось во многом благодаря активной поддержке и участию С.Н. Вернова и его ближайших соратников и учеников.

Список литературы

1. Кузьмин А И *ЖЭТФ* **28** 614 (1955) [Kuz'min A I *Sov. Phys. JETP* **1** 560 (1955)]
2. Крымский Г Ф *Геомагнетизм и астрономия* **4** 977 (1964)
3. Parker E N *Planet. Space Sci.* **13** 9 (1965)
4. Долгинов А З, Топтыгин И Н *ЖЭТФ* **51** 1771 (1966) [Dolginov A Z, Toptygin I N *Sov. Phys. JETP* **24** 1195 (1967)]
5. Крымский Г Ф *ДАН СССР* **234** 1306 (1977) [Krymskii G F *Sov. Phys. Dokl.* **22** 327 (1977)]
6. Бережко Е Г, Крымский Г Ф *УФН* **154** 49 (1988) [Berezhko E G, Krymskii G F *Sov. Phys. Usp.* **31** 27 (1988)]
7. Бережко Е Г, Елшин В К, Ксенофонов Л Т *ЖЭТФ* **109** 3 (1996) [Berezhko E G, Elshin V K, Ksenofontov L T *JETP* **82** 1 (1996)]
8. Berezhko E G *Adv. Space Sci.* **35** 1031 (2005)
9. Berezhko E G *Adv. Space Sci.* **41** 429 (2008)
10. Berezhko E G, Völk H J *Astron. Astrophys.* **451** 981 (2006)
11. Berezhko E G, Ksenofontov L T, Völk H J *Astron. Astrophys.* **505** 169 (2009)
12. Berezhinsky V, Gazizov A, Grigorieva S *Phys. Rev. D* **74** 043005 (2006)
13. Berezhko E G, Völk H J *Astrophys. J.* **661** L175 (2007)
14. Abraham J et al. (The Pierre Auger Collab.) *Science* **318** 938 (2007)
15. Иванов А А *Письма в ЖЭТФ* **87** 215 (2008) [Ivanov A A *JETP Lett.* **87** 185 (2008)]
16. Berezhko E G *Astrophys. J.* **698** L138 (2009)
17. Glushkov A V et al. *Письма в ЖЭТФ* **87** 220 (2008) [*JETP Lett.* **87** 190 (2008)]