

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКИССЛЕДОВАНИЕ КОРПУСКУЛЯРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА
С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ

В. И. Красовский, Ю. М. Кушнир и Г. А. Бордовский

Проблема корпускулярного излучения Солнца и его воздействия на верхнюю атмосферу Земли весьма интересна с астрофизической точки зрения и имеет большое значение для геофизики. Однако несмотря на почти столетние исследования в этом направлении, еще слишком далеко от окончательных ответов на интересующие нас вопросы. Более того, новые наблюдаемые факты и теоретические соображения усложнили интерпретацию явлений, связанных с проникновением солнечных корпускул до Земли. Вопросы, касающиеся корпускулярного излучения Солнца удобнее всего рассмотреть в процессе их исторического развития. Это будет вполне целесообразно, поскольку даже наиболее старые материалы еще не потеряли актуального значения. Как теперь установлено, солнечные корпускулы оказывают существенное воздействие на ионосферу, увеличивая ионизацию в слоях E и F . Из-за возникновения излучения водорода L_α ($\sim 1200 \text{ \AA}$) они также создают дополнительную ионизацию в слое D , что обуславливает поглощение радиоволн¹. Все это делает указанную проблему очень важной в практическом отношении.

Вопрос о корпускулярном излучении Солнца возник еще в прошлом столетии, когда была установлена взаимосвязь между полярными сияниями, геомагнитными возмущениями и солнечной активностью. В начале нашего века Биркеланд^{2,3} и Штермер^{4,5} выдвинули гипотезу о том, что полярные сияния создаются выбрасываемыми из Солнца заряженными частицами, например, электронами. Эта гипотеза объясняла преимущественное попадание заряженных частиц в области около магнитных полюсов Земли и, во всяком случае, качественно хорошо подтверждалась модельным лабораторным экспериментом—так называемым опытом с тереллой. Терелла—это расположенный в разреженном газе намагниченный шар, подвергающийся облучению электронным лучом. Однако вскоре гипотеза Биркеланда и Штермера была подвергнута уничтожающей критике Шустером⁶. Шустер показал, что струя корпускул с одноименным зарядом невозможна, поскольку она разрушится при диссипации из-за интенсивного электростатического отталкивания. С целью преодоления указанного затруднения Линдеман⁷ высказал предположение, что струя корпускул, выбрасываемых из Солнца, состоит из одинакового числа положительных и отрицательных частиц и в целом нейтральна.

К этому времени выяснился также ряд весьма интересных обстоятельств, касающихся энергии солнечных корпускул. На рис. 1 показана нижняя граница полярных сияний по Штермеру⁸. Она характеризует толщу вещества, которую могут преодолеть корпускулы. Эти данные

свидетельствуют, что корпускулы, способные преодолеть толщу атмосферы над 100-километровым уровнем,—довольно обычное явление. Согласно современным представлениям это соответствует 10^{-3} г воздуха над 1 см^2 или 1 см атмосферы при нормальных давлении и температуре^{9,10}. Если предполагать, что поток в целом нейтрален и состоит из протонов и электронов, движущихся с одинаковой скоростью, то основная энергия корпускулярного потока будет сосредоточена в протонной составляющей. Для того чтобы протоны могли преодолевать указанную выше толщу атмосферы, они должны обладать энергией около $5 \cdot 10^5 \text{ эв}$, что соответствует их скорости около $10^9 \text{ см} \cdot \text{сек}^{-1}$. Такие корпускулы могут долететь от Солнца до Земли приблизительно за 4 часа. Однако время запаздывания геомагнитных возмущений и полярных сияний относительно прохождения через центр солнечного диска каких-либо активных образований, вроде солнечных пятен или сопровождающих их факелов и т. п., обычно составляет около 24 часов, а иногда и превышает это время, которое соответствует скоростям протонов около $1,5 \cdot 10^8 \text{ см} \cdot \text{сек}^{-1}$ и меньше. Протоны с такими энергиями не могут проникнуть на уровни атмосферы ниже 200—300 км. На рис. 2 изображена схема, поясняющая наблюдаемое запаздывание¹¹.

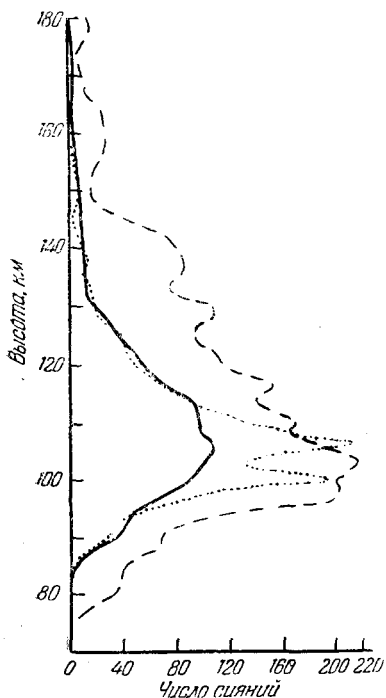


Рис. 1. Распределение по высоте нижних границ полярных сияний, согласно данным наблюдений трех норвежских станций. Пунктирная кривая соответствует наблюдениям Вегарда и Крогнесса в Хальдде, штриховая кривая—наблюдениям Штермера в Осло, а сплошная кривая—наблюдениям Штермера и Боссекопе.

Чепмен, Ферраро и Мартин^{12,13,14} предложили и разработали новое объяснение всех наблюдаемых закономерностей. Они использовали идею Линдемана о нейтральности корпускулярных потоков Солнца, выбрасываемых в виде струй. Кроме того, противоречие с запаздыванием они объяснили существованием вблизи Земли дополнительного механизма, ускоряющего солнечные корпускулы до высоких скоростей, способных обеспечить их проникновение в атмосферу до 100-километрового уровня и ниже. Чепмен, Ферраро и Мартин предполагали, что в результате движения корпускулярного потока около Земли вокруг нее на расстоянии нескольких радиусов образуется проводящее кольцо с интенсивным током и между внутренними и наружными частями кольца возникают электродвижущие силы, являющиеся причиной ускорения протонов и электронов по магнитным силовым линиям в области магнитных полюсов Земли. Идею о нейтральных корпускулярных потоках использовал также для объяснения полярных сияний и геомагнитных возмущений Альфвен¹⁵.

На основе идей Чепмена, Ферраро и Мартина разрабатывались варианты газоразрядных гипотез полярных сияний, в которых их основные свечения приписывались газовой разрядке, а не воздействию солнечных корпускул. Примером является гипотеза Лебединского¹⁶, согласно которой дуги полярных сияний являются электрическим разрядом в земной

атмосфере, возникающим в цепи, образуемой некоторым участком корпускулярного потока, в котором при движении в магнитном поле Земли возникает электродвижущая сила, затем участком вдоль магнитных силовых линий Земли, затем участком, перпендикулярным магнитному полю в слое E ионосферы и, наконец, опять участком вдоль магнитных силовых линий Земли. По-видимому, такие некорпускулярные варианты полярных сияний не подтверждаются постоянным присутствием во всех их формах водородной эмиссии. Кроме того, в газоразрядной гипотезе Лебединского не учитывается, что наибольшее падение напряжения будет приходиться не на хорошо проводящий слой E ионосферы, а на участок цепи с наибольшим сопротивлением, находящийся в корпускулярном потоке. В этом случае в слое E едва ли могут возникнуть условия для самоподдерживающегося газового разряда перпендикулярно силовым магнитным линиям.

В последнее время и сама гипотеза Чемпена, Ферраро и Мартина подверглась серьезной критике. Так, например, Аказофу¹⁷ показал, что предположение об образовании вокруг Земли кольца токов недостаточно обосновано. Как известно, ионизованный газ становится аналогичным проводнику, когда линейные размеры газового облака больше длины свободного пробега ионизованных частиц. Однако это условие как раз и не выполняется в механизме, предложенном Чемпеном, Ферраро и Мартином, где длина свободного пробега ионизованных частиц λ существенно больше радиуса токового кольца. Действительно,

$$\lambda = \frac{1}{\sigma \cdot n},$$

где σ — эффективное сечение соударений, а n — концентрация частиц. При $\sigma = 10^{-16}$ см² и даже $n \sim 10^3$ см⁻³ $\lambda \sim 10^{13}$ см, что много больше нескольких радиусов Земли. Паркер и Крук^{18,19} указывают также на весьма существенное затруднение в гипотезе Чемпена, Ферраро и Мартина, заключающееся в том, что постоянные времени образования кольца токов и диссипации газового ионизованного облака соизмеримы. Монтальбетти и Джонс²⁰ сообщают, что гипотеза Мартина не подтверждается временем появления водородной эмиссии в процессе развертывания явления полярного сияния.

В свете указанных выше затруднений Беннет и Хальбарт²¹ вновь воскресили в последние годы первоначальную гипотезу Биркеланда и Штермера. Они обратили внимание на то, что межпланетная среда вовсе не является идеальным вакуумом, а содержит ионизованный газ, являющийся хорошим проводником. По их мнению это обстоятельство полностью предохраняет от диссипации в результате электростатического отталкивания корпускулярный поток, состоящий из частиц с одноименным зарядом. Кроме того, было показано, что в силу электромагнитного взаимодействия движущихся зарядов пучок корпускул будет фокусироваться. Таким образом, уничтожающая критика Шустера в адрес гипотезы Биркеланда и Штермера оказалась несостоятельной. Тем не менее несмотря

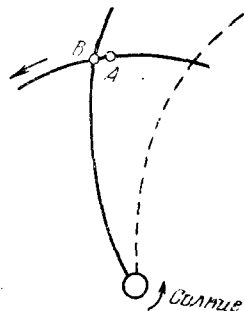


Рис. 2. Искривление потока частиц, непрерывно испускаемых в радиальном направлении точечным источником, находящимся на поверхности Солнца, вследствие вращения последнего. Радиусы кружков, обозначающих Солнце и Землю, увеличены десятикратно по отношению к радиусу земной орбиты. Скорость частиц предполагается равной 1000 км/сек. Земля перемещается на расстояние AB за промежуток времени, необходимый для того, чтобы частицы достигли земной орбиты.

на успешную реставрацию первоначальной гипотезы Биркеланда и Штермера, последняя все же не выдерживает в настоящее время противодействия других существенных возражений. Как известно, заряженные частицы описывают в магнитном поле круговые траектории с радиусом

$$\rho = \frac{mv}{eH},$$

где m —масса частицы, v —ее скорость в направлении, перпендикулярном магнитному полю, e —заряд электрона и H —напряженность магнитного поля (e и H в единицах CGSM). В настоящее время считается общепринятым, что межпланетное магнитное поле оказывает влияние даже на более жесткие частицы (какими являются частицы космических лучей), чем на те, которые вызывают полярные сияния и геомагнитные возмущения. При этом астрофизики оценивают, что в межпланетном пространстве напряженность магнитного поля имеет значение порядка 10^{-5} эрстед. В этом случае, если корпускулы являются протонами со скоростью 10^9 см·сек⁻¹, $\rho \sim 10^{10}$ см. Этот пример свидетельствует, что заряженные частицы, ответственные за возникновение полярных сияний и геомагнитных возмущений, не могут достигать Земли по прямолинейной траектории. Кроме того, более вероятно, что при указанном выше радиусе кривизны они будут вновь возвращаться на Солнце. В этом случае и нейтральность потока не может изменить существенно указанное обстоятельство, поскольку в хорошо проводящей межпланетной среде разноименно заряженные частицы будут легко разделяться в результате отклонения их магнитным полем в разные стороны.

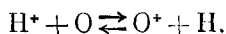
Для преодоления указанных выше затруднений Петухов²² предположил, что корпускулярные потоки возникают при мощных нейтронных извержениях на Солнце. В результате такого процесса, весьма легко объясняющего проникновение корпускул через хромосферу и солнечную корону, после радиоактивного распада нейтронов в межпланетном пространстве образуются быстрые протоны и электроны. Для объяснения времени запаздывания геомагнитных явлений относительно времени прохождения через центр диска Солнца каких-либо активных образований, Петухов²³ постулировал нерадиальный выброс, образно выражаясь, вроде струй «Сегнерова Колеса». Если учесть, что наиболее обычные корпускулы, вызывающие полярные сияния, имеют скорости около 10^9 см·сек⁻¹ и что среднее время жизни нейтрона равно $2 \cdot 10^3$ сек, то приходится заключить, что подавляющая часть корпускул будет превращаться в протоны задолго до того, как они достигнут Земли. Поэтому весьма интересный механизм Петухова может существенно сказаться лишь на обогащении корпускулярных потоков протонами, но не на принципиальном их изменении вблизи Земли.

Последние годы ознаменовались существенным увеличением наших знаний о составе газовой межпланетной среды^{24,25,26,27}. Было установлено, что плотность электронов, а следовательно, и ионов вблизи Земли достигает 10^3 см⁻³, а ближе к Солнцу она даже доходит до величины 10^4 см⁻³. Указанные обстоятельства ставят под серьезное сомнение существование струйных извержений из Солнца, предполагаемых многими вышеуказанными авторами. Совершенно очевидно, что струя сможет преодолеть среду с только что указанной плотностью (10^3 пар ионов см⁻³), если ее плотность будет по порядку величины, во всяком случае, не меньше указанной. С другой стороны, при скоростях корпускул порядка 10^9 см·сек⁻¹ и такой плотности они будут приносить на 1 см² земной атмосферы энергию, соизмеримую с солнечной постоянной. Это слишком много, так как вся энергия корпускулярных потоков будет выделяться только в верхних слоях атмосферы, а не, главным образом, в приземных слоях, что имеет место

в случае обычного солнечного излучения. Трудно представить, что такая большая, вносимая в верхние слои энергия осталась незамеченной.

Большая плотность межпланетной среды навела на мысль о том, что в ней иногда возможно распространение ударных сверхзвуковых волн, которые, например, могут возникать при хромосферных вспышках на Солнце²⁸. По-видимому, такой процесс порой и наблюдается в действительности, сопровождаясь внезапным началом магнитных возмущений и полярных сияний. В данном случае изверженный из Солнца газ увлекает за собою межпланетный, в результате чего фронт волны перемещается с одинаковой скоростью, обеспечивая проникновение в область Земли монохроматических корпускул. Гипотеза об ударных сверхзвуковых волнах имеет, однако, в виду очень плотные корпускулярные потоки и поэтому ее дальнейшая судьба будет зависеть от доказательства существования корпускулярных потоков большой плотности.

Еще в 1951 г. Шкловский^{29, 30} разработал теорию, согласно которой в процессе взаимодействия солнечных корпускул с атомами земной атмосферы основную роль играют процессы перезарядки ионов. Таким простейшим процессом является процесс перезарядки протона с атомом кислорода и обратный процесс:



Роль нейтрального атома кислорода могут также выполнять другие атомы и молекулы земной атмосферы. Эффективные сечения перезарядки имеют значения от 10^{-14} до 10^{-17} см². Характерной чертой движения ионизованных корпускул является то, что они совершают спиральные движения около магнитных силовых линий. С другой стороны, перезаряженные нейтральные корпускулы обладают способностью рассеиваться в земной атмосфере и отражаться по всем направлениям. Позднее такие процессы стали, общепризнанными и их использовали многие авторы (см., например,³¹).

Недавно Шкловский показал³², что большая плотность ионов и электронов в межпланетном пространстве свидетельствует о большой плотности нейтральных атомов водорода. Число нейтральных атомов водорода значительно увеличивается благодаря наличию в межпланетном пространстве пылевого вещества. Концентрация нейтральных частиц может составлять десятки процентов от общей концентрации. Шкловский показал, что процессы перезарядки будут играть существенную роль и по пути следования корпускул от Солнца к Земле. В свете этого по прямолинейной траектории смогут следовать только перезарядившиеся нейтральные корпускулы водорода, гелия и других атомов. Быстрые нейтральные корпускулы, попадая в земную атмосферу, ионизируются и проникают в земную атмосферу, образуя в ней своеобразную зону корпускулярных сумерек. Жесткие нейтральные корпускулы должны играть активную роль в ионизации верхних слоев атмосферы наряду с жесткими фотонами. Они будут проникать на все широты освещенной части Земли, в том числе и в экваториальную зону. Такое распределение корпускулярных вторжений существенно отличается от распределения в земной атмосфере заряженных корпускул в соответствии с прежними гипотезами, что иллюстрируется рисунками 3 и 4. Разным частицам соответствует свой характерный диаметр зоны облучения вблизи магнитных полюсов.

В настоящее время достигнуты большие успехи в изучении спектров полярных сияний^{33, 34}. Одновременно в лаборатории получены спектры искусственных полярных сияний³⁵. Так как согласно ракетных исследований³⁶ теперь установлено, что земная атмосфера, во всяком случае до высот 110 км, имеет примерно тот же аллотропический состав, что

и в приземном слое, то условия лабораторных экспериментов могут полностью сопоставляться с условиями верхней атмосферы до указанных уровней. С помощью сличения спектров полярных сияний с лаборатор-

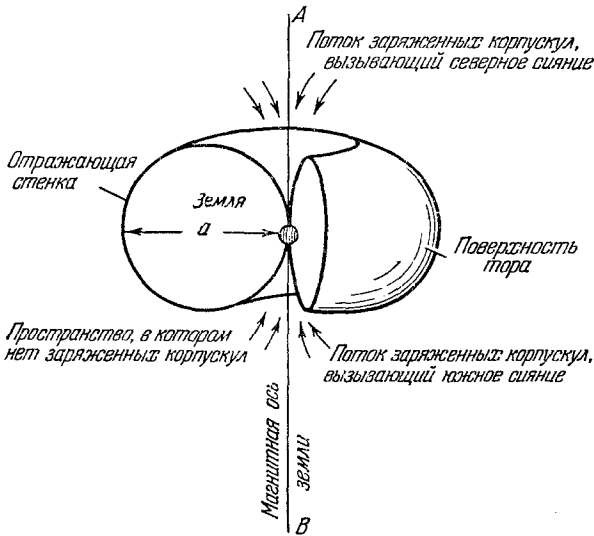


Рис. 3. Пространство тора запрещено для заряженных корпускул.

ными установлено, что спектры полярных сияний не соответствуют газоразрядному спектру в воздухе, для которого характерна интенсивная вторая положительная система полос молекулярного азота, едва замет-

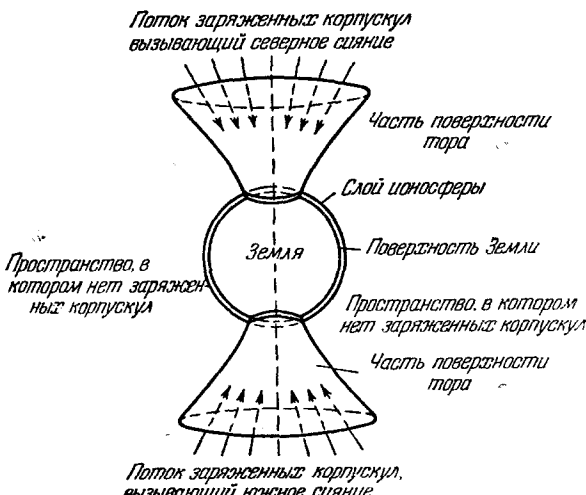


Рис. 4. Внутренняя часть тора. Предполагается, что поверхность тора встречается с Землей в поясах полярных сияний.

ная в спектре полярных сияний. С другой стороны, при лабораторном эксперименте найдено, что при одинаковой плотности водородных и гелиевых корпускул эмиссия водорода на несколько порядков более интен-

сивна, чем гелиевая. Не удивительно поэтому, что в полярных сияниях всегда присутствует только водородная эмиссия и пока совершенно не обнаружена гелиевая. В спектрах полярных сияний совершенно уверенно обнаружена эмиссия ионизованных атомов азота, которые в лабораторных условиях легче возбуждаются гелиевыми корпускулами, чем водородными. Это свидетельствует о том, что в корпускулярных потоках Солнца, вызывающих полярные сияния, по-видимому, имеется и гелиевая компонента. Спектры полярных сияний оказались не похожими на спектры воздуха, возбуждаемого жесткими электронами. Однако в инфракрасной области спектра найдены полосы ионизованной молекулы азота, которые возбуждаются только электронами с энергией в несколько десятков электрон-вольт. Образование таких электронов, как вторичных продуктов, при бомбардировке жесткими корпускулами не представляется неожиданным. Спектральное исследование полярных сияний показало, что длина пробега корпускул, вызывающих полярные сияния, непрерывно меняется и что наряду с корпускулами, проникающими в атмосферу до 100-километрового уровня, во время полярных сияний довольно часто появляются и корпускулы с глубиной проникновения, не превышающей 200—300 км. Изменение глубины проникновения сопровождается существенным изменением спектров полярных сияний. Если глубинные спектры полярных сияний характерны интенсивным проявлением молекулярных спектров ионизованной молекулы кислорода, то в средних слоях доминируют спектры ионизованной молекулы азота, а в еще более высоких преобладают атомарные спектры, что указывает, в основном, на атомарный состав самых верхних слоев атмосферы*).

Шкловский^{29,30}, а затем и ряд других авторов, на основании анализа закономерностей возникновения водородной эмиссии H_{α} определили, что в полярных сияниях средней интенсивности плотность водородных корпускул H^{+} имеет значение порядка 1 см^{-3} . Так как среднее сияние обычно ярче фона ночного неба в сотню раз, то в случае корпускулярных вторжений на грани обнаружения плотность H^{+} будет порядка 10^{-2} см^{-3} . При скорости корпускул около $10^{-9} \text{ см} \cdot \text{сек}^{-1}$ это будет соответствовать плотности корпускулярного тока около $10^{-12} \text{ а} \cdot \text{см}^2$.

Изучение полярных сияний и их спектров в ночное время дает богатый материал для суждений о природе солнечных корпускул. Однако в сумеречное и в особенности в дневное время корпускулярное излучение Солнца остается недоступным для наземных наблюдений. В настоящее время для прогресса наших представлений о корпускулярных потоках необходимо накопление новых сведений об их химическом составе и распределении по широтам и долготам в различное время суток.

Искусственный спутник Земли можно использовать для исследований корпускулярного излучения Солнца в двух направлениях. Во-первых, путем установки на нем специального масспектрометра желательнее определить непосредственный химический состав корпускулярных потоков. Такие приборы могут быть разработаны. Однако наиболее эффективный способ регистрации связан с фотографическим процессом, а это потребует специальной конструкции спутника с обеспечением доставки

*) Ранее считалось, что синее доплеровское смещение в водородной эмиссии полярных сияний может свидетельствовать об истинных скоростях корпускул. Однако теперь установлено, что контур этой эмиссии для разнообразных полярных сияний и на различных широтах приблизительно одинаков. Это объясняется тем, что водородная эмиссия эффективно образуется только в последней стадии торможения корпускул. Из-за наличия блендирующих полос молекулярного азота быстрые корпускулы со скоростями больше $1500—2000 \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1}$ не дают поддающейся обнаружению эмиссии. По этому поводу смотри, например, ^{33,34}.

полученных материалов на Землю. Кроме того, по-видимому, будет необходима строгая ориентация прибора в нужном направлении.

Во-вторых, в настоящее время осуществимо исследование распределения и проникновения корпускул по геомагнитным широтам и долготам, в особенности в дневное время, что обеспечит проверку различных гипотез о природе корпускулярных потоков. Для этой цели спроектирован и готовится прибор, принципиальная схема которого изображена на рис. 5. В качестве индикатора корпускул

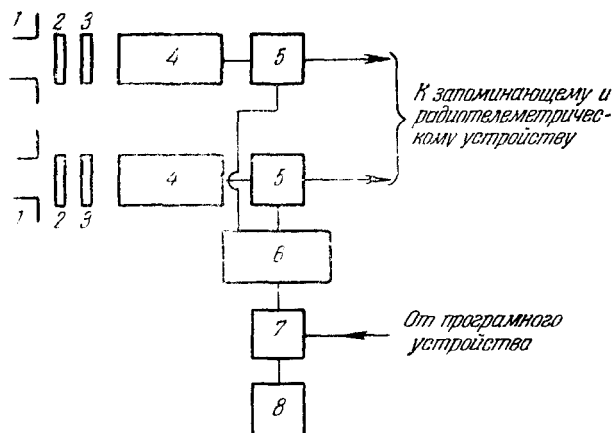


Рис. 5. Схема узлов прибора для определения корпускулярного излучения Солнца: 1—бленда, ограничивающая угол захвата корпускул; 2—металлическая фольга; 3—флуоресцирующий экран; 4—фотоумножитель с плоским полупрозрачным фотокатодом; 5—катодный повторитель; 6—преобразователь напряжений; 7—реле включения и выключения питания; 8—электробатареи.

используется флуоресцирующий экран, который светится под их воздействием*). Излучение флуоресцирующего экрана регистрируется фотоэлементом, затем фототок усиливается, запоминается и передается на соответствующее радиотелеметрическое устройство. Впереди флуоресцирующего экрана помещается металлическая фольга. Назначение металлической фольги двойное. С одной стороны, с помощью применения фольг различных толщин можно грубо оценивать пробег корпускул. С другой стороны, фольга защищает флуоресцирующий экран и фотоэлемент от непосредственного воздействия солнечного излучения. Бленда служит для ограничения угла воздействия корпускул. Ток I , который возникает в фотоэлементе, определяется нижеследующим выражением:

$$I = iSU\eta\alpha,$$

где i —ток корпускул в $a \cdot \text{см}^{-2}$, S —площадь флуоресцирующего экрана и фотокатода в см^2 , U —разность потенциалов, потребовавшаяся для ускорения корпускул до их энергии, в вольтах, α —светоотдача флуоресцирующего экрана в сзечах на ватт при Ламбертовском распределении излучения и η —чувствительность фотокатода в a на люмен. Возь-

*) Регистрация корпускул с помощью зондового метода невозможна, так как верхняя атмосфера содержит большое число собственных ионов и электронов, которые в случае наличия разности потенциалов между электродами зонда создают большой ток, маскирующий ток солнечных корпускул. Кроме того, зондовый метод не позволит регистрировать нейтральные корпускулы.

мом $i \sim 10^{-12} \text{ а} \cdot \text{см}^{-2}$, что соответствует полярному сиянию на уровне фона ночного неба, $S \sim 30 \text{ см}^2$, $U \sim 10^5 \text{ в}$, $\alpha \leq 10$ свечам на ватт и $\eta \sim 10^{-4} \text{ а}$ на люмен. Тогда $I \sim 10^{-8} \text{ а}$. Вполне очевидно, что усиление таких токов, как 10^{-8} и даже меньших, соответствующих обычному фону корпускула в спокойные дни, не представляет каких-либо затруднений. В качестве металлических фольг предполагается использовать алюминиевые пленки толщиной 0,6 и 1,0 $\text{мг} \cdot \text{см}^{-2}$. Эти пленки будут приблизительно соответствовать корпускулам, которые могут проникать в земную атмосферу до уровней 110 и 100 км. Пленки с 0,6 $\text{мг} \cdot \text{см}^{-2}$ практически не прозрачны для солнечного излучения и предохраняют от него приемные фотоэлементы.

Использование описываемого прибора целесообразно одновременно с приборами для исследования рентгеновского излучения Солнца³⁷ и микрометеоритов³⁸. Одновременное исследование рентгеновского излучения Солнца необходимо, чтобы исключить это излучение, когда описываемый прибор будет непосредственно обращен на Солнце и сможет регистрировать, кроме корпускулярного, и рентгеновское излучение. Кроме того, тонкая металлическая фольга с течением времени будет непрерывно, так и тонкие металлические фильтры при определении рентгеновского излучения Солнца, продырявливаясь микрометеоритами, и поэтому отсчет прибора в дневное время будет давать некоторую постепенно увеличивающуюся составляющую. Таким образом, как прибор для изучения рентгеновского излучения Солнца, так и прибор для изучения корпускулярного излучения Солнца будут служить дополнительным индикатором микрометеоритов. Наличие независимого контроля за микрометеоритами позволит учесть паразитную подсветку через дырочки, создаваемые микрометеоритами.

Мягкое корпускулярное излучение Солнца может быть обнаружено только без металлических фольг в ночное время при отсутствии солнечного освещения. Прибор в таком режиме может включаться и выключаться специальными командными сигналами от программного устройства.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Красовский, Природа, № 5, 55 (1957).
2. K. Birkeland, Vidensk. Skrifter, 1, Mat. Naturv. kl., Christiania (1901).
3. K. Birkeland, Norwegian Aurora Polaris Expedition, 1902/03, Christiania, 1, pt. 1 (1908); pt. 2 (1913).
4. C. Störmer, Arch. Sci. Phys. Genève 24, 5, 113, 221, 317 (1907); 32, 33 (1914); 35, 483 (1913).
5. C. Störmer, Phys. Rev. 45, 835 (1934).
6. A. Schuster, Proc. Roy. Soc. A 85, 44 (1911).
7. F. A. Lindemann, Phil. Mag. 38, 669 (1919).
8. C. Störmer, Vid. Selsk. Skr., № 17 (1911).
9. С. К. Митра, Верхняя атмосфера, ИЛ, 1955.
10. D. R. Bates, Rocket Expl. Up. Atm., London, 347 (1954).
11. S. Chapman, J. Bartels, Geomagnetism 2, 804 (1940).
12. S. Chapman, Proc. Phil. Soc. 21, 577 (1923).
13. S. Chapman, V. C. A. Ferraro, Terr. Mag. Atm. Elec. 36, 77, 171 (1931); 37, 147 (1932).
14. V. C. A. Ferraro, I.A.G.A. Bulletin № 15a, 166 (1956).
15. H. Alfvén, A theory of Magnetic Storms and of the Aurorae, Kungl. Sol. Vetenskaps Acad. Handl. Stockholm, III 18, № 3 (1939); там же 18, № 5 (1940).
16. А. И. Лебедянский, ДАН 86, № 5, 913 (1952).
17. S. y u m - J e h i A k a s o f u, Sci. Rep. Tôhoku Univ. 8, № 2, 133 (1957).
18. E. N. Parker, Astrophys. J. 122, 293 (1955).
19. E. N. Parker and K. Crook, Astrophys. J. 124, 214 (1956).
20. R. Montalbetti and A. Jones Vallance, J. Atm. Fer. Phys. 11, 43 (1957).
21. V. H. Bennet and D. E. Hulburt, Phys. Rev. 91, № 6, 1562 (1953).

22. V. A. Petukhov, *The Airglow and the Aurorae*, London, 254 (1956).
 23. В. А. Пугухов, *Изв. АН СССР, сер. геофиз.*, № 1 (1957).
 24. H. Siedentoff, A. Behr and H. Elsässer, *Nature* **177**, 1066 (1953).
 25. A. Behrand, H. Siedentoff, *Zeits. Astrophys.* **32**, 19 (1953).
 26. D. E. Blackwell, *Mon. Not.* **116**, 56 (1956).
 27. D. E. Blackwell, *Mon. Not.* **116**, 365 (1956).
 28. T. Gold, *Rocket Expl. Up. Atm.*, London, 366 (1954).
 29. И. С. Шкловский, *ДАН* **81**, № 3, 367 (1951).
 30. И. С. Шкловский, *Изв. Крым. Обс.* **8**, 51 (1952).
 31. D. R. Bates, *OAGA Bulletin* № 15e, 135 (1956).
 32. И. С. Шкловский, *Сборник симпозиума по аэронамии в Торонто*. В печати.
 33. В. И. Красовский, Ю. И. Гальперин, А. В. Миронов, В. С. Прокудина, Н. Н. Шефов, Н. И. Федорова и Б. А. Багаряцкий, *Сборник симпозиума по аэронамии в Торонто*. В печати.
 34. В. И. Красовский, *Сборник симпозиума по аэронамии в Торонто*. В печати.
 35. C. J. Fan, *The Airglow and the Aurorae*, London, 276 (1956).
 36. M. Nicolet, *Rocket Expl. Up. Atm.*, London, 357 (1954).
 37. С. Л. Мандельштам и А. П. Ефремов, *УФН* **63**, № 16, 163 (1957).
 38. С. М. Полосков и Т. Н. Назарова, *УФН* **63**, № 16, 253 (1957).
-