

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ
И ИЗЛУЧЕНИЯ НОЧНОГО НЕБА ВО ВРЕМЯ МГГ И МГС****В. И. Красовский**

С июля 1957 г. по декабрь 1958 г. с целью проведения обширных и разнообразных научных исследований был организован Международный геофизический год (МГГ), а затем начатые исследования были продлены еще на 1959 г., так называемый год Международного геофизического сотрудничества (МГС). Все эти годы были весьма благоприятны для развития исследований полярных сияний и излучения ночного неба. В настоящее время в печати начинают появляться отрывочные сведения о результатах наблюдений. Однако такие многочисленные фрагменты еще не сопоставлены и не объединены в одно целое. Здесь предпринимается в этом направлении первая попытка, относящаяся к советским исследованиям, проводившимся в Лопарской, Рошино и Эвенигороде¹. Материал, хотя и несколько условно, разделяется на две части: полярные сияния и излучение ночного неба. Поскольку выполненные наблюдения относятся ко времени максимальной активности Солнца, то и выводы, которые вытекают из них, по-видимому, будут наиболее характерными для этого периода. Более исчерпывающие заключения, скорее всего, станут возможными после дополнительных исследований в годы минимума солнечной активности.

ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ

Раньше под явлением полярного сияния обычно понималось появление каких-либо различных на глаз светящихся образований, преимущественно с четкими очертаниями. Однако Н. В. Джорджио² путем электрофотометрирования многочисленных участков небосвода показал, что в резко очерченных наиболее ярких образованиях сосредоточивается лишь часть излучения. В большинстве случаев более мощным оказывалось интегральное излучение окружающего преимущественно мало меняющегося по интенсивности фона, которое не замечалось визуально лишь вследствие плохой контрастной чувствительности глаза при слабых освещенностях. Максимальное значение зарегистрированного отношения суммарных мощностей излучения фона и резко очерченных форм оказалось равным 10, а минимальное 0,05, причем последнее характерно только для очень ярких кратковременных образований. Полярная часть небосвода в Лопарской даже в спокойные ночи почти регулярно излучала обнаруживаемую спектрографами эмиссию ионизированной молекулы азота. В течение МГГ и МГС Н. В. Джорджио только несколько раз удалось визуально заметить отсутствие дополнительного свечения на севере. Однако после электрофотометрирования по меридиану оказывалось, что в верхней атмосфере

на высотах 100—150 км, начиная с геомагнитной широты центра зоны полярных сияний (67° геомагнитной широты), всегда начиналось уверенно регистрируемое электрофотометром увеличение светимости эмиссий ночного неба. Их интенсивность у северного горизонта достигала приблизительно полуторного значения в зените. Если бы избыточную по сравнению с зенитом интенсивность можно было сосредоточить в зените в дуге с шириной в один угловой градус, то пришлось бы иметь дело с дугой примерно второй категории яркости. В Звенигороде за время МГГ и МГС визуально наблюдалось 35 полярных сияний при магнитной активности с индексом $K > 4$. С помощью широкоугольных камер из-за ограниченной чувствительности они были сфотографированы 14 раз. Однако спектрограф зарегистрировал 157 раз повышенную интенсивность красной кислородной линии $6300 \text{ \AA}$. Все вышеизложенные наблюдения были получены во время ясной погоды и не отображают поэтому исчерпывающей статистики за время МГГ и МГС. Вследствие плохих метеорологических условий и светлых почей не было возможности вести наблюдения за полярными сияниями во время 25 магнитно-активных ночей с индексом $K > 4$. Следует также упомянуть, что зарубежные исследования Барбье, Роча и других^{55, 56} показали, что в экваториальных районах в большинстве ясных почей около зенита наблюдаются невидимые глазом красные дуги, обусловленные кислородной эмиссией $6300 \text{ \AA}$. По-видимому, полярные сияния небольшой активности характерны для любых геомагнитных широт.

Таким образом, необходим радикальный пересмотр понятия «отсутствие полярного сияния», как в высоких, так и в низких широтах. В свете вышеизложенного любая статистика полярных сияний представляется разумной только для полярных сияний одинаковой интенсивности и цветности. Для характеристики типа полярного сияния недостаточно указать только наиболее бросающуюся в глаза форму. Не менее существенно отметить вносимый ею относительный вклад в суммарное излучение полярного сияния, степень развития наиболее ярких резко очерченных тончайших образований (например, элементарных лучиков). При полярном сиянии, наряду с оптическим возбуждением атмосферы, появляется и ее ионизация. Для макроскопических свойств верхней атмосферы, таких, как сплошная ионизация огромной протяженности, определяющая распространение и поглощение радиоволн, или поверхностная электропроводность, существенная для формирования геомагнитных возмущений, наиболее характерна связь с обширными диффузными полями, а не только с отдельными изолированными образованиями вдоль магнитных силовых линий. Интенсивные геомагнитные и ионосферные аномалии обычно коррелируют с появлением лучистых форм. Однако последние не являются полями сплошной ионизации и поверхностной проводимости, так что истинная причина этой зависимости лежит в сопровождающем их диффузном фоне полярного сияния.

Большая распространенность обычно незамечаемых диффузных полярных сияний создает условия для существенной нивелировки различных типов спектров, поскольку по лучу зрения может находиться несколько различных образований. Нивелировка возрастает из-за рассеяния света в атмосфере, в особенности при наличии даже легкой облачности, например перистых облаков. Поэтому для окончательных заключений приходится использовать только материалы, полученные в условиях очень ясной погоды. Но и в случае таких благоприятных условий нивелировка совершается за счет быстрых изменений типа полярных сияний и их перемещений по небосводу. Фотографии спектров, получаемые с длительными экспозициями, особенно страдают этим недостатком. В случае применения быстро

регистрирующих электрофотометров и спектрометров этот недостаток уменьшается, но появляются искажения в спектральном распределении регистрируемого излучения за счет быстрых вариаций интенсивности полярного сияния. Все перечисленные принципиальные недостатки не позволяют получать четких закономерностей в спектрах полярных сияний. Однако даже выявление тенденции той или иной зависимости приводит к весьма существенным выводам.

Водородная эмиссия полярных сияний обычно рассматривалась как результат непосредственного взаимодействия первичных протонов солнечного происхождения с атомами и молекулами верхней атмосферы, причем предполагалось, что такие протоны появляются только во время больших геомагнитных возмущений. Между тем, как уже сообщалось В. С. Прокудиной³, с помощью высококачественных спектрографов с дисперсией до $80 \text{ \AA} \cdot \text{мм}^{-1}$ и разрешением до $1 \text{ \AA}$ впервые в практике наблюдения эмиссий верхней атмосферы была осуществлена регулярная регистрация в спектрах ночного неба водородной эмиссии с узким контуром. Дальнейшие подробности об этой эмиссии будут сообщены в разделе «Излучение ночного неба». Здесь же сосредоточим внимание на том, что с помощью аналогичных высококачественных спектрографов Ю. И. Гальперин, Н. Н. Шефов, Ф. К. Шуйская и другие^{4,5,6,7,8,9} зарегистрировали довольно частое появление водородной эмиссии H_α и H_β с широким контуром, имеющим в магнитном зените доплеровское смещение в синюю область спектра. В результате была получена уникальная коллекция спектров с такой водородной эмиссией. Дальше, в разделе «Полярные сияния», будет иметься в виду водородная эмиссия только с широким контуром.

В результате наблюдений Ю. И. Гальперина в Лопарской было установлено, что в водородной эмиссии из магнитного зенита доплеровское смещение в коротковолновую область спектра соответствует приблизительно $300\text{--}400 \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1}$ в области максимальной интенсивности контура и прослеживается до $1500\text{--}2000 \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1}$. Замечено также некоторое доплеровское смещение в красную область спектра вследствие рассеяния водородной эмиссии в атмосфере по направлению на магнитный зенит от горизонтальных областей небосвода. Оно увеличивается при плохой видимости. Наиболее замечательным оказалось, что в пределах погрешности $\pm 100 \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1}$ основные черты контура водородной эмиссии сохраняются неизменными во всех полярных сияниях. Ф. К. Шуйская установила также, что аналогичная картина характерна и для Рожино. По Звенигороду, где было только одно очень слабое появление водородной эмиссии в магнитном зените, можно сделать заключение только о контурах этой эмиссии из магнитного горизонта. Но и в этом случае данные, полученные в Звенигороде, Рожино и Лопарской, совпадают.

Указанный материал позволяет утверждать, что регистрируемое излучение создается водородными атомами с небольшими монохроматическими скоростями. Их скорости существенно отличаются от более высоких монохроматических скоростей корпускулярных потоков Солнца — около $10^3 \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1}$. Медленные излучающие атомы водорода могли появляться в результате или существенного торможения без излучения первичных быстрых протонов корпускулярных потоков Солнца, или ускорения атмосферных протонов при каких-либо процессах взаимодействия этих потоков с внешней атмосферой Земли. Ю. И. Гальперин^{4,5,6,7} провел систематическое сравнение интенсивностей водородной эмиссии в магнитном зените и на горизонтальном белом экране. Оказалось, что эти интенсивности практически всегда одинаковы, даже если в зените располагается какое-либо яркое образование полярного сияния. Из этих наблюдений приходится сделать вывод, что поле водородной эмиссии диффузно,

занимает значительную часть небосвода и, по-видимому, не связано или очень слабо связано с резко очерченными наиболее яркими формами полярных сияний. Поля водородной эмиссии, как и яркие образования, регулярно перемещаются вдоль магнитного меридиана к югу в вечернее время и возвращаются на север в утренние часы. В среднем в полуночное время водородная эмиссия в Лопарской наиболее часто наблюдалась южнее Лопарской, хотя иногда она появлялась на севере.

Как известно, ранее Мейнелом ⁵⁷ был описан единственный случай приблизительного совпадения по зенитным углам в спокойной дуге вблизи горизонта максимумов интенсивности водородной и других эмиссий. Ю. И. Гальперин в поисках аналогичных данных, применяя экспозиции, достигавшие четырех минут, получил противоречивые результаты. Поэтому О. Л. Вайсберг ^{10,11} повторил в Лопарской исследования водородной эмиссии с помощью быстро регистрирующего спектрометра: при щели, обеспечивающей разрешение около 10 Å, спектральная область в 2000 Å сканировалась за 30 сек при пороговой чувствительности на эмиссию водорода H_β в 20 R. Оказалось, что водородная эмиссия никогда не усиливается ни в одной из ярких форм вблизи зенита. Ее усиление наблюдается только иногда в образованиях вблизи горизонта, в особенности южного. Однако это может в действительности объясняться наложением более удаленных высоких полей водородной эмиссии на более близкие и низкие поля других эмиссий. Усиление интенсивности диффузных водородных полей вблизи горизонта обязано эффекту Ван-Рейна, а ослабление непосредственно у горизонта — атмосферному поглощению.

Таким образом, в настоящее время, во-первых не обнаружено, усиления водородной эмиссии в зенитных формах и отсутствуют однозначные убедительные доказательства таких наблюдений в прошлом, во-вторых, регистрируется ее усиление в образованиях вблизи горизонта. Допущение второго при исключении первого абсурдно, поскольку это связало бы место концентрации водородной эмиссии в резко очерченных формах полярных сияний с положением наблюдателя. Сейчас более вероятно предполагать, что поле водородной эмиссии, как правило, не усиливается в таких резко очерченных образованиях полярных сияний, как дуги, полосы и лучи. Следует напомнить, что диффузность полей водородной эмиссии представлялась неизбежной и раньше в свете перезарядного механизма возбуждения этой эмиссии, впервые предложенного И. С. Шкловским ¹². Согласно этому теперь уже общепринятому механизму первичные протоны перезаряжаются и возбуждаются при столкновениях с нейтральными атомами и молекулами земной атмосферы. Однако, став нейтральными атомами водорода, они перестают концентрироваться при движении вниз около геомагнитных силовых линий. Весьма интересно, что, по И. С. Шкловскому ¹³, часть протонов в пути к Земле еще в межпланетном пространстве становится нейтральными атомами водорода.

По данным Ю. И. Гальперина, в Лопарской водородная эмиссия появлялась как до наступления полярных сияний, так и во время любой стадии их развития, иногда она наблюдалась подряд в течение нескольких суток и не было отмечено предпочтительного присутствия ее в какое-либо определенное время суток. Весьма примечательно, что в ряде случаев в Лопарской наблюдалась интенсивная водородная эмиссия в магнитно спокойное время без появления каких-либо визуально заметных форм полярного сияния. Однако в большинстве случаев она начиналась за несколько часов до их возникновения. В Роцино и в Звенигороде водородная эмиссия появлялась только иногда во время некоторых очень сильных геомагнитных возмущений. Однако и в Роцино и в Звенигороде она не была зарегистрирована во время многих других очень сильных геомагнитных возмущений. Между

тем на этих станциях во время любого сколько-нибудь существенного геомагнитного возмущения, если только были благоприятные метеорологические условия, всегда появлялось полярное сияние, обнаруживаемое визуально или, во всяком случае, с помощью спектрографов, причем в спектре не было водородной эмиссии. По материалам, полученным Ю. И. Гальпериним и О. Л. Вайсбергом, водородные поля имеют протяженность по долготе порядка сотен, а иногда и более тысячи километров при максимальной интенсивности в тысячи релеев. Становится ясным, что суммарная энергия, соответствующая таким протяженным эмиссионным полям, велика. Эти поля с севера обрамляются резко очерченными преимущественно подвижными образованиями полярных сияний без водородной эмиссии. В свою очередь наблюдения на южных станциях однозначно указывают, что и с южной стороны они также обрамляются аналогичными образованиями. Например, в Роцино с помощью спектрографов полярное сияние с эмиссией ионизованной молекулы азота было зарегистрировано в магнитном зените 39 раз, но водородная эмиссия в магнитном горизонте наблюдалась одновременно только 10 раз, а в магнитном зените — всего три раза. Еще южнее, в Звенигороде, с помощью спектрографа полярное сияние с эмиссией ионизованной молекулы азота было зарегистрировано в магнитном зените 37 раз, но водородная же эмиссия в магнитном горизонте наблюдалась одновременно только семь раз, а в магнитном зените — всего один раз, и то с очень маленькой интенсивностью.

Поле водородной эмиссии вдоль параллели оказалось более или менее равномерным. Оно обычно несколько усиливается к горизонту вследствие эффекта Ван-Рейна. Хотя наблюдение за водородной эмиссией с помощью спектрометра по разрешающей способности значительно уступает визуальному и фотографическому обнаружению неравномерностей ярких форм полярных сияний вдоль параллели, тем не менее нельзя не отметить отсутствия сколько-нибудь существенных колебаний интенсивности, превышающих 10—20% от ее среднего значения, сверх того, что обязано эффекту Ван-Рейна.

Материалы, полученные Ю. И. Гальпериним с помощью спектрографов, указывают, что водородная эмиссия чаще всего присутствует в спектрах, в которых преобладают атомарные эмиссии, и она относительно реже заметна в спектрах с сильно развитыми молекулярными эмиссиями. Не исключено, что в ряде случаев она теряется только вследствие сильного блендирования, а не в результате функционального отсутствия в молекулярных спектрах. О. Л. Вайсберг обратил внимание, что во время появления водородной эмиссии в слабых полярных сияниях между всеми эмиссиями, по-видимому, существует линейная зависимость интенсивности. Мы увидим, что эта особенность присуща высотным полярным сияниям и, скорее всего, указывает на преимущественное появление водородной эмиссии на больших высотах. Однако водородная эмиссия не является неотъемлемой компонентой атомарных спектров. На многих из них она полностью отсутствует.

По многочисленному материалу, полученному с помощью спектрометра, О. Л. Вайсберг установил, что в полях с водородной эмиссией отношение интенсивности мейнеловской системы N_2^+ к интенсивности первой положительной системы молекулярного азота почти в полтора раза меньше, чем в аналогичных диффузных эмиссионных полях без водородной эмиссии. С другой стороны, эмиссия ионизованного атома азота около $5004 \text{ \AA}$ при аналогичных сопоставлениях в большинстве случаев в полтора раза больше. Этим и ограничивается отличие спектров полярных сияний с водородной эмиссией от спектров, в которых эти эмиссии отсутствуют. В этом нет ничего удивительного, поскольку и в лабораторных спектрах

наблюдается аналогичная картина ⁵⁸. В настоящее время затруднительно оценить степень блендирования эмиссий, вызываемых протонами, эмиссиями за счет других агентов. Однако отсутствие отчетливой зависимости водородной эмиссии от других эмиссий в полях с водородной эмиссией, несомненно, указывает на наложение эмиссий, возбуждаемых за счет различных механизмов.

На многочисленном материале Ю. И. Гальперин с помощью спектрографов и О. Л. Вайсберг с помощью спектрометра установили, что спектры диффузных полярных сияний в видимой области без водородной эмиссии не отличаются от спектров их других резко очерченных форм. Отметим, что имеются в виду только полярные сияния в не освещенных Солнцем частях верхней атмосферы. Единственное исключение составляют полярные сияния с аномально усиленной красной эмиссией кислорода 6300 Å. Эта эмиссия становится в них на порядок и даже на несколько порядков величины больше по сравнению, например, с зеленой эмиссией кислорода 5577 Å. Обычно этими сияниями являются яркие красные верхушки лучей, пятна, поверхности, цвет которых хорошо заметен невооруженным глазом. Будем условно называть тип их спектров нулевым.

Все остальные спектры, независимо от вида светящихся образований, могут быть условно подразделены на три типа, между которыми, однако, не существует резких градаций. К первому типу следует отнести те спектры излучения ночного неба, в которых замечается усиление в несколько раз красной эмиссии кислорода 6300 Å и коррелирующей с ней зеленой эмиссии азота 5200 Å. При этом в ультрафиолетовой области появляются полосы ионизованной молекулы азота. Соответствующий тип полярных сияний чаще всего наблюдается в низких широтах. В следующем, втором типе спектров наблюдается много эмиссий нейтральных и ионизованных атомов и, кроме того, появляются следы эмиссий ионизованной и нейтральной молекул азота в видимой области. Полярные сияния с такими спектрами часто наблюдаются не только в низких, но и в высоких широтах. Наконец, последний, третий тип характерен многочисленными интенсивными молекулярными полосами. Весьма примечательно, что в таких спектрах зеленая эмиссия кислорода 5577 Å, эмиссии первой и второй положительных и отрицательных систем молекулярного азота взаимно коррелируют. Соответствующие им полярные сияния наиболее часто появляются в высоких широтах.

Различие между описанными спектрами, по-видимому, объясняется глубиной проникновения возбуждающего агента в атмосферу. Первый тип спектров соответствует наиболее высоким областям атмосферы с преимущественно диссоциированными кислородом и азотом, второй тип — областям, где содержание молекулярного азота возрастает, и третий — более низким областям, где азот находится в молекулярном состоянии. Во время очень низких и интенсивных форм в спектрах появляются следы полос ионизованной молекулы кислорода.

Во избежание недоразумений необходимо сделать несколько замечаний о нижней красной кромке полярных сияний. Следы эмиссии ионизованной молекулы кислорода очень слабы и не могут объяснить не вызывающей сомнений визуальной окраски нижних частей таких сияний. Поскольку среднее время жизни исходного состояния атомарного кислорода для зеленой эмиссии (около 1 сек) много больше среднего времени жизни исходных состояний молекулярного азота для эмиссий первой положительной системы (около 10^{-6} сек), зеленая эмиссия ниже 100 км будет неизбежно гаситься частыми соударениями, подобно тому как гасится в более высоких областях красная эмиссия кислорода со средним временем жизни исходного состояния 100 сек. Это хорошо подтверждается полученными

Ю. И. Гальпериным фотографиями спектров нижней границы образований полярных сияний с экспозициями 10—30 сек.

В спектрах полярных сияний молекулярного типа всегда имеются атомарные эмиссии, хотя их относительная интенсивность невелика. Иногда над полярными сияниями со спектрами третьего типа появляются на некоторое время (от минут и более), или существуют одновременно, интенсивные сияния со спектрами нулевого, первого и второго типов. Такие надстройки в структурах особенно наглядно заметны в лучистых формах полярных сияний. Они свидетельствуют, что траектория проникновения возбуждающего агента одинакова как для нижних, так и для верхних частей лучистых структур и что наблюдаемая интенсивная надстройка в структуре сияния создается лишь менее глубоко проникающим агентом.

Полярные сияния, не сопровождаемые водородной эмиссией, несомненно, вызываются электронами. Нижняя граница полярных сияний указывает толщину атмосферы, которую могут преодолевать эти электроны. Таким образом, минимальная энергия наиболее глубоко проникающих электронов в обычных полярных сияниях может быть оценена как 10 кэв или несколько меньше. Следует, однако, отметить, что глубина проникновения электронов более высоких энергий может регулироваться углом вектора их скорости относительно геомагнитной силовой линии. В этом случае надстройка в структуре полярного сияния могла бы быть отнесена за счет возникновения аномалии в распределении направлений движения электронов относительно геомагнитной силовой линии.

В. С. Прокудина^{14,15}, Н. В. Джорджио¹⁶ и, в особенности, О. Л. Вайсберг заметили интересную зависимость между некоторыми незапрещенными атомарными эмиссиями азота и кислорода, а также не особо интенсивной красной эмиссией кислорода 6300 Å, с одной стороны, и зеленой эмиссией кислорода 5577 Å и эмиссиями первой и второй положительных и отрицательных систем молекулярного азота, с другой стороны. В спектрах первого типа обнаруживается линейная корреляция между всеми указанными эмиссиями. В спектрах третьего типа характерно относительное уменьшение интенсивности первой группы эмиссий относительно второй с возрастанием суммарной интенсивности полярного сияния. При этом все эмиссии второй группы линейно коррелируют между собой. Хотя разброс истинных значений относительно средних заключается в пределах величины одного порядка, все же средние отношения интенсивности красной эмиссии атомарного кислорода 6300 Å к интенсивности его зеленой линии 5577 Å уменьшаются с 5 до 0,05, когда абсолютная интенсивность эмиссии 5577 Å возрастает с $5 \cdot 10^3$ до 10^5 *релев* соответственно. Имеются намеки, что атомарные эмиссии азота по сравнению с атомарными эмиссиями кислорода с усилением интенсивности полярного сияния изменяются в различной степени. Закономерности в спектрах второго типа средние между закономерностями первого и третьего типов.

Независимо от происхождения, обнаружение нелинейной зависимости между суммарной интенсивностью полярного сияния и относительными интенсивностями некоторых атомарных эмиссий открывает возможность приблизительной оценки в пасмурную погоду поверхностной яркости наиболее эффективных образований полярных сияний. Это, несомненно, имеет большое значение для дальнейших массовых наблюдений за полярными сияниями. Дополнительным ориентиром в интенсивности может быть также мало изменяющаяся во время полярных сияний натриевая эмиссия и полосы ОН.

В настоящее время отсутствует общепринятое объяснение такой зависимости. Однако не исключена возможность объяснения постоянства

средних относительных интенсивностей зеленой линии кислорода $5577 \text{ \AA}$ и полос первой и второй положительных и отрицательных систем молекулярного азота хорошей перемешиваемостью атмосферы, а следовательно, и постоянством ее относительного состава в области наиболее интенсивного излучения полярных сияний на высотах около 100 км . В этом случае, по мере проникновения потока корпускул вниз, число возбуждаемых атомов и молекул увеличивается из-за возрастания плотности атмосферы, но относительное возбуждение различных состояний с высотой не изменяется. Ослабление внизу красной эмиссии кислорода $6300 \text{ \AA}$ объясняется существенным увеличением там частоты дезактивирующих соударений, поскольку среднее время жизни исходного состояния для этой эмиссии около 100 сек . Ослабление с уменьшением высоты эмиссии ионизованных атомов азота около $5004 \text{ \AA}$ и кислорода около $8446 \text{ \AA}$, по-видимому, указывает на уменьшение книзу степени диссоциации молекулярного азота и кислорода. Если исходить из излагаемых здесь представлений, то большая часть возникающей внизу эмиссии атомарного кислорода $5577 \text{ \AA}$ не может возбуждаться непосредственно за счет соударения корпускул с атомами кислорода. Если бы имел место такой механизм, то эта эмиссия увеличивалась бы с увеличением зеленой эмиссии кислорода $8446 \text{ \AA}$, удовлетворительно коррелирующей с эмиссией ионизованных атомов азота, возникающей в высокой области практически полностью диссоциированной атмосферы. Поэтому для согласования объяснения с наблюдаемой картиной следует предположить, что эмиссия $5577 \text{ \AA}$ внизу возбуждается главным образом за счет соударений корпускул с молекулами кислорода, при которых эта молекула диссоциирует на невозбужденный и возбужденный атом или пару возбужденных атомов кислорода, в то время как эмиссии 5004 и $8446 \text{ \AA}$ возбуждаются корпускулами при соударении с атомами азота и кислорода соответственно. При этом эмиссия кислорода $5577 \text{ \AA}$ возбуждается менее эффективно, чем указанные эмиссии 5004 и $8446 \text{ \AA}$.

Следует также отметить, что с излагаемой точки зрения корреляция между зеленой эмиссией кислорода $5577 \text{ \AA}$ и его инфракрасной эмиссией $8446 \text{ \AA}$ в высотных спектрах первого типа указывает на постоянство относительного состава в области полной диссоциации молекул атмосферного газа на больших высотах, выше 200 км .

По поводу инерционности свечения полярных сияний следует отметить, что наблюдаемое послесвечение имеется только для малоинтенсивной зеленой эмиссии атомарного азота $5200 \text{ \AA}$, красной эмиссии атомарного кислорода $6300 \text{ \AA}$ и, в меньшей степени, его зеленой эмиссии $5577 \text{ \AA}$. Однако их послесвечение полностью объясняется средним временем жизни состояний, являющихся для них исходными. Ни в одной из остальных запрещенных интенсивных эмиссий полярных сияний не было пока обнаружено следов послесвечения. Как известно, среднее время жизни рекомбинационного свечения определяется обратной величиной произведения электронной концентрации на коэффициент рекомбинации. Поскольку в полярных сияниях электронная концентрация обычно близка к 10^6 см^{-3} , а коэффициент рекомбинации едва ли может быть больше $10^{-8} \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}$, то рекомбинационное свечение должно иметь длительность не меньшую 100 сек . Отсюда можно сделать очень существенный вывод, что все основные мощные эмиссии полярных сияний в доступной для современных средств исследования области спектра появляются только в результате ударного возбуждения корпускулами и не имеют ничего общего с рекомбинационным свечением ионосферы.

Ф. К. Шуйская^{17,18} обнаружила, что с увеличением широты места наблюдения относительная населенность верхних колебательных уровней состояния $C^3\Pi$ молекулы азота, исходных для излучения второй положительной системы молекулярного азота, в среднем возрастает. Дополнительно Ю. И. Гальперин и М. А. Лаврова показали, что и в случае атомарных эмиссий с увеличением широты места наблюдения относительная населенность верхних уровней излучающих атомов также в среднем возрастает.

Поскольку в высоких широтах более часто наблюдаются низкие яркие образования полярных сияний, а в низких широтах — их более высокие образования или верхушки образований высокоширотных областей, то напрашивается вывод о том, что либо вверх, по сравнению с низкими областями, или над низкими широтами, по сравнению с высокими широтами, преобладают в среднем менее энергичные корпускулы, либо энергия корпускул увеличивается с уменьшением высоты или возрастанием широты места наблюдения. Выше упоминалась возможность объяснения появления протяженных вверх надстроек образований полярных сияний за счет аномалий в угле вектора скорости корпускул к геомагнитной силовой линии без изменения их жесткости. Однако наблюдаемая картина не подтверждает осуществления такой возможности, поскольку верхние участки полярных сияний обусловлены иным, мягким возбуждением.

С помощью непрерывной автоматической электрофотометрии Н. В. Джорджио^{2,19} установил, что ход изменения во времени красной эмиссии атомарного кислорода $6300 \text{ \AA}$, с одной стороны, и других излучений, с другой стороны, иногда совершенно не согласуются даже за промежутки времени, существенно превышающие среднее время жизни исходного состояния для эмиссии $6300 \text{ \AA}$, т. е. около 100 сек . Однако интенсивности всех остальных интенсивных эмиссий изменяются синхронно даже за очень малые промежутки времени: для зеленой линии кислорода $5577 \text{ \AA}$ — до 1 сек , и для остальных эмиссий — за еще меньшие промежутки времени. Во время интенсивного мерцания полярных сияний, наиболее характерного в конечной стадии их проявления, отчетливо наблюдаются отдельные, обычно неритмические всплески и ослабления излучения с длительностями, иногда даже меньшими десятых долей секунды, наступающие через значительно большие интервалы времени. При этом форма изменений интенсивности носит очень сложный, и как правило, не гармонический характер. Только при очень частых мерцаниях появляется наметка на регулярность. Все это указывает, что наблюдаемые быстрые колебания интенсивности едва ли отображают гармонические колебания геомагнитного поля внешней атмосферы. Еще в 1958 г. мы указывали на возможность генерации жестких электронов за счет таких колебаний геомагнитного поля^{20,21}. Однако материал Н. В. Джорджио скорее всего указывает на обратное, а именно, на появление короткопериодных вариаций этого поля за счет неравномерного притока корпускулярных потоков. Короткопериодные вариации геомагнитного поля и мерцание интенсивности полярных сияний появляются в конечной стадии их развития и не несут в себе преобладающей энергии полярного сияния или геомагнитного возмущения в целом. Кроме того, весьма маловероятно, чтобы энергия короткопериодных геомагнитных колебаний могла преобразовываться с большим коэффициентом полезного действия в кинетическую энергию заряженных частиц очень большой величины.

Поскольку во время мерцания синхронные изменения хода интенсивности сохраняются для эмиссий с исходными уровнями с сильно различающимися энергиями возбуждения, например, около 4 эв для зеленой эмиссии кислорода и 20 эв для полос ионизированной молекулы азота, то они

не могут возникать за счет вариаций энергии корпускул в области энергий порядка потенциалов возбуждения указанных выше исходных уровней. В этом случае всплески излучения с более высоких уровней были бы кратковременнее всплесков излучения с более низких уровней, чего в действительности не наблюдается.

Поэтому модулирующим агентом не могут быть не особенно энергичные электроны магнитно-гидродинамических волн с энергией около сотых и десятых долей $эв$, которыми привлекательнее всего было бы объяснить описанные мерцания полярных сияний. В принципе возможны два варианта модуляции интенсивности. Во-первых, мыслимо появление значительных переменных электродвижущих сил, замедляющих или увеличивающих скорость вызывающих эмиссию электронов с энергиями в несколько $кэв$. В этом случае модуляция свечения создавалась бы за счет изменения глубины проникновения таких электронов из-за некоторого изменения эффективного сечения взаимодействия с атомами и молекулами атмосферы. Изменение глубин проникновения корпускул при мерцаниях полярного сияния, по-видимому, действительно наблюдается. Поскольку красная эмиссия кислорода $6300 \text{ \AA}$ гасится сильнее в более плотных областях атмосферы, можно было бы попытаться объяснять таким способом некоторую иногда наблюдаемую противофазность в изменениях этой и других эмиссий. Во-вторых, причиной модуляции интенсивности полярного сияния могло бы явиться появление временных мелкомасштабных неоднородностей в геомагнитном поле за счет магнитно-гидродинамических волн, или магнитных полей, вмороженных в корпускулярные потоки, вторгающиеся в земную атмосферу извне. Такие кратковременные геомагнитные аномалии, действуя подобно реле, будут увеличивать высыпание вниз большого количества геоактивных корпускул из внешней атмосферы Земли. В этом случае мыслимо не только высыпание непрерывно вторгающихся не особенно жестких корпускулярных потоков и уменьшение их отражения в геомагнитном поле, но и высыпание более жестких заряженных частиц, накопленных в этом поле. В последнем случае, одновременно с усилением яркости полярного сияния, следовало бы ожидать увеличения поглощения радиоволн в нижних частях ионосферы, например, в слое D за счет ионизации атмосферы проникающими туда непосредственно очень энергичными корпускулами, или рентгеновским излучением, возникающим несколько выше при бомбардировке атмосферы энергичными электронами в несколько десятков $кэв$ ²². Поскольку поток энергии очень жестких частиц из геомагнитной ловушки невелик, его действие не может проявляться в увеличении интенсивности полярного сияния.

Неоднородности в геомагнитном поле, несомненно, существуют и при отсутствии мерцаний, например, когда появляются подвижные лучистые формы полярных сияний. В этом случае электрические токи отдельных лучиков создают перемещающиеся мелкие магнитные неоднородности, которые также могут благоприятствовать высыпанию заряженных частиц из более удаленных областей геомагнитного поля. Иногда проекция лучистой дуги на поверхность Земли становится синусоидальной. Волны такой драприобразной полосы движутся иногда в восточном, а иногда в западном направлении, сохраняясь в течение минут и десятков минут. Когда драпри находится вблизи зенита, обычно представляясь корональными формами, то перемещающиеся дискретные электрические токи его лучей будут наиболее эффективно индуцировать внизу в земной поверхности устойчивые короткопериодические электродвижущие силы и токи.

Б. П. Потапов, Э. Ц. Раппопорт и Т. Б. Борсук ²³ действительно обнаружили, что на частоте 31 Мгц интенсивное поглощение космического радиоизлучения, свидетельствующее об увеличении ионизации в слое D ,

наступает во время появления в зените интенсивных подвижных лучистых форм на небольших высотах. Максимальное поглощение запаздывает относительно максимальной яркости полярного сияния в зените на 1—10 мин. Такое запаздывание однозначно указывает, что корпускулы, вызывающие полярное сияние, и жесткие заряженные частицы из геомагнитной ловушки, обуславливающие ионизацию в слое D , не идентичны. Дополнительным подтверждением этого является также отсутствие столь интенсивного поглощения в слое D при большинстве других форм полярных сияний, кроме низких подвижных лучистых форм.

Поскольку до сих пор рассматривались вариации интенсивностей эмиссий, не связанных с водородной, т. е. эмиссий, возбуждаемых электронами, небезынтересно было бы сопоставить кратковременные вариации этих эмиссий с такими же вариациями водородной эмиссии. О. Л. Вайсберг провел такое сопоставление и нашел, что колебания интенсивности водородной и других эмиссий не совпадают. Это дает дополнительные возможности для определения механизма модуляции интенсивности полярного сияния.

Независимое поведение красной эмиссии кислорода $6300 \text{ \AA}$, сопровождаемое в некоторых случаях увеличением ее интенсивности на несколько порядков, делало наиболее привлекательным ее объяснение за счет возбуждения атомов кислорода тепловыми электронами. Т. М. Мулярчик^{24,25,26} с помощью интерферометра доказала, что температура, оцениваемая по ширине спектральной линии $6300 \text{ \AA}$ в области красных форм, действительно резко возрастает во время интенсивных полярных сияний, достигая в некоторых случаях 3500° K , в то время как в обычных сияниях она оценивается приблизительно 1000° K . Повышение температуры в области полярных сияний замечается и по излучению других эмиссий, возникающих на меньших высотах, но в этом случае оно не достигает тех значений, которые характерны для области возникновения красной кислородной эмиссии $6300 \text{ \AA}$. Однако расчеты показали, что даже увеличение температуры верхней атмосферы до наблюдаемой температуры недостаточно, чтобы объяснить наблюдаемое возрастание интенсивности красной эмиссии кислорода $6300 \text{ \AA}$. Ю. И. Гальперин предполагает, что это обстоятельство свидетельствует о более высокой электронной температуре, чем температуре нейтральных атомов кислорода, т. е. об отсутствии там термодинамического равновесия.

Доказательство сильного разогрева верхней атмосферы во время полярных сияний имеет огромное значение для физики верхней атмосферы. При указанных выше температурах становится существенной диссипация из атмосферы нейтральных атомов и молекул. Кроме того, при таких температурах ионизованные частицы будут проникать по всей длине геомагнитных силовых линий и образовывать вдоль них плотные волокна ионизованного газа. Это создает в экзосфере ранее непредвиденную ситуацию и новые условия как для распространения магнитно-гидродинамических волн, так и для проникновения к Земле различных корпускул и внешних магнитных полей. Увеличение высоты однородной атмосферы во время полярных сияний объясняет существование лучей большой протяженности со сравнительно равномерным распределением яркости по высоте.

До сих пор рассматривались только не освещенные Солнцем полярные сияния. Однако при освещении их солнечной радиацией появляются дополнительно весьма интенсивные флуоресцентные эмиссии. Аналогично многим другим исследователям, Ф. К. Шуйская^{17,18} определяла колебательную температуру флуоресцентных полос первой отрицательной системы молекулярного азота. Как и с помощью интерферометра, ею была

зарегистрирована в верхней атмосфере во время полярных сияний очень высокая температура.

Во время освещенных Солнцем полярных сияний, в особенности над низкоширотными районами, очень наглядно наблюдается проникновение вверх флуоресцирующих ионизованных молекул азота, сначала в виде отдельных узких волокон, а затем более обширных образований. Это является непосредственным доказательством расширения верхней атмосферы во время полярных сияний.

Однако наиболее интересным было открытие в красных освещенных Солнцем полярных сияниях инфракрасной эмиссии гелия $10830 \text{ \AA}$ с интенсивностью более 10^4 *релеев*. Впервые о появлении этой эмиссии без объяснения ее природы, о которой еще ничего не было известно, сообщено в краткой заметке А. В. Миронова, В. С. Прокудиной и Н. Н. Шефова⁸ в 1958 г. Вначале, однако, мы относились с большой осторожностью к единственному наблюдению инфракрасной гелиевой эмиссии $10830 \text{ \AA}$. Наиболее непонятным был механизм появления такой эмиссии. Многочисленные систематические наблюдения Н. И. Федоровой^{27,28} в Лопарской в течение последних лет исключают любые сомнения в реальности этой инфракрасной эмиссии гелия в красных освещенных Солнцем полярных сияниях. К тому же теперь Н. Н. Шефов^{29,30} нашел убедительное объяснение этой эмиссии как флуоресценции в солнечном излучении метастабильного состояния гелия 2^3S . Детальный анализ показал, что метастабильные атомы гелия в таком состоянии могут эффективно появляться только при соударениях нейтральных атомов гелия в основном состоянии с электронами с энергией около 25 эв . Поэтому в области красных полярных сияний должно присутствовать не только много электронов с энергией около 2 эв , необходимых для возбуждения красной кислородной эмиссии $6300 \text{ \AA}$, но и очень много электронов с энергией около 25 эв , поскольку концентрация гелия в верхней атмосфере не может быть слишком высокой. Вполне возможно, что электроны с энергиями около 25 эв образуют независимую группу геоактивных корпускул, вызывающую красные полярные сияния. Однако электроны с энергией около 25 эв могут также появляться в верхней атмосфере в результате ее ионизации обнаруженными нами с помощью третьего искусственного спутника мощными потоками электронов с энергией около 10 кэв ^{20,21,31}. Таким образом, наблюдение гелиевой эмиссии в наземных условиях открывает новые возможности для регулярного исследования гелия верхней атмосферы, а также мощных потоков геоактивных электронов. Н. Н. Шефов разработал исчерпывающую теорию гелиевой эмиссии и предсказал, что она должна регулярно наблюдаться в сумеречном свечении атмосферы, хотя и с несколько меньшей интенсивностью. В этом случае за счет солнечных эмиссий гелия $537,1$ и $584,4 \text{ \AA}$ сначала возбуждаются синглетные состояния гелия. Затем атомы гелия в таком состоянии дезактивируются излучением и частично спускаются на самое низкое возбужденное синглетное состояние 2^1S , из которого при соударениях с тепловыми электронами переходят в состояние 2^3S . В настоящее время он доказал свой прогноз непосредственными наблюдениями³². Интенсивность сумеречной эмиссии гелия достигает 10^3 *релеев*, т. е. эта эмиссия является одной из мощнейших сумеречных эмиссий. П. В. Щеглов³³ получил дополнительное подтверждение этому прогнозу, осуществив регулярную фоторегистрацию этой эмиссии в сумерках в виде колец с помощью фотоконтактных трубок, узкополосных фильтров и интерферометров. Поскольку интенсивность сумеречной эмиссии гелия отображает интенсивность солнечных резонансных эмиссий гелия $537,1$ и $584,4 \text{ \AA}$, то трудно переоценить

научное и практическое значение этого замечательного открытия для регулярной службы верхней атмосферы и солнечной активности.

Как известно, иногда яркие тонкие лучи полярных сияний, даже в их нижних частях, приобретают с какой-либо одной стороны красно-оранжевую окраску. Хотя реальность такой окраски не вызывает сомнений, тем не менее с помощью современных средств еще не удалось найти какое-либо различие в спектрах таких образований и обычных лучей с беловато-зеленоватой окраской. В нашем докладе на съезде Союза геодезии и геофизики в Торонто в 1957 г. это явление было описано как «флюгер-эффект»³⁴. Оно появляется, когда имеется относительное движение пучка корпускул и атмосферы, причем совершенно безразлично, что именно покоится — пучок или атмосфера. При бомбардировке воздуха корпускулами быстрее всего начинают высвечиваться в видимой области малоинерционные эмиссии первой положительной системы молекулярного азота, имеющие красно-оранжевую окраску (среднее время жизни исходного состояния около 10^{-6} сек). Однако свечение более инерционной зеленой эмиссии кислорода 5577 Å (среднее время жизни исходного состояния около 1 сек) запаздывает на время около одной секунды. Поэтому участок атмосферы, в данный момент пересекающий пучок корпускул, светится красно-оранжевым цветом, а участки, уже пересекавшие его, — зеленоватым. Вследствие небольшого углового расстояния между сторонами подвижного луча, неразрешаемого по высоте щели нашими современными спектральными приборами, различное излучение нивелируется. Например, при обычных относительных скоростях атмосферы относительно пучка корпускул около сотен метров в секунду расстояние между разноцветными частями тонкого лучика равняется приблизительно сотне метров. Нам неоднократно также удавалось наблюдать беспорядочную игру окрасок лучей, которая свидетельствовала об очень сложной и запутанной циркуляции верхней атмосферы, возможно даже вихревых движений. Явление «флюгер-эффекта» поддается отчетливому наблюдению только тогда, когда наступает очень четкая фокусировка отдельных лучиков и оно плохо замечается в случае образований без резко очерченных границ. При усовершенствовании разрешающей способности и чувствительности регистрирующих спектральных приборов «флюгер-эффект» открывает богатые возможности для исследования циркуляции верхней атмосферы, поскольку скорость движения пучка корпускул относительно наблюдателя может быть определена и затем учтена при определении истинного движения верхней атмосферы. Особенно интересным представляется наблюдение за «флюгер-эффектом» не только в зеленой, но и в красной эмиссии кислорода 6300 Å, или в зеленой эмиссии азота 5200 Å, среднее время жизни исходных состояний которых много больше. В этом случае разделение разных свечений будет наблюдаться на значительно больших расстояниях.

При просмотре имеющихся в нашем распоряжении фотографий полярных сияний были обнаружены очень странные образования (рис. 1). Они как бы возникли при пронизывании пучками корпускул облаков более интенсивно реагирующей на корпускулы атмосферы. Поскольку погода во время описываемого полярного сияния была безоблачной, реальность сфотографированной структуры не вызывает сомнения. В коллекции наших фотографий удалось также найти много снимков, на которых в лучистых дугах на всех лучах вдоль общей монотонной границы наблюдался резкий скачок интенсивности на их нижних частях (рис. 2). Соответствующие им сияния полностью находились в земной тени.

Описанные формы полярных сияний пока поддаются объяснению только беспорядочной или упорядоченной циркуляцией некоторых слоев

верхней атмосферы, вследствие которой вниз проникает сильно диссоциированный воздух с атомарным азотом, в котором не могут возникать интенсивные молекулярные эмиссии. Интенсивные молекулярные эмиссии появляются в облаках или нижнем массиве малодиссоциированного воздуха с большим содержанием молекулярного азота. Поскольку толщина области скачков интенсивности всегда много меньше высоты однородной атмосферы, то соответствующие им большие градиенты в аллотропическом составе могут сохраняться только во время интенсивной циркуляции и невозможны в спокойной атмосфере. По-видимому, дальнейшее наблюдение описанных разновидностей полярных сияний расширит возможности исследования процессов циркуляции и перемешивания верхней атмосферы в зоне полярных сияний

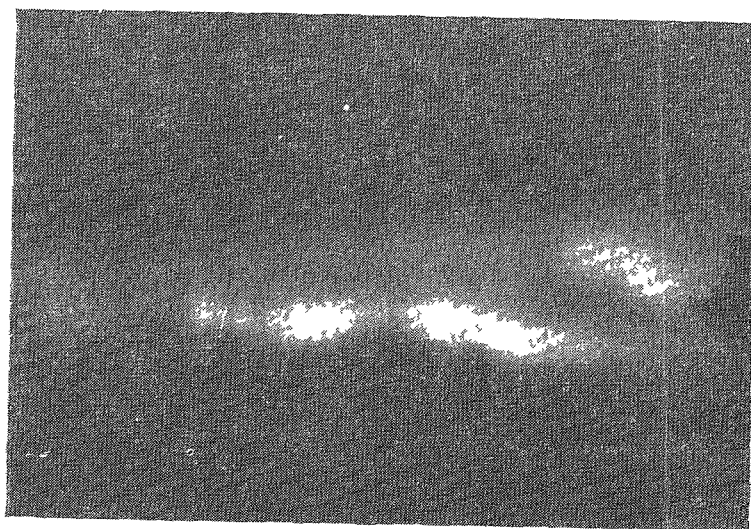


Рис 1 Полярное сияние в Лопарской на севере в 21 00 местного времени 21 ноября 1957 г

Ознакомившись с явлениями, связанными с циркуляцией верхней атмосферы, приходится отметить, что они не играют основной роли в большинстве полярных сияний. По-видимому, циркуляция в верхней атмосфере в районе полярных сияний, создаваемых корпускулами, невелика. В противном случае она легко бы обнаруживалась по интенсивному «флюгер-эффекту». В принципе допустимо ускорение заряженных частиц за счет динамо-эффекта вне областей с корпускулярными потоками, например, в низких широтах, если в этом процессе будут появляться только частицы с энергиями, не достигающими порога возбуждения состояний, исходных для эмиссий первой и второй положительных и отрицательных систем молекулярного азота. Таким образом, можно было бы попытаться объяснить возрастание интенсивности некоторых характерных эмиссий в спектрах полярных сияний нулевого и первого типов, типа без следов эмиссий молекулярных полос азота. Присутствие в верхней атмосфере электронов с энергиями, превышающими 7 эв, не могло бы остаться незамеченным вследствие появления этих характерных эмиссий, обычно отсутствующих в излучении ночного неба. Пока остается не ясной природа красных дуг в экваториальных районах. Поскольку магнитные аномалии в области проявления динамо-эффекта могут привести к высыпанию из геомагнитной ловушки заряженных час-

тиц высокой энергии, то обнаружение таких частиц над этими дугами с помощью искусственных спутников еще не может служить безупречным доводом против возникновения красных экваториальных дуг за счет динамо-эффекта⁵⁶.

Теперь напомним еще об одном явлении, замеченном в Лопарской при быстром проектировании аскафилмов. Оно уже кратко описывалось в печати еще в 1957 г. до начала МГГ²² и в нашем докладе на съезде Международного союза геодезии и геофизики в Торонто в 1957 г.³⁴: «В предыдущие годы визуальные наблюдения в Лопарской позволили сделать предположение о существовании крупномасштабных вихревых движений светящихся образований полярных сияний. В конце 1956 г. при помощи кинофильмов, снятых на 180-градусных камерах, удалось подтвердить это предположение. Можно даже сказать, что к концу 1956 г. еще не наблюдалось иной картины развития полярных сияний. Развитие светящихся образований, начинающееся обычно со спокойной дуги, происходит по эллипсоидальной спирали, большая ось которой имеет размеры в сотни и тысячи километров. Со временем в эллипсах, вытянутых по магнитной параллели, увеличивается малая ось. В последующих стадиях развиваются лучистые формы, переходящие затем в диффузные пульсирующие сияния».

Иногда структура и яркость полярного сияния претерпевают столь быстрые и неправильные изменения, что концентрические движения удается заметить только при очень быстром проектировании аскафилмов. Нагляднее всего движения световых образований наблюдаются в лучистых дугах с тонкими лучиками. Каждый такой отдельный лучик вспыхивает, перемещается и затухает. Эта картина тем отчетливее, чем резче фокусировка отдельных лучиков. Движения во время магнитных бурь носят очень сложный и запутанный характер. Более четкая картина прослеживается в кратковременных полярных сияниях в магнитно спокойные дни. В лучистых подковках, спиральных и более сложных образованиях движения совершаются как по часовой стрелке, так и в противоположном направлении. Иногда рядом наблюдается несколько таких образований с круговыми движениями в различных направлениях. Вполне возможно, что драпри являются одной из разновидностей движений по изломанной траектории. Иногда движения совершаются по очень сплюснутой спирали. Когда петля такой спирали находится за горизонтом, две части одной петлеобразной лучистой дуги могут быть приняты

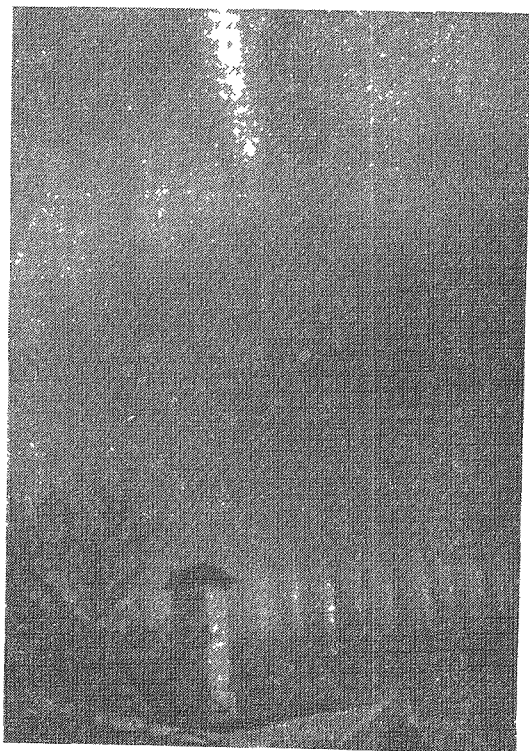


Рис. 2 Полярное сияние в Лопарской на юге в местную полночь 25—26 ноября 1958 г

за самостоятельные образования. В южных районах, например, в Звенигороде, аналогичных движений по изломанному пути не наблюдалось. Однако и здесь оно совершалось как в западном, так и в восточном направлениях. Весьма интересно отметить, что центры некоторых образований полярных сияний с концентрическими движениями длительное время остаются в неизменном положении. Здесь, конечно, имелись в виду только резко очерченные формы полярных сияний. Диффузные образования, на фоне которых появляются эти формы, имеют более непрерывное строение по долготе.

Поскольку преобладающая доля наблюдаемого излучения полярных сияний создается потоками не особенно жестких электронов из внешних частей атмосферы, то возможно, что дрейф световых образований отображает дрейф этих потоков в изменяющемся во времени и пространстве геомагнитном поле. Скорости дрейфа, равновероятные как в восточном, так и западном направлениях, достигают $\text{км} \cdot \text{сек}^{-1}$, если относить полярное сияние к высоте 100 км. Такие скорости превышают максимальные скорости любых возможных в верхней атмосфере ветровых движений. Если такие дрейфующие частицы проходят через экваториальную плоскость, то в этой плоскости скорость дрейфа будет соответственно больше.

Если это действительно дрейф не особенно энергичных электронов, вызывающих полярные сияния, то следует отметить, что он не совершается только вдоль магнитных параллелей в восточном направлении, как это стали считать за последнее время, по аналогии с дрейфом энергичных электронов в так называемых радиационных поясах. В действительности не существует определенного направления дрейфа. Наблюдаемая картина легче всего объясняется дрейфом электронов, вызывающих полярные сияния, в произвольных неоднородностях внешней части изменяющегося во времени и пространстве геомагнитного поля, среди которых имеются области как с усиленной, так и с ослабленной интенсивностью этого поля. Только в этом случае и будет возможен дрейф в различных направлениях. Поскольку энергия электронов, вызывающих полярное сияние, около 10 кэв и меньше, то даже в невозмущенном симметричном геомагнитном поле потребуется почти 10 и более суток, чтобы эти электроны, находясь на магнитных силовых линиях 67° геомагнитной широты, могли совершать один оборот вокруг Земли. Вполне очевидно, что среднее смещение на восток за несколько часов будет составлять только несколько градусов или меньше. В свете этого становится понятной малая подвижность центров концентрического дрейфа. Электроны, вызывающие какое-либо образование полярных сияний, высыпаются гораздо скорее, чем совершают значительное дрейфовое движение в геомагнитном поле. Совершенно очевидно, что такие электроны не могут создать концентрической зоны вокруг Земли. За время своего существования они будут образовывать только волокна вдоль геомагнитной силовой линии. Не удивительно поэтому, что полярные сияния имеют по долготе сильно изменчивые интенсивность и структуру.

Особое внимание привлекает отмеченная выше долготная равномерность водородной эмиссии. Создается впечатление, что эта равномерность не может быть объяснена полностью только несовершенством наблюдений и диффузной размытостью полей водородной эмиссии за счет процессов перезарядки протонов. Для выяснения этого вопроса потребуются дальнейшие более прецизионные наблюдения. Однако вполне возможно, что отмеченная равномерность связана с большей скоростью дрейфа первичных протонов, если они первоначально имеют более высокую энергию, чем наблюдаемые излучающие атомы водорода. Большой ларморов-

ский радиус таких первичных протонов мог бы обеспечивать также меньшую зависимость их дрейфа от неоднородностей магнитного поля.

В свете вышеизложенного становится очевидным, что радиационные пояса могут появляться только за счет быстро дрейфующих заряженных частиц высокой энергии. Однако эти частицы существенной роли в явлении полярного сияния не играют, поскольку их суммарная мощность незначительна.

Размер неоднородностей магнитного поля, определяющих дрейф электронов, вызывающих полярное сияние, может быть оценен по размерам петель полярных сияний, показанных на рис. 3 и 4. В экваториальной плоскости, в местах пересечения ею геомагнитных силовых линий из зоны полярных сияний, размер неоднородностей будет в несколько раз больше, чем у наблюдаемых петель, т. е. будет достигать тысячи километров. Однако очень высокая скорость дрейфа, во много раз превышающая скорость дрейфа тех же электронов в невозмущенном геомагнитном поле, свидетельствует, что градиенты напряженности магнитного поля неоднородностей существенно превышают градиенты напряженности нормального геомагнитного поля. Как известно³⁵, скорость дрейфа в неоднородном магнитном поле v в $\text{см} \cdot \text{сек}^{-1}$ может быть представлена как

$$v \sim E \frac{c}{e} \frac{\nabla}{H^2}.$$

где E — энергия электрона в эргах, c — скорость света в $\text{см} \cdot \text{сек}^{-1}$, e — заряд электрона в CGSE, H — напряженность магнитного поля в эрстедах CGSM и ∇ — градиент той же величины в той же системе единиц. При $E \sim 10$ кэв, когда в экваториальной плоскости $v \sim 10^6$ $\text{см} \cdot \text{сек}^{-1}$ и $H \sim 10^3$ э, $\nabla \sim 10^{12}$ э·см⁻¹. При тысячекilометровой неоднородности общее изменение напряженности магнитного поля будет достигать 10^{-4} э.

Магнитные поля такой интенсивности, ожидаемой и ранее⁵⁹, уже зарегистрированы в корпускулярных потоках Солнца⁶⁰. Поэтому появление указанных выше неоднородностей можно пытаться связывать, как это мы предполагали и ранее, с магнитными полями, вмороженными в потоки первичных корпускул^{21,31}. В этих полях могут также переноситься из Солнца более энергичные электроны и протоны, чем у основной массы частиц этих потоков. Сгустки корпускул, сцементированные магнитным полем, по-видимому, могут объяснить и их глубокое проникновение в экваториальной плоскости, вблизи которой теперь также наблюдаются полярные сияния и где на больших высотах прямыми методами уже обнаружены не только жесткие, но и не особенно жесткие электроны с энергией, наблюдаемой у электронов, вызывающих полярное сияние. Такие образования могут иметь в геомагнитном поле очень большую «пробивную способность», поскольку отношение их суммарного заряда или магнитного момента к общей массе может быть значительно меньше, чем у индивидуальных заряженных корпускул. При ударе такого сгустка корпускул о геомагнитное поле в нем и во внешней атмосфере вокруг него неизбежно будет совершаться перераспределение кинетической и потенциальной энергии сгустка между всеми взаимодействующими элементами. При этом существенно изменится энергия первичных корпускул, а многие ионы земной атмосферы приобретут высокую энергию, т. е. сами превратятся в геоактивные корпускулы.

Возникающие в вышеописанных процессах неоднородности геомагнитного поля едва ли могут быть симметричными относительно экваториальной плоскости. Поэтому детальное соответствие северных и южных сияний исключается принципиально. В этих условиях вызывающие их



Рис. 3. Полярное сияние в Лопарской на западе в 23.30
местного времени 25 ноября 1958 г.
Дрейф в проекции сияния на Земле по часовой стрелке



Рис 4. Полярное сияние в Лопарской на юге
в 00.30 местного времени 26 ноября 1958 г
Дрейф в проекции сияния на Земле против часовой
стрелки

электроны не обязательно должны до их полного высыпания совершать колебания вдоль силовой линии геомагнитного поля от одной полярной области до другой. Это, по-видимому, и имеет место в действительности. Область с неоднородным магнитным полем не обязательно должна принадлежать внешней атмосфере Земли. Это могут быть магнитные поля корпускулярных потоков, обтекающих геомагнитное поле.

Энергия электронов, вызывающих обычные низкие полярные сияния, близка к 10 кэВ . Мощные потоки электронов с такими энергиями обнаружены также нами непосредственно на очень больших высотах над зоной обычных полярных сияний^{20,21,31}. Весьма примечательно и едва ли случайно, что и энергия протонов первичных корпускулярных потоков тоже близка к 10 кэВ . С одной стороны, это может означать, что протоны и электроны корпускулярных потоков, вторгающихся в атмосферу, находятся в состоянии равновесия по энергиям. С другой стороны, возможно, что в результате какого-то взаимодействия во внешнем геомагнитном поле протоны теряют преобладающую часть своей энергии, передавая ее почти полностью электронам. Весьма интересно, что поля с эмиссией водородных атомов с энергиями в несколько сотен эВ с севера и юга обрамляются эмиссионными полями, возбуждаемыми только электронами с энергиями около 10 кэВ . Не исключено, что этот процесс связан с образованием в геомагнитном поле электрических полей, обеспечивающих передачу энергии от первичных протонов электронам внешней атмосферы.

Наконец, при индукционных процессах, связанных с изменением магнитных полей межпланетного пространства, можно также ожидать во внешней атмосфере появления протонов и электронов с одинаковыми энергиями. Однако в этом случае наводимая электродвижущая сила не будет иметь какое-либо определенное предельное значение около 10 кэВ и заряженные частицы смогут ускоряться до весьма разнообразных, больших и меньших 10 кэВ , энергий, в зависимости от темпа и амплитуды изменений внешнего магнитного поля.

В связи с только что изложенным следует обратить внимание на нижеследующее обстоятельство. Тонкоструктурные лучистые образования характерны для подвижных форм полярных сияний: лучистых дуг, драпери. Очень тонкая структура лучиков, достигающих иногда в поперечнике сотен метров, однозначно указывает, что вызывающие их электроны монохроматичны. Лучики бы размылись, если бы скорости возбуждающих электронов имели дисперсию и обусловливаемые ею разнообразные скорости дрейфа. При наблюдаемых скоростях дрейфа световых образований в зоне полярных сияний от нуля до $\text{км} \cdot \text{сек}^{-1}$ и длительности существования отдельных лучиков около десятых долей секунды их ширина достигала бы километров. Кратковременное существование отдельных лучиков, по-видимому, объясняется тем, что совершающие колебания вдоль геомагнитных силовых линий сгустки электронов имеют длину, много меньшую протяженности внешних участков этих линий. Механизм монохроматизации скоростей электронов еще не ясен. Для более полного представления о принципиальных возможностях в этом направлении отметим, что лучистые формы обычно появляются в главной фазе геомагнитного возмущения, одновременно с длительными гармоническими короткопериодными вариациями геомагнитного поля, которые, как уже отмечалось выше, подобно реле, способны управлять высыпанием, а также и отражением электронов. Вполне возможно, что при колебаниях вдоль силовых линий отсортировываются электроны со вполне определенной скоростью, которые затем могут дополнительно подвергаться самофокусировке в электропроводящей внешней атмосфере по механизму,

предложенному Беннетом и Хальбартом³⁶. Большинство остающихся электронов со значительной дисперсией скоростей обеспечивает возбуждение более интенсивных диффузных форм полярных сияний. На рис. 5 показано начало изменения направления распространения дуги на фоне диффузного свечения, сопровождаемое обрамлением диффузных образований на севере очень тонкоструктурной лучистой дугой. Спокойные, нелучистые формы в минимуме солнечной активности, возможно, объясняются тем, что корпускулярные потоки Солнца в это время более однородны, не несут в себе замороженных в них магнитных полей и не сопровождаются поэтому интенсивными короткопериодными вариациями геомагнитного



Рис. 5. Полярное сияние в Лопарской на западе в 23.20 местного времени 25 ноября 1958 г. Оно послужило началом образования петли, изображенной на рис. 3. Дрейф в проекции сияния на Земле по часовой стрелке.

поля или какими-либо другими процессами, обуславливающими монохроматизацию скоростей электронов, возбуждающих полярные сияния. Здесь еще имеется простор для дальнейших исследований.

Большой пробел в наших знаниях о полярных сияниях вызван также отсутствием наблюдения их в дневное время. Занимаясь оптическими исследованиями полярных сияний, мы надеялись, что радиолокация даст хотя бы статистическую картину появления таких явлений днем. Каково же было удивление, когда оказалось, что радиолокационные отражения от полярных сияний в светлую половину суток практически отсутствуют в том виде, как они наблюдаются ночью³⁷. Было бы неосторожным сделать отсюда вывод, что это отображает реальное отсутствие полярных сияний в дневное время. Более разумным, по-видимому, будет проведение дальнейших исследований

для выяснения истины. Может статься, что исчезновение радиолокационных отражений в дневное время объясняется только изменением месторасположения зоны полярных сияний, при котором геометрия неоднородностей ионизации, благоприятная для отражений, нарушается. Вполне возможно, что это объясняется смещением зоны полярных сияний днем ближе к полюсу, т. е. противоположным ночному.

Не все в исследовании полярных сияний может быть разрешено наземными наблюдениями. Дневная картина полярных сияний, детали структуры и расположение потоков протонов и электронов, вызывающих полярные сияния, их происхождение, трансформация первичных корпускулярных потоков, их начальный состав, неоднородность и многое другое могут быть установлены только в результате прямых экспери-

ментов во внешней атмосфере Земли и межпланетном пространстве. Особенно интересно исследование равномерности кольца дрейф-токов на всех его участках вокруг Земли. Работы в этом направлении находятся еще в начальной стадии развития.

ИЗЛУЧЕНИЕ НОЧНОГО НЕБА

Переходя теперь к изложению новых результатов по эмиссиям ночного неба, необходимо еще раз подчеркнуть некоторую неопределенность в том, что относится только к явлению полярного сияния, а что только к излучению ночного неба. Эта неопределенность особенно велика, когда дело касается красной эмиссии кислорода $6300 \text{ \AA}$ и эмиссии водорода H_α . За последние годы была осуществлена регулярная регистрация водородной эмиссии с узким контуром, ширина, которого не превышала $2 \text{ \AA}$, а скорее, была даже еще меньше. Это не позволяет предполагать, что у излучающих водородных атомов скорости больше $10^7 \text{ см} \cdot \text{сек}^{-1}$, а энергии — нескольких десятков эв.

В нашем институте Н. Н. Шефовым и в Якутске В. И. Яриным накоплены богатые коллекции спектров излучения ночного неба от 3000 до $12000 \text{ \AA}$ ^{38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46}. На них имеются линии вращательно-колебательных полос гидроксила, молекулярного и атомарного кислорода. Общее число разрешаемых линий молекулярных полос достигает полутысячи вместо нескольких десятков, ранее известных. Зарегистрирован также континуум излучения ночного неба. Стало очевидным, что при электрофотометрии эмиссий ночного неба необходим исключительно тщательный учет этого континуума с тем, чтобы не исказить истинного значения интенсивностей исследуемых эмиссий. Обнаружены также вспышки интенсивности континуума в синей области спектра. Одновременно с ними появляются полосы Герцберга молекулярного кислорода. Пока, однако, не удалось заметить связи этой эмиссии с другими эмиссиями излучения ночного неба.

Обработка материала по гидроксильному излучению в Звенигороде показала, что вращательная температура полос гидроксила изменяется от 200 до 400° K . Иногда от ночи к ночи происходят очень быстрые изменения температуры на десятки градусов. Они не могут быть объяснены реальным изменением температуры атмосферы ниже 100 км , так как для этого там должна была бы поглотиться недопустимо большая энергия. С другой стороны, кажется, что вращательная температура гидроксила отображает температуру окружающей среды. Поэтому наблюдаемые большие изменения температуры от дня ко дню следует объяснять только изменением высоты излучающих слоев. По различию температуры в полосах с различных исходных уровней была доказана многослойность гидроксильного излучения. Весьма замечательно, что найдено колебание относительной населенности различных исходных уровней в несколько раз, которое может быть объяснено только существованием нескольких, по крайней мере двух, механизмов возбуждения этой эмиссии.

В. И. Ярин в Якутске получил в общем аналогичный результат. Однако в то время как в Звенигороде не было обнаружено зависимости между интенсивностью полос гидроксила и их вращательной температурой, в Якутске при температурах выше 250° K имеет место явная тенденция роста интенсивности с вращательной температурой. Наблюдаемое увеличение излучения гидроксила может быть объяснено озоно-водородной реакцией с энергией активации около 3 ккал/моль . В Якутске замечен сезонный ход в интенсивности и температуре полос гидроксила. Их максимальное значение больше в холодное зимнее время года.

В Звенигороде такой зависимости не обнаружено. Таким образом, установлено, что особенности гидроксильного излучения существенно зависят от места наблюдения.

Н. Н. Шефов и В. И. Ярин⁴⁷ сопоставили все имеющиеся материалы по температуре вращательных полос гидроксила и подтвердили тенденцию роста этой температуры с широтой места зарождения эмиссии. В Звенигороде регистрируемая интенсивность полос гидроксила существенно не ослабляется даже в очень пасмурную погоду, что, по-видимому, указывает на увеличение в это время их истинной интенсивности. В результате обобщения большого материала получены средние интенсивности всех полос гидроксила от 5000 до 12500 Å. Из них следует, что в верхней атмосфере появляется около 10^{12} новых возбужденных молекул гидроксила над 1 см² земной поверхности в 1 сек. Зарегистрирована также полоса гидроксила с десятого колебательного уровня.

Н. Н. Шефов, В. И. Ярин, В. С. Прокудина^{14, 15, 41, 44} установили, что эмиссии излучения ночного неба могут быть подразделены на две группы. С одной стороны, это зеленая эмиссия атомарного кислорода 5577 Å, с другой, — эмиссии: гидроксила, желтая натрия 5894 Å, водородная H_α и красная атомарного кислорода 6300 Å, которые явно коррелируют между собой. Нарушение этой корреляции наступает, когда в поле спектрографа попадают галактические поля с водородной эмиссией и когда интенсивность красной кислородной эмиссии 6300 Å слишком велика. Во всех случаях существует уверенная корреляция между интенсивностями красной эмиссии кислорода 6300 Å и зеленой эмиссии азота 5200 Å. А. В. Миронов⁴⁸ обнаружил рост интенсивности этих эмиссий с магнитным K -индексом.

Весьма интересна корреляция между гидроксильной и натриевой эмиссией, с одной стороны, и водородной и красной кислородной эмиссией, — с другой. Эти пары эмиссий, несомненно, возникают на различных высотах. Первая пара — ниже 100 км, вторая много выше. Их взаимосвязь, по-видимому, может быть объяснена тем, что красная кислородная и водородная эмиссии обязаны единому возбуждающему агенту, действующему в более высоких слоях. Суть же связи этих эмиссий с нижними, по-видимому, в проникновении вниз того же агента непосредственно или его воздействие через промежуточные продукты, регулирующие там концентрацию атомарного водорода, обуславливающую интенсивность гидроксильной и натриевой эмиссий. Таким первичным агентом могут быть или электроны с энергией около 10 кэв, или излучение водорода L_α . Активным проникающим вниз агентом, вызывающим диссоциацию водородных молекул, может быть как рентгеновское излучение, возникающее при бомбардировке атмосферы энергичными электронами, так и излучение водорода L_α ²².

В настоящее время становится очевидной несовместимость данных об интенсивности гидроксильного излучения и концентрации атомарного водорода ниже 100 км. Число вновь образующихся колебательно-возбужденных молекул гидроксила над 1 см² земной поверхности N может быть представлено как

$$N_1 \sim h [O_3] [H] \alpha_1$$

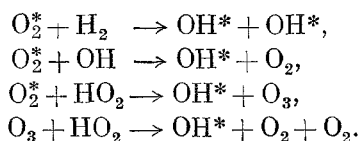
в случае озono-водородной реакции⁴⁹ и

$$N_2 \sim h [O_2^*] [H] \alpha_2$$

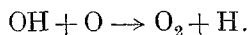
в случае реакции колебательно-возбужденных молекул кислорода с атомами водорода^{50, 51, 52}, где $[O_3]$ и $[O_2^*]$ — концентрация озона и колебательно-возбужденных молекул кислорода соответственно, $[H]$ — кон-

центрация атомарного водорода, α_1 — коэффициент скорости озono-водородной реакции (по Бейтсу и Николé ⁴⁹ $\alpha_1 \sim 10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}$), α_2 — коэффициент скорости реакции колебательно-возбужденных молекул кислорода с атомами водорода (по нашим оценкам ⁵² $\alpha_2 \sim 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}$) и h — высота однородной атмосферы ($h \sim 10^6 \text{ см}$). Согласно новейшим данным Фридмана ⁵³, концентрация атомарного водорода несколько ниже 100 км едва ли превышает $5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, а на меньших высотах она не может быть больше, поскольку в плотных слоях атмосферы атомарный водород быстро вступает в химические соединения и не может долго находиться в свободном состоянии. В свете всего вышеизложенного, поскольку $N \sim 10^{12}$ колебательно-возбужденных молекул гидроксила $\text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ ⁵², получаем $[\text{O}_3] \sim 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и $[\text{O}_2^*] \sim 2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. Такие огромные значения $[\text{O}_3]$ и $[\text{O}_2^*]$ представляются совершенно неприемлемыми. Если данные Фридмана не будут опровергнуты, то придется искать новые механизмы образования колебательно-возбужденных молекул гидроксила.

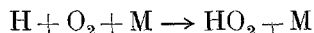
Единственным выходом в этом случае будет предположение о преобладании в верхней атмосфере ниже 100 км вместо атомарного водорода — его соединений, способных вступать в химические реакции с выходом колебательно-возбужденных молекул гидроксила. Такими соединениями, по-видимому, являются молекулы водорода, гидроксила и перегидроксила. Вот перечень возможных реакций:



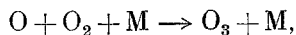
Звездочкой обозначаются молекулы в колебательно-возбужденном основном состоянии. Существование свободного гидроксила возможно только там, где концентрация атомарного кислорода невелика и где, следовательно, мало вероятно появление атомарного водорода по реакции



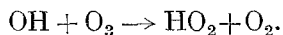
Согласно новейшим данным ⁵⁴, реакция



на три порядка более эффективна, чем реакция



где M — любая молекула или атом верхней атмосферы. Следовательно, имеются существенные причины для быстрого исчезновения атомарного водорода ниже стокилометрового уровня. На больших высотах атомарный водород может исчезать вследствие диффузии вверх и диссипации. Возможно также, что перегидроксил образуется и в реакции



Таким образом, возбужденный гидроксил может возникать как продукт разнообразных химических реакций в верхней атмосфере. Каждая из них будет обеспечивать свое характерное относительное возбуждение колебательных уровней гидроксила. Вариации высот и интенсивности различных реакций приведут к вариациям вращательной температуры различных полос и относительной населенности этих уровней. Именно такое обстоятельство и имеет место в действительности ⁴⁶. Дальнейшие исследования обеспечат окончательное выяснение природы гидроксильного излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По ходу исследований мы неоднократно сопоставляли интенсивность той или иной эмиссии с геомагнитными характеристиками. В среднем статистически наблюдается согласие. Оно представляется вполне очевидным, в особенности, когда рассматриваются полярные сияния. Однако во многих случаях имеют место явные несовпадения и в этом нет ничего удивительного. С помощью эмиссий наблюдаются индивидуальные первоначальные элементарные процессы во вполне определенных ограниченных объемах верхней атмосферы, в то время как геомагнитные явления и макроскопические ионосферные характеристики отображают суммарный эффект огромных пространств, даже за пределами видимости с места наблюдения эмиссий. В свете этого полное и постоянное совпадение тех или иных вариаций выглядело бы сомнительным. Преимущество геомагнитных и ионосферных наблюдений в их полной независимости от времени суток и метеорологических условий. Но из этих наблюдений трудно почерпнуть детальные сведения о первопрочине тех или иных явлений. Наблюдение за эмиссиями верхней атмосферы дает непосредственную информацию о самых первичных элементарных процессах, приводящих к образованию ионосферы и к геомагнитным возмущениям. К сожалению, такие наблюдения возможны лишь в темное время суток при хороших метеорологических условиях. Значительно труднее найти способ наземного наблюдения эмиссий верхней атмосферы в дневное время. Однако непосредственное зондирование верхней атмосферы значительно расширяет круг возможных исследований элементарных процессов верхней атмосферы. Имеются основания надеяться, что в ближайшее время удастся разрешить многие неясные вопросы, на которые еще не удалось получить ответ.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Сборник*) № 1, 5 (1959).
2. Н. В. Джорджидио, Сборник № 1, 30 (1959).
3. В. С. Прокудина, Сборник № 1, 43 (1959).
4. Ю. И. Гальперин, Астрон. ж. 34, № 1, 131 (1957).
5. Ю. И. Гальперин, Астрон. ж. 35, № 3, 382 (1958).
6. Ю. И. Гальперин, Сборник № 1, 7 (1959).
7. G. I. Galperin, Planet. Space Sci. 1, 57 (1959).
8. А. В. Мионов, В. С. Прокудина, Н. Н. Шефов, Сборник № 1, 20 (1959).
9. Ф. К. Шуйская, Сборник № 1, 45 (1959).
10. О. Л. Вайсберг, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 8, 1277 (1960).
11. О. Л. Вайсберг, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 1, 166 (1961).
12. И. С. Шкловский, ДАН СССР 81, 367 (1951).
13. I. S. Shklovsky, Ann. Geophys. 14, 414 (1958).
14. В. С. Прокудина, Сборник № 2—3, 68 (1960).
15. В. С. Прокудина, Сборник № 5, 32 (1961).
16. Н. В. Джорджидио, Сборник № 2—3, 45 (1960).
17. Ф. К. Шуйская, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 3, 510 (1960).
18. Ф. К. Шуйская, Сборник № 5, 49 (1961).
19. Н. В. Джорджидио, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 5, 714 (1960).
20. В. И. Красовский, Доклад на симпозиуме по ракетам и спутникам на 5 Ассамблее СР МГ (Москва, июль 1958 г.), Искусственные спутники Земли, М., изд. АН СССР, № 2, 59 (1958).
21. V. I. Krasovskiy, Discussion on satellites, rockets and balloons, 13 August 1958, Trans. Intern. Astron. Union 10, 716 (1960).
22. В. И. Красовский, Природа, № 5, 55 (1957).
23. Б. П. Потапов, З. Ц. Раппопорт, Б. Т. Борсук, Сборник № 2—3, 42 (1960).
24. Т. М. Мулярчик, Сборник № 1, 41 (1959).

*) Здесь «Сборник» означает «Спектральные, электрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечения ночного неба», М., изд. АН СССР.

25. Т. М. Мулярчик, ДАН СССР 130, 303 (1960).
26. Т. М. Мулярчик, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 3, 449 (1960).
27. Н. И. Федорова, Сборник № 5, 42 (1961).
28. Н. И. Федорова, Planet. Space Sci. 5, 70 (1961).
29. Н. Н. Шефов, Сборник № 5, 47 (1961).
30. N. N. Shefov, Planet. Space Sci. 5, 70 (1961).
31. В. И. Красовский и др., Искусственные спутники Земли, № 6, 113 (1961).
32. Н. Н. Шефов, Астрон. циркуляр, № 111, 22 (1961).
33. П. В. Щеглов, Астрон. ж. 38, № 6, III (1961).
34. V. I. K r a s s o v s k y et al., Ann Geophys. 14, 356 (1958).
35. Л. Спитцер, Физика полностью ионизованного газа, М., ИЛ, 1957.
36. V. H. Veppert, D. E. Hulburt, Phys. Rev. 91, 1562 (1953).
37. Б. А. Багаряцкий, Сборник № 2—3, II (1960).
38. Н. Н. Шефов, Сборник № 1, 25 (1959).
39. Н. Н. Шефов, Сборник № 2—3, 57 (1960).
40. Н. Н. Шефов, Сборник № 5, 5 (1961).
41. Н. Н. Шефов, Сборник № 5, 18 (1961).
42. Н. Н. Шефов, Сборник № 5, 39 (1961).
43. Н. Н. Шефов, Сборник № 6, 21 (1961).
44. В. И. Ярин, Сборник № 5, 53 (1961).
45. В. И. Красовский, Сборник № 5, 29 (1961).
46. V. I. K r a s s o v s k y, N. N. Shefov, V. I. Yarin, J. Atmos. Terr. Phys. 24, 46 (1961).
47. Н. Н. Шефов, В. И. Ярин, Сборник № 5, 25 (1961).
48. А. В. Мионов, Сборник № 2—3, 66 (1960).
49. D. R. Bates, M. Nicolet, J. Geoph. Res. 55, 301 (1950).
50. В. И. Красовский, В. Т. Лукошаня, ДАН СССР 80, 735 (1951).
51. V. I. K r a s s o v s k y, Airglow and Aurorae, ed. Armstrong and Dalgarno, London, 1956, стр. 193.
52. В. И. Красовский, УФН 63, 673 (1957).
53. H. Friedman, Proc. XI Intern. Astronaut. Congress Stockholm, 1960, стр. 83.
54. D. E. Hoare, A. D. Walsh, Trans. Far. Soc. 53, 1102 (1957).
55. D. Barbier, Ann. geophys. 16, 544 (1960).
56. B. J. O'Brien, J. A. Van Allen, F. E. Roach, C. W. Gartlein, J. Geophys. Res. 65, 2759 (1960).
57. A. B. Meinel, Mem. soc. Roy. Sci. (Liège) 12, 203 (1952).
58. C. Y. Fan, Airglow and Aurorae, ed. Armstrong and Dalgarno, London, 1956, стр. 276.
59. V. I. K r a s s o v s k y, Planet. Space Sci. I, 14 (1959).
60. L. Coleman, et al., Phys. Rev. Lett. 5, 43 (1960).

