

## ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ

Н. Л. АЛЕКСАНДРОВ

Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный Московской обл.

### AURORAS

N. L. ALEKSANDROV

*The basic manifestations of the auroras are described. The up-to-date concepts of the origin and details of this beautiful natural phenomenon are given. The space observations of the auroras are discussed, as well as artificial auroras.*

*Описаны основные проявления полярных сияний. Даны современные представления о происхождении и особенностях этого красивого природного явления. Рассмотрены наблюдения полярных сияний из космоса и искусственные полярные сияния.*

[www.issep.rssi.ru](http://www.issep.rssi.ru)

### ВВЕДЕНИЕ

Полярные сияния — одно из самых красивых световых явлений в природе, поэтому они привлекали внимание человека на протяжении всей его истории. Упоминания о полярных сияниях можно найти в трудах Аристотеля, Плиния, Сенеки и других древних философов.

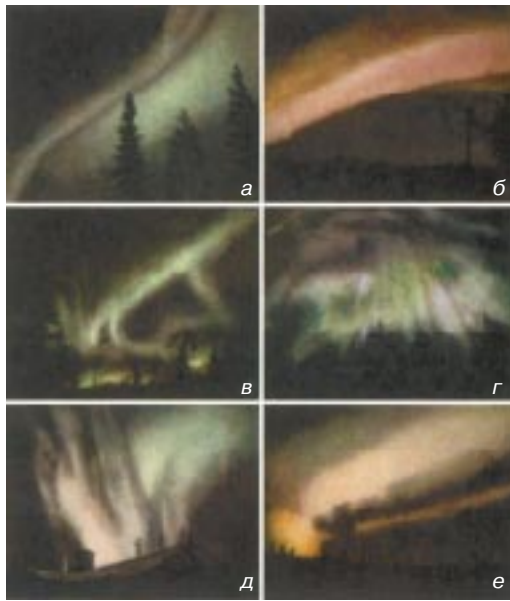
Долгое время полярные сияния рассматривали как предвестники катастроф — эпидемий, голода и войн. Например, это явление связали с падением Иерусалима и смертью Юлия Цезаря. Во всяком случае в этом видели проявление гнева богов или других сверхъестественных сил. Люди, проживающие в местах, где полярное сияние не редкость, старались объяснить его появление естественным путем. Например, высказывались предположения о том, что это отражение солнечного света от морской поверхности или излучение солнечных лучей, накопленных за день в толще льда.

На русском Севере полярные сияния называли пазорьями или сполохами. Первое из этих слов указывает на сходство рассматриваемого явления с зорями, а второе происходит от слова “полошить”, то есть тревожить, беспокоить, поднимать тревогу. Действительно, во время полярных сияний небо может стать красным, как на пожаре. Известны случаи, когда полярное сияние красного цвета принимали за зарево пожара и пожарные команды выезжали к огромному зареву в северной части горизонта.

Видели полярные сияния и в южном полушарии. Английский мореплаватель Джеймс Кук (1728—1779) был одним из первых, кто не только дал их описание в южном полушарии, но и обратил внимание на то, что полярные сияния появляются в высоких широтах обоих полушарий одновременно.

### НАБЛЮДЕНИЕ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

Наиболее часто полярные сияния имеют вид лент или пятен, напоминающих облака (рис. 1 [1]). Более интенсивное сияние приобретает форму лент, которые при уменьшении интенсивности превращаются в пятна. Ленты могут также исчезать, не разбиваясь на пятна. На рис. 2 показаны типичные формы полярных сияний в зависимости от их высоты. Ленты обычно простираются

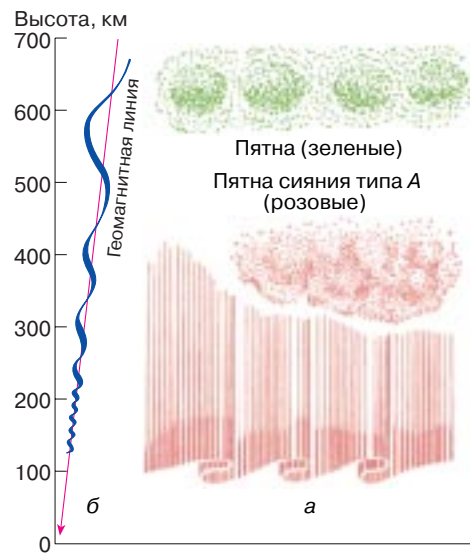


**Рис. 1.** Полярные сияния: а – спокойная диффузная дуга; б – аналогичная дуга с усиленным розовым свечением; в, г – лучистые полосы; д, е – складчатые полосы

с востока на запад на тысячи километров, напоминая гигантский занавес. Высота этого занавеса достигает нескольких сот километров, а толщина всего лишь несколько сот метров. Поэтому такой занавес прозрачен, и сквозь него можно различать звезды. Нижний край занавеса обычно резко очерчен и чаще подкрашен в красный или розовый цвет, а верхний, размытый постепенно исчезает с высотой. Иногда возникают интенсивные сияния, которые охватывают большую часть полярного района и характеризуются беловато-зеленоватым свечением. Они называются шквалами и характерны для периодов повышенной солнечной активности.

По яркости сияния разделяются на четыре класса, отличающиеся друг от друга в 10 раз. В первый класс попадают еле заметные сияния, сходные по своей яркости с Млечным Путем. Сияния же четвертого класса по яркости можно сравнить с полной Луной.

Полярные сияния в северном полушарии обычно движутся на запад со скоростью примерно 1 км/с. Верхние слои атмосферы в области сияний заметно нагреваются, что приводит к появлению восходящих потоков газа. В результате на больших высотах увеличивается плотность газовой среды. Последнее вызывает дополнительное торможение искусственных спутников Земли в этой области. Сияния также сопровождаются сильными вихревыми токами в огромных областях пространства. В результате индуцируются сильные



**Рис. 2.** Типичные формы полярных сияний в зависимости от их высоты

магнитные поля и развиваются так называемые магнитные бури. Яркие вспышки сияния могут сопровождаться звуками, похожими на треск. Сильные изменения в ионосфере сказываются на качестве радиосвязи. В большинстве случаев она ухудшается.

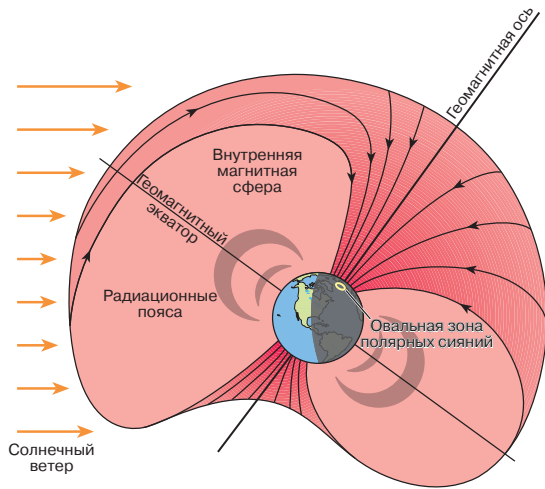
### КАК ВОЗНИКАЮТ ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ

Землю можно рассматривать как большой магнит, южный полюс которого располагается вблизи северного географического полюса, а северный – вблизи южного. Силовые линии магнитного полюса Земли (так называемые геомагнитные линии) выходят из области северного магнитного полюса Земли, охватывают нашу планету и входят в нее в области южного магнитного полюса Земли (рис. 3).

Форма магнитных силовых линий не является симметричной относительно Земли. Это связано с так называемым солнечным ветром – потоком высокоэнергичных электронов и протонов, постоянно излучаемых Солнцем, резко увеличивающимся по интенсивности во время вспышек на Солнце. Налетая на магнитную оболочку Земли, потоки заряженных частиц приводят к сжатию магнитных силовых линий со стороны Солнца и их оттягиванию в противоположном направлении, образуя у Земли магнитный хвост.

Чтобы понять, почему сияния наблюдаются чаще всего именно в полярных областях Земли, надо вспомнить, как движутся заряженные частицы в магнитном поле.

Рассмотрим возможные варианты.



**Рис. 3.** Магнитосфера Земли, искаженная солнечным ветром

**1. Заряженная частица движется вдоль магнитного поля.** В этом случае поле никак не влияет на ее движение. В высоких широтах Земли силовые линии магнитного поля почти вертикальны, что создает благоприятные условия для проникновения частиц в атмосферу Земли.

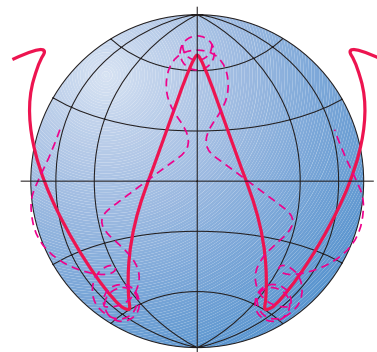
**2. Заряженная частица движется поперек магнитного поля.** При этом на частицу действует сила Лоренца, которая закручивает ее вокруг силовой линии магнитного поля. В результате при отсутствии столкновений с другими частицами рассматриваемые частицы будут просто вращаться вокруг силовых линий. Столкновения могут приводить к перескоку частиц с одних круговых орбит на другие. Но скорость такого движения существенно меньше, чем скорость направленного движения потока частиц при отсутствии магнитного поля. В низких широтах силовые линии почти параллельны поверхности Земли. Поэтому, чтобы частицы, вызывающие полярное сияние, могли здесь проникнуть в атмосферу, они должны прорваться поперек силовых линий Земли, а это для них практически невозможно.

**3. Частица движется под определенным углом к направлению магнитного поля.** Такое движение можно разложить на две составляющие: поперек магнитного поля и одновременно вдоль него. Оба эти случая рассмотрены выше. Из сказанного следует, что траектория частицы в этом случае будет спиралью, накручивающейся на силовую линию магнитного поля. Шаг спирали зависит от величины продольной скорости, а радиус — от поперечной скорости. Таким образом, заряженная частица, попадая в магнитное поле Земли, может достигнуть ее атмосферы только в полярных областях независимо от того, где она оказалась вначале.

**4. Частица движется в неоднородном магнитном поле,** то есть магнитное поле изменяется в пространстве. Если частица движется по спирали вокруг силовой линии магнитного поля, которое увеличивается по мере продвижения частицы вперед (то есть силовые линии сгущаются), то с ростом напряженности поля частица замедляет свое движение вдоль силовой линии и в конце концов отразится и будет двигаться в обратном направлении. Силовые линии магнитного поля Земли сходятся около ее поверхности в высоких широтах. Поэтому заряженные частицы, вращаясь вокруг этих линий и подходя к местам их сгущений, отражаются и движутся в другое полушарие (рис. 4). Там повторяется аналогичное отражение, и частицы оказываются в первом полушарии. Это повторяется до тех пор, пока частица не потеряет энергию при соударении с нейтральными частицами в плотной атмосфере вблизи поверхности Земли.

Силовые линии магнитного поля Земли меняются не только в радиальном направлении, но они к тому же и изогнуты. Это также влияет на движение заряженных частиц. В результате электроны и протоны начинают дрейфовать в противоположных направлениях (на восток или запад).

Электроны и протоны, попавшие из солнечного ветра в магнитное поле Земли, стекают в область полюсов, где достигают плотных слоев атмосферы и производят ионизацию и возбуждение атомов и молекул газов. Для этого они имеют достаточно энергии. Действительно, в солнечном ветре протоны обладают энергией 100–200 эВ ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ), а электроны — энергией 10–20 кэВ. Пороги ионизации составляют 13,6 эВ для атомов водорода и кислорода и 14,5 эВ для атома азота. Пороги возбуждения этих частиц еще меньше. Возбужденные атомы испускают энергию в виде света. Нечто подобное наблюдается в газовом разряде при пропускании через газ электрического тока.



**Рис. 4.** Схематическое изображение траектории заряженной частицы в магнитном поле Земли

Ионизация заряженными частицами происходит наиболее эффективно в конце пути заряженной частицы, когда ее энергия уже невелика. Нейтральные частицы распределены в атмосфере по барометрическому закону (естественно, частиц больше на низких высотах), что также увеличивает скорость ионизации вблизи поверхности Земли. С этим и связаны резкая нижняя и размытая верхняя границы полярных сияний.

Особого внимания заслуживает вопрос об аналогии между полярными сияниями и газовым разрядом, с многочисленными проявлениями которого встречаемся на каждом шагу (молния, лампы дневного света, неоновые огни реклам, яркая вспышка света при дуговой сварке и т.д.). Традиционно считалось, что такая аналогия ограничивается только элементарными актами ионизации и возбуждения атомов энергичными частицами, которые происходят и в газовом разряде, и в полярных сияниях. Хорошо известно, что в газовом разряде ионизирующие электроны нагреваются во внешнем электрическом поле. В случае с полярными сияниями раньше считалось, что ионизирующие заряженные частицы — это сверхгорячие электроны и протоны солнечного ветра, которые охлаждаются в столкновениях с атомами и молекулами атмосферы. Однако современные исследования показали [2], что в последнем случае ситуация более сложная. Заряженные частицы солнечного ветра (по крайней мере электроны) могут осуществлять ионизацию другим образом. Дело в том, что ионосферная плазма, в которую вторгается высокоэнергичный пучок заряженных частиц, неустойчива. В такой системе за счет энергии пучка раскачиваются колебания, сопровождаемые переменным электрическим полем. Электроны ионосферы по прямой аналогии с лабораторным газовым разрядом нагреваются в этом электрическом поле до энергий, при которых начинается ионизация в столкновениях с атомами и молекулами. Получающийся таким образом разряд носит название пучково-плазменного разряда и не только известен специалистам по газовому разряду, но и используется в некоторых технических приложениях. Таким образом, аналогия между полярными сияниями и газовым разрядом оказалась более глубокой, чем предполагалось вначале.

Анализ спектров излучения в полярных сияниях показывает, что зеленое и красное свечение испускается возбужденными атомами кислорода, а инфракрасное и фиолетовое — ионизованными молекулами азота. Часть линий испускания кислорода и азота образуется на высоте 110 км, а красное свечение кислорода — на высоте 200–400 км (см. рис. 2). Слабое излучение испускается также атомами водорода, которые образуются в верхних слоях атмосферы из протонов солнечного ветра при захвате электронов от нейтральных частиц атмо-

сферы. Захватив электрон, такой протон превращается в возбужденный атом водорода, который и излучает красный свет. Это излучение показано на рис. 2 как слабое свечение типа А.

Интересно, что энергичные протоны, вторгаясь в верхнюю атмосферу и вызывая протонные сияния, часть своего пути движутся как нейтральные атомы водорода. В этом случае они свободны от действия магнитного поля Земли и, имея большие (протонные) скорости, могут проникать в области, недоступные заряженным частицам. Вследствие этого области, где наблюдаются протонные полярные сияния, отличаются большой протяженностью.

Вспышки северного сияния обычно наблюдаются через день-два после вспышек на Солнце. Это служит непосредственным доказательством взаимосвязи между упомянутыми явлениями.

Поверхность Земли не самое лучшее место для наблюдения за полярными сияниями: во-первых, почти всегда их надо наблюдать ночью, когда не мешает солнце; во-вторых, наблюдениям могут мешать облака. Этим трудностей можно избежать, если следить за полярными сияниями из Космоса, где к тому же нет искажающего влияния нижних плотных слоев атмосферы. Наблюдения с пилотируемых космических кораблей и орбитальных станций дали богатый материал о пространственном расположении сияний, их изменении во времени и о многих особенностях этого явления. Более того, космические аппараты позволили выполнять измерения внутри полярного сияния. При этом одинаково удобно исследовать сияния и в северном и в южном полушариях. Таким способом можно наблюдать сияния и на дневной стороне Земли.

## ИСКУССТВЕННЫЕ ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ

Наиболее убедительным доводом в пользу того, что мы понимаем какое-нибудь физическое явление, является его повторение в лаборатории. Это удалось сделать и для полярного сияния — создать его искусственно в лаборатории с масштабами нашей планеты. Этот эксперимент, получивший название “Аракс”, начат в 1985 году совместно российскими и французскими исследователями. В качестве лабораторий были выбраны две магнитосопреженные точки на поверхности Земли (то есть две точки на одной и той же силовой линии магнитного поля). Ими были в южном полушарии французский остров Кергелен в Индийском океане и в северном полушарии поселок Согра в Архангельской области. С острова Кергелен стартовала геофизическая ракета с небольшим ускорителем частиц, который на определенной высоте создал поток электронов. При движении вдоль магнитной силовой линии от Земли, которая над экватором была уже на расстоянии 20 000 км, эти

электроны проникли в северное полушарие и вызвали искусственное полярное сияние над Согрой. К сожалению, облака не позволили визуально наблюдать это сияние с поверхности Земли. Однако радарные установки четко зарегистрировали его возникновение. Название “Аракс” составлено из первых букв французских слов *Artificiel polaire aurore – Kergelen – Sogra*, которые в переводе означают “искусственное полярное сияние–Кергелен–Согра”.

Эксперименты описанного типа не просто позволяют понять причины и механизм возникновения полярного сияния. Они дают уникальную возможность изучать структуру магнитного поля Земли, процессы в ее ионосфере и влияние этих процессов на погоду вблизи земной поверхности. Особенно удобно выполнять такие эксперименты не с электронами, а с ионами бария. Оказавшись в ионосфере, эти ионы возбуждаются солнечным светом и начинают испускать излучение малинового цвета.

## ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Можно с уверенностью сказать, что исследования последних десятилетий, включая изучение явления с искусственных спутников Земли и ракет и создание искусственных сияний, существенно обогатили наши знания о полярных сияниях. Ясно, что не просто загадка полярных сияний разгадана, но и накоплен большой фактический материал об окружающем нашу планету пространстве, состоянии межпланетной среды и солнечном излучении, включая потоки заряженных частиц. И тем не менее проблема полярных сияний еще далека от своего решения.

Действительно, мы знаем, что это свечение верхней атмосферы в высоких широтах северного и южного полушарий Земли, вызванное энергичными заряженными частицами, вторгающимися в земную магнитосферу на своем пути от Солнца. Известны и основные закономерности проявления полярных сияний: их зависимость от высоты, географического положения, солнечной активности, возмущений магнитного поля Земли и т.д. И все же в настоящее время мы еще не можем не только описать количественно это явление, но даже предсказать заранее многие закономерности предстоящего полярного сияния. Проблема полярных сияний оказывается слишком сложной и многоплановой. Например, до сих пор неясна связь полярных сияний с погодой. Северяне хорошо знают, что полярные сияния чаще наблюдаются в морозные ночи. Объяснения этому пока нет.

В то же время возникают неожиданные взаимосвязи, ждущие своих будущих исследователей, в достаточно необычных вопросах. В начале статьи речь шла о том, что в свое время появление полярных сияний связы-

валось с трагическими явлениями в природе и обществе. Только ли страх перед непонятными впечатляющими явлениями природы лежит в основе этих суеверий? Сейчас хорошо известно, что солнечные ритмы с различными периодами (27 суток, 11 лет и т.д.) влияют на самые разные стороны жизни на Земле. Солнечные и магнитные бури (и связанные с ними полярные сияния) могут вызывать рост различных заболеваний, в том числе заболеваний сердечно-сосудистой системы человека. С солнечными циклами связаны изменения климата на Земле, появление засух и наводнений, землетрясения и т.д. Все это заставляет еще раз серьезно задуматься над связью между полярными сияниями и земными катаклизмами и бедами. Может быть, не так и глупы старые представления о такой связи?

Полярные сияния сигнализируют о месте и времени воздействия Космоса на земные процессы. Вызывающее их вторжение заряженных частиц влияет на многие стороны нашей жизни. Изменяется содержание озона и электрический потенциал ионосферы, нагрев ионосферной плазмы возбуждает волны в атмосфере. Все это сказывается на погоде. Из-за дополнительной ионизации в ионосфере начинают течь значительные электрические токи, магнитные поля которых искажают магнитное поле Земли, что прямо влияет на здоровье многих людей. Таким образом, через полярные сияния и связанные с ними процессы Космос воздействует на окружающую нас природу и ее обитателей.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Булат В.Л. Оптические явления в природе. М.: Просвещение, 1974. 143 с.
2. Мишин Е.В., Ружин Ю.Я., Телегин В.А. Взаимодействие электронных потоков с ионосферной плазмой. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 264 с.
3. Исаев С.И. Полярные сияния. Мурманск: Кн. изд-во, 1980. 141 с.
4. Мизун Ю.Г. Полярные сияния. М.: Наука, 1983. 136 с.
5. Зверева С.В. В мире солнечного света. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 160 с.

*Рецензент статьи В.М. Липунов*

\* \* \*

Николай Леонидович Александров, доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной физики факультета проблем физики и энергетики Московского физико-технического института. Член редколлегии журнала “Физика плазмы” Российской Академии наук. Область научных интересов – физика низкотемпературной плазмы, газовый разряд, атомные столкновения. Автор более 110 статей.