

Арктика. Космическая погода

Л.М.Зеленый, А.А.Петрукович

Арктический регион в последние годы находится в центре особого внимания. Для России, помимо очевидных ресурсного и транспортного факторов, действует еще один — освоение Арктики становится и одной из основных движущих сил развития страны в XXI в. За советское время в Арктике были построены не только отдельные поселки и заводы, но и созданы два промышленных района — кольский и норильский, с сотнями тысяч населения и соответствующей инфраструктурой, без которых сегодня трудно представить себе отечественную экономику. И в этом состоит ключевое отличие российского подхода к освоению от американского и канадского, где постоянных структур такого масштаба нет. На рубеже веков начато создание еще одного района — на севере западной Сибири и на Ямале. Помимо развития нефтегазового комплекса здесь в перспективе планируется и прямой выход к арктическим портам из уральского региона. Если сегодняшняя тенденция на потепление климата сохранится, значение этого нового транспортного коридора будет трудно переоценить.

Советское освоение Арктики опиралось на солидную научную основу — открывались новые обсерватории, проводились экспедиции. Изучались не только полезные ископаемые, климат и льды, но и факторы воздействия космической среды. Хотя сейчас и принимаются ме-



Лев Матвеевич Зеленый, вице-президент РАН, академик, доктор физико-математических наук, директор ИКИ РАН, профессор Московского физико-технического института. Научные интересы связаны с плазменными процессами в космической среде, физикой и эволюцией Солнечной системы. Член ряда международных научных организаций. Член редколлегии «Природы».



Анатолий Алексеевич Петрукович, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, заведующий отделом физики космической плазмы ИКИ РАН. Лауреат медали им.Я.Б.Зельдовича РАН для молодых ученых. Занимается изучением солнечно-земных связей, динамики магнитосферы Земли, практических аспектов космической погоды.

ры к восстановлению научной сети, объем современных наблюдений все еще сильно отстает от масштабов имевшегося, например, во время Международного геофизического года в 1957—1958 гг. В результате актуальной становится задача оптимизировать эту научную поддержку, нацелить ее на реальные потребности.

Во время прошедшей в декабре 2014 г. сессии РАН по Арктике большинство докладчиков показывали фотографии белых медведей и полярных сияний — двух традиционных символов региона. Но никто не говорил, что оба эти символа могут быть весьма опасны — особенно те явления, видимой частью которых становятся полярные сияния. Это не просто замечательное, потрясающее воображение световое шоу, которое дарит нам арктическая (и антарктическая) природа и которое надо увидеть хотя бы раз в жизни, а последнее звено в сложной цепочке плазменных процессов, связывающих Солнце и Землю и объединяемых термином «космическая погода». Все живые организмы находящиеся в Арктике, а также все расположенные здесь технические системы подвержены ее влиянию. Именно этой теме и посвящена данная статья. Сначала мы

объясним вкратце общую физическую схему связи космической погоды с полярной зоной, а затем остановимся на нескольких основных нерешенных научных проблемах.

Посланники Солнца

Главный фактор, действующий на Землю из космоса, — это поток солнечного света и тепла, он постоянен с точностью до десятых долей процента (составляя после некоторых коррекций на эллиптичность орбиты Земли $1366\text{--}1367\text{ Вт/м}^2$) и даже так и называется — «солнечная постоянная». (Что не противоречит многообразию климатических зон и смене времен года — за них отвечает угол падения излучения на земную поверхность.) Основное переменное во времени воздействие на Землю тоже связано с Солнцем, но по переносимой энергии оно в тысячу раз слабее потока солнечного света. Это поток плазмы (протонов и электронов относительно небольшой энергии — $10\text{--}1000\text{ эВ}$) и магнитного поля, исходящий из короны Солнца. Поток этот, движущийся со сверхзвуковой скоростью, получил романтическое название «солнечный ветер». Ветер в том или ином виде растекается от Солнца всегда, но после солнечных вспышек происходят выбросы плазмы, приводящие к аномальному усилению этого потока. От него (и от космической радиации) нас более или менее успешно защищает магнитное поле Земли, имеющее сейчас достаточно большую величину. Более подробно о солнечном ветре и космической погоде можно прочитать в одной из предыдущих статей в журнале*.

В достаточно разреженной межпланетной среде ионы и электроны свободнее всего движут-

ся вдоль вектора магнитного поля, но их поперечное смещение затруднено — частицы, подчиняясь силе Лоренца, как бы навиваются на условное направление поля. Поэтому удобно говорить о вымышленных объектах — силовых линиях магнитного поля, выделяемых плазмой. Магнитное поле Земли можно представить себе как магнитный диполь. Магнитные полюса Земли (полюса диполя) почти совпадают с географическими, а ось вращения почти перпендикулярна направлению на Солнце. В такой схеме Земля встречает солнечный ветер «самым защищенным боком», поперек собственного магнитного поля. Поэтому прямое воздействие солнечного ветра на Землю минимизировано. Данная конфигурация, кстати говоря, вовсе не предопределена: магнитная ось, например, Нептуна лежит почти в плоскости эклиптики. В результате поток плазмы солнечного ветра в целом обтекает магнитное поле Земли, формируя своим давлением магнитосферу (рис.1), похожую по форме на комету с длинным магнитным хвостом [1].

Исключением из этой схемы остаются полярные и приполярные области Земли, иногда соединяющиеся магнитным полем с межпланетным пространством и приграничными зонами магнитосферы. Только здесь плазма имеет возможность проникнуть к Земле вдоль магнитного поля. «Высыпаясь» в атмосферу, она возбуждает при столкновениях атомы и молекулы нейтральной атмосферы, вызывая полярные сияния — самое яркое из многочисленных свечений атмосферы Земли.

Зона полярных сияний в глобальном масштабе формирует так называемый авроральный овал — своеобразное светящееся кольцо вокруг полюса. Его хорошо видно со спутника в ультрафиолетовом диапазоне длин волн (рис.2). Магнитное поле из аврорального овала уходит во внешнюю магнитосферу на расстояния, часто большие 50 тыс. км. Более темная зона внутри овала соответствует

* Ермолаев Ю.И., Зеленый Л.М. «Ветер, ветер, ты могуч...» Солнечный ветер и космическая погода // Природа. 2005. №9. С.4—14.

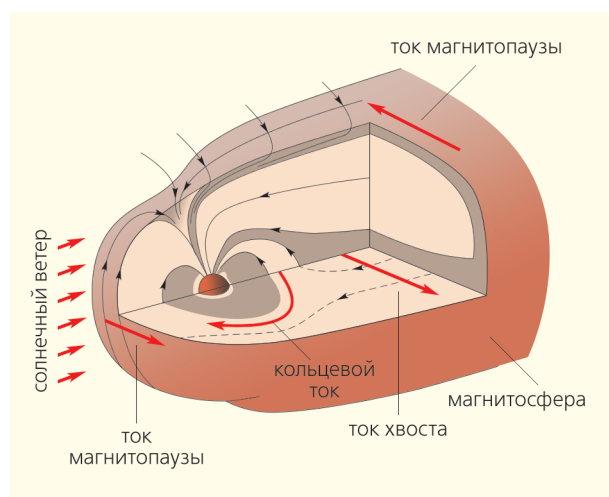


Рис.1. Магнитосфера Земли.

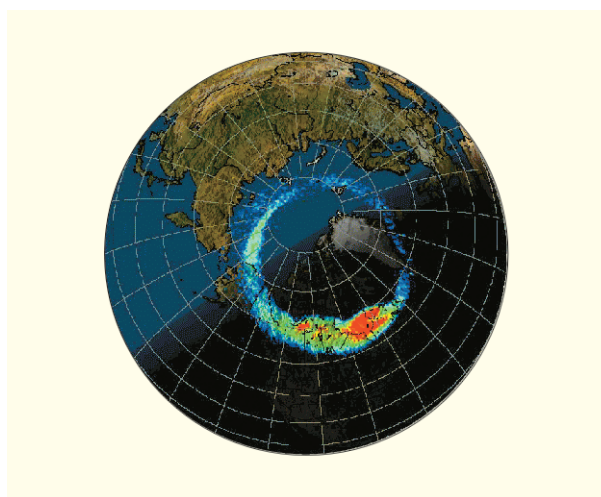


Рис.2. Авроральный овал (наблюдения со спутника «Polar»).

магнитному полю, уходящему за пределы магнитосферы — в солнечный ветер. Наибольшая яркость свечений — на ночной стороне, соответствующей хвосту магнитосферы. Уже одна эта иллюстрация четко свидетельствует о том, что источник полярных сияний — не только солнечный ветер, как это часто говорят, но и магнитосфера. Авроральная зона в обычных условиях расположена примерно на $65\text{--}75^\circ$ магнитной широты, отсчитываемой относительно магнитного экватора (широта магнитного полюса при этом равна 90°).

В результате полярная область оказывается своеобразным экраном, на который проецируются все основные проявления космической погоды в магнитосфере. Только наблюдая за полярными сияниями из космоса, можно увидеть картину целиком. Ни со спутника, проводящего измерения плазмы и магнитного поля где-то в магнитосфере, ни с наземной станции это сделать невозможно — они видят только происходящее в данной точке.

Такая сложная структура магнитосферы должна самосогласованно поддерживаться локальными (космическими) электрическими токами, создаваемыми магнитосферной плазмой («самосогласованно» означает взаимозависимость — магнитное поле определяет свойства плазмы, а плазма в свою очередь создает электрический ток, поддерживающий поле). Энергия, поступающая из солнечного ветра, не расходуется равномерно, а может накапливаться в виде энергии магнитного поля (или, что то же самое, в виде энергии электрических токов) в хвосте. И это тот самый случай, когда хвост «крутит собакой». Магнитный поток, заключенный в хвосте, при накоплении энергии увеличивается, хвост как бы набухает и удлиняется. Через некоторое время происходит внезапная разрядка, энергия сбрасывается частично обратно в солнечный ветер, частично в атмосферу, хвост «сдувается». Это так называемый цикл геомагнитной суббури (термин исторически означает: «маленькая, элементарная буря»), он порождает при разрядке всплеск полярных сияний и геомагнитных вариаций в полярных районах и происходит каждые несколько часов. На рис.3 приведен пример наблюдений аврорального овала со спутника во время начала достаточно крупной суббури. В течение 10 мин существенно увеличилась яркость свечения, оно распространилось из небольшой зоны в нижней правой части овала на почти всю полярную зону.

Во время аномальных возрастаний давления солнечного ветра, после солнечных вспышек, зона активности распространяется «глубже» в магнитосферу, в результате чего авроральный овал — ее отражение — спускается на более низкие широты. Геомагнитные вариации наблюдаются по всей Земле. Такое событие называется магнитной бурей. Суббури тоже становятся особенно сильными, полярные сияния могут наблюдаться на низких широтах, в частности, в Москве.

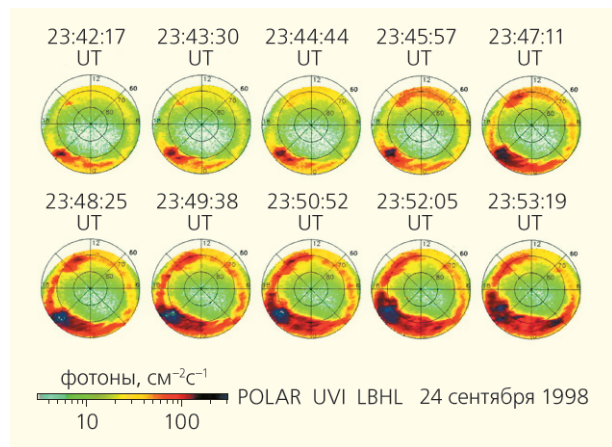


Рис.3. Наблюдения авроральных свечений в УФ-диапазоне со спутника «Polar». Система координат центрирована на магнитный полюс. Дневная сторона расположена сверху. Яркость обозначена цветом от зеленого до темно-красного.

Авроральный ускоритель

Возможно, это покажется удивительным, но механизм полярных сияний — самого известного проявления космической погоды — до сих пор до конца не ясен, и, более того, эта проблема считается одной из самых значимых в космической физике (наряду, например, с ускорением солнечного ветра) [2]. Оценки показывают, что даже если «вытряхнуть» всю плазму магнитосферы в атмосферу, поток и энергия электронов все равно будут недостаточны, чтобы обеспечить видимую яркость сияния (в ярких дугах она доходит до сотен килоэрлеев при визуальном пороге обнаружения около одного килоэрлея) и наблюдаемую глубину проникновения электронов в атмосферу до высоты 100 км. Электроны в хвосте магнитосферы имеют энергию $100\text{--}1000$ эВ, а для возбуждения полярных свечений она должна быть на порядок больше, около $1\text{--}10$ кэВ. И действительно, электроны с такой энергией наблюдаются на спутниках, пролетающих непосредственно над полярными сияниями. За доускорение электронов отвечает так называемый авроральный ускоритель — зона в магнитосфере на высотах в несколько тысяч километров над авроральным овалом, где магнитное поле уже достаточно сильно, а плазма еще разрежена и можно эффективно разогнать электроны без тормозящего эффекта от столкновений с ионами.

Ускоряются электроны, летящие вниз практически вдоль магнитного поля, «продольным» (параллельным магнитному) электростатическим полем.

Как раз механизм появления такого электрического поля и неизвестен. Дело в том, что теория вполне уверенно описывает формирование электрического поля, поперечного магнитному, — так называемого дрейфового. Движение же плазмы вдоль магнитного поля в отсутствие столкновений

не имеет очевидных ограничений (проводимость бесконечно велика), значит, появление продольного электрического поля должно приводить практически к взрывному ускорению и к пробое. Поэтому из общих соображений о стабильности системы такое электрическое поле может существовать только в очень ограниченной области пространства и в импульсном режиме. Сейчас наиболее популярны гипотезы, которые рассматривают различные нелинейные волны большой амплитуды, приходящие из магнитосферы и внезапно увеличивающие амплитуду продольного электрического поля на определенной высоте. На рис.4 изображена условная схема такого ускорителя, расположенного над дугой сияния.

Ускорение происходит в достаточно малых пространственных зонах — поперечный размер одной дуги сияния может составлять ~1 км (и иногда дуга расслаивается даже на более мелкие слои толщиной порядка сотен метров). Проекция дуги в хвост магнитосферы, где зарождаются потоки электронов и волны, ответственные за их ускорение, достигает величины ~1000 км. Подобная детализация измерений в хвосте магнитосферы стала возможной только 10 лет назад — с запуском многоспутниковых миссий («Интербол», «Cluster»)*, достигших времен-

* Зеленый Л.М., Григоренко Е.Е. Миссия «Cluster», восставшая из огня подобно Фениксу // Природа. 2005. №5. С.46—54; Квартет «Cluster» исследует тайны магнитосферы // Там же. №6. С.31—41.

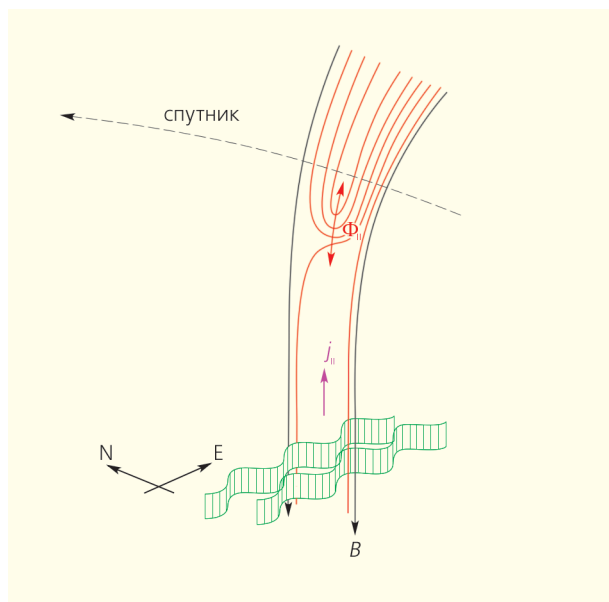


Рис.4. Дуга полярного сияния и авроральный ускоритель над ней. Красным цветом показаны линии электрического потенциала. Штриховая линия — траектория спутника. В левом углу — направления на страны света (север N и восток E). Черные сплошные линии — направление магнитного поля, $j_{||}$ — продольный ток, $\Phi_{||}$ — продольный перепад потенциала.

ного разрешения измерений порядка нескольких секунд (что при характерных скоростях плазмы в несколько сотен километров в секунду как раз и соответствует тысяче километров). Наличие нескольких близко летящих спутников позволяет надежно определить размер плазменных объектов, сравнивая их наблюдения в нескольких соседних точках [3]. В марте 2015 г. стартовала американская четырехспутниковая миссия MMS, временное разрешение измерений которой достигает 10 мс. Поэтому есть основания надеяться, что в скором времени эта проблема будет решена.

Авроральный электроджет

Электроны, вторгающиеся в атмосферу, не только возбуждают на высотах ~100—200 км свечение нейтральных атомов и молекул, но и дополнительно ионизируют их. На освещенной стороне Земли основную роль в ионизации атмосферы и создании ионосферы (верхнего слоя атмосферы с существенным содержанием ионов и электронов) играет ультрафиолетовое излучение Солнца. Однако на ночной стороне, где полярные сияния самые яркие, этот источник отсутствует, и преобладают именно высыпания из магнитосферы. Так как они неоднородны, структура ионосферы здесь тоже неоднородна и очень быстро (и практически непредсказуемо) меняется. Именно эти неоднородности ионизации и создают проблемы для радиосвязи.

Концентрация электронов в ионосфере (появляющихся в результате такой ионизации) определяет проводимость ионосферы. Так сложилось, что высота около 100 км характерна не только для полярных сияний, но и для ионосферных токов (так называемых электроджетов). Здесь электроны уже замагничены (т.е. успевают совершить несколько вращений вокруг магнитного поля между столкновениями), а ионы — уже нет, их более медленное вращение разрушается столкновениями. В результате электроны и ионы при наложении внешнего электрического поля движутся по-разному, и возможно эффективное формирование электрического тока. Эта возможность оказывается в высшей степени востребованной: в момент внезапного начала суббури часть токов магнитосферы (тока хвоста) ответвляется вдоль силовых линий в ионосферу, происходит своего рода «закорачивание» электрической цепи, которое позволяет уменьшить полный ток, текущий поперек хвоста, и, соответственно, сбросить часть накопленного магнитного потока.

Наконец, авроральный ускоритель не только ускоряет электроны,двигающиеся вниз, но, благодаря тому же электрическому полю, вытягивает вверх положительные ионы, заполняя магнитосферу плазмой из земной ионосферы. Наиболее четко это видно по иону O^+ — однократно заря-

женному кислороду. Других источников такого иона в окрестности Земли нет — в солнечном ветре присутствует только малая доля пяти-шестикратно ионизованных ионов кислорода. Во время магнитных бурь доля ионосферного кислорода в хвосте магнитосферы может достигать до 50%, и именно эти ионы из-за своей значительной по сравнению с протонами массы становятся наиболее эффективными переносчиками энергии.

Ключевым моментом оказывается то, что все вышеперечисленные эффекты авроральной активности (сияния, создание проводящих слоев и замыкание электрического тока) не независимы. Без включения аврорального ускорителя нельзя создать достаточной проводимости, эти же высыпания из магнитосферы как раз и переносят электрический ток, замыкающий магнитосферные цепи. Более того, чем выше токи, текущие через ионосферу, тем более интенсивна динамика хвоста магнитосферы, тем больше плазмы и энергии попадает в ионосферу, подпитывая авроральный ускоритель. Получается классическая схема с положительной обратной связью, которая потенциально и может объяснить наличие некоторого порога, обеспечивающего реализацию суббурового цикла накопления и сброса энергии. Однако начало суббури и ее интенсивность практически малопредсказуемы [4]. Более того, иногда происходит и прямо противоположное: магнитосфера переключается в альтернативный режим постоянной диссипации, без циклов накопления и сброса магнитной энергии.

Пример такой смены режимов приведен на рис.5 [5]. Вполне обычная магнитная буря 22—23 ноября 1997 г. характеризовалась постепенным увеличением магнитных возмущений в экваториальных широтах по магнитному индексу $SYM-H$ (современный аналог более известного индекса Dst) до величины примерно -100 нТл (верхний график). Однако ситуация в хвосте магнитосферы и в полярных широтах была более изменчива: магнитное давление в хвосте (средний график) периодически то росло, то падало (это и есть суббури), а в промежутках между пиками, на интервалах порядка 1—2 ч, давление было более или менее постоянным (эти интервалы постоянной диссипации отмечены прямоугольниками). В моменты максимумов давления геомагнитные вариации на полярных станциях (нижний график) резко усиливались до -1000 нТл (в 10 раз сильнее, чем на экваторе!). Почему магнитосфера так переключается из режима в режим, остается неизвестным. Возможно, все дело именно в работе обратной связи через авроральную ионосферу. Ясно одно: без аврорального ускорения магнитосфера Земли была бы другой — не только лишившейся полярных сияний, но и более пассивной и вязкой, без яркой собственной динамики.

Интересную иллюстрацию этой проблемы мы имели возможность наблюдать недавно, весной

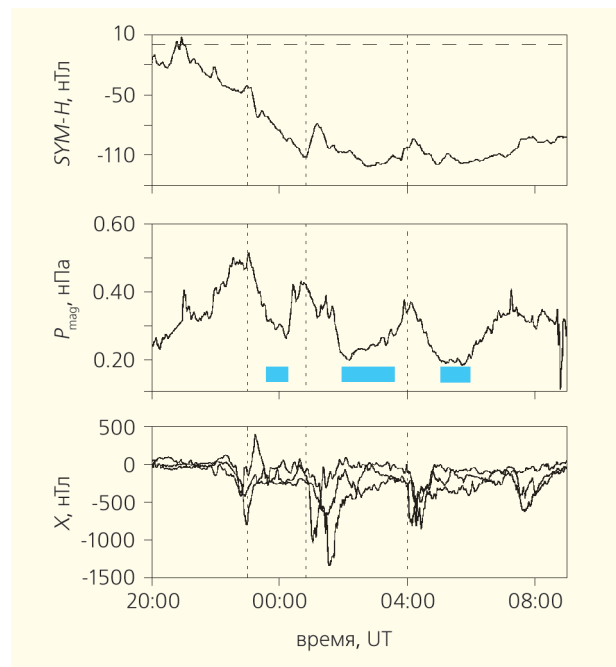


Рис.5. Динамика состояния магнитосферы Земли во время магнитной бури 22—23 ноября 1997 г. Верхний график — индекс экваториальных геомагнитных вариаций $SYM-H$; средний — магнитное давление в хвосте магнитосферы по данным спутника Интербол-1 (P_{mag}); нижний — геомагнитные вариации в полярной зоне (горизонтальный компонент поля X). Вертикальный пунктир отмечает моменты начала суббури. Синие прямоугольники показывают интервалы постоянной диссипации.

2015 г. 17—18 марта разыгралась магнитная буря с амплитудой чуть сильнее, чем -200 нТл по экваториальному индексу. В текущем цикле солнечной активности это стало уникальным событием, однако этот цикл сам по себе весьма слаб: в прошлом таких бурь было не менее 16. Неожиданной чертой данной бури стало появление полярного сияния над Москвой. Ранее сияния были видны в Москве только во время самых сильных бурь, последний раз — в 2003 г. А в марте условия были настолько удачны, что видны были не только светлые пятна на небе, но и характерные формы (заванеска) и цвета (зеленый внизу и красный вверху). Отличную запись сделали автоматические камеры ГАИШ МГУ*. Однако авроральный овал (например, по американской модели на рис.6) в среднем ожидался для таких условий примерно на 10° севернее, и, соответственно, сияний в Москве не ожидалось. Что же произошло? Для динамики магнитосферы важен не только текущий солнечный ветер, но и внутренний цикл накопления и сброса энергии. Согласно индексу полярной геомагнитной активности AL и AU (рис.7), в интересующем нас временном интервале было

* www.facebook.com/video.php?v=669079686530621&pnref=story

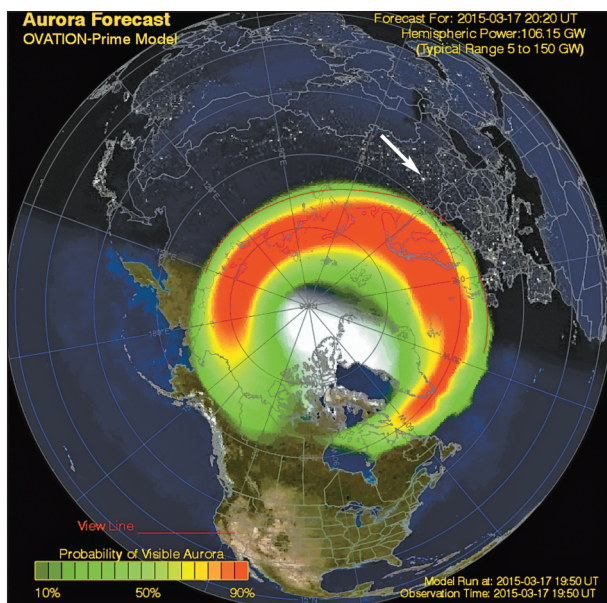


Рис.6. Модель аврорального овала для вечера 17 марта 2015 г. по данным лаборатории Университета Джона Гопкинса (США). Положение Москвы отмечено стрелкой. Зелено-красная шкала показывает вероятность наблюдения полярных сияний. Модель представлена на сайте:

<http://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast>

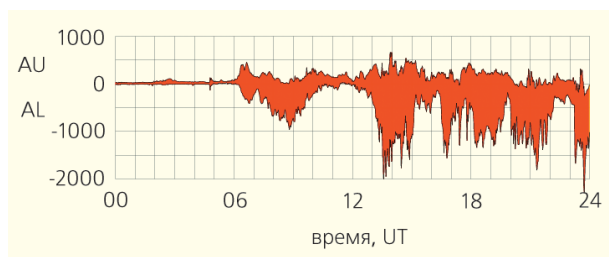


Рис.7. Индексы геомагнитной активности северной авроральной зоны AL и AU (в нТл) для 17 марта 2015 г. с сайта Мирового центра данных по геомагнетизму, Киото (Япония). <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>

несколько очень четких и мощных суббурь с амплитудой почти до -1500 нТл — примерно в 21, 23 и 2 ч московского времени (18, 20, 23 всемирного). Именно это мощные волны накопления и сброса энергии и заставили зону возмущений опуститься ближе к экватору. Предсказать такие движения овала для конкретного события заранее пока совершенно невозможно.

Движение магнитного полюса

В связи с проблематикой космической погоды активно обсуждается и еще один важный именно для Арктики вопрос — движение магнитного полюса. Нетрудно заметить, например, на рис.2, что

авроральный овал как бы сдвинут на Канаду и авроральная зона на «той стороне» спускается до вполне умеренных, плотно заселенных широт. В российской же части она, наоборот, смещена к полюсу (рис.8), что несколько снижает уровень опасности на нашей стороне (так как авроральные явления разыгрываются в основном над районами, освоение которых еще впереди). Этот эффект связан с тем, что магнитные полюса немного (на $10-15^\circ$) не совпадают с географическими. В частности, «северный» магнитный полюс находится в канадской части Арктики (с точки зрения направления магнитного поля этот полюс — южный, и северным его можно называть лишь условно, что мы и будем здесь делать). В последнее время много говорят о том, что магнитный полюс начал быстрое движение в сторону России (рис.9). Это значит, что в среднесрочной перспективе (десятки лет) весь замечательный букет проявлений солнечной активности начнет сильнее влиять на активно осваиваемые сейчас северные регионы нашей страны. В прессе пугают и другими катастрофическими последствиями от сдвига полюса.

Однако тревоги эти выглядят немного преувеличенными. Относительно катастрофичности последствий необходимо прежде всего отметить, что при таких обсуждениях часто путают магнитные полюса и географические. Географический полюс — это точка, через которую проходит ось вращения Земли. Поворот данной оси действительно привел бы к катастрофическим последствиям, однако это может произойти только в результате столкновения с весьма крупным небесным телом (даже большой метеорит подобного действия не окажет), но в таком случае проблема сдвига именно полюса показалась бы будущим обитателям Земли мелочью.

Тем не менее ось вращения Земли действительно немного колеблется относительно эклиптики и направления на Солнце — на несколько градусов за десятки тысяч лет. Эти колебания, называемые циклами Миланковича (по имени первооткрывателя) и связанные с воздействием других планет Солнечной системы и Луны, приводят лишь к малым вариациям освещенности Земли и, соответственно, небольшим изменениям климата. Луна — самый массивный (относительно основного объекта) спутник в Солнечной системе — амплитуду этих колебаний существенно уменьшает. Момент инерции (аналог массы для вращающегося тела) системы Земля—Луна почти в 100 раз больше момента инерции планеты, и, соответственно, отклонить нашу общую ось вращения становится в 100 раз сложнее. Этим мы выгодно отличаемся, например, от Марса, ось вращения которого на интервалах около сотен тысяч лет смещается относительно эклиптики на десятки градусов, что приводит к существенным изменениям климата. Хотя повороты оси вращения и оказывают некоторое влияние на магнит-

ное поле, для Земли это далеко не главная проблема.

С магнитными полюсами, однако, все не так просто, они действительно движутся относительно географических полюсов и даже могут сменить полушарие. Последнее, впрочем, в ближайшие несколько тысяч лет нам наверняка не грозит, и эту тему, хотя и очень интересную, здесь мы обойдем. Остановимся только на движениях полюса в масштабе ближайших ста лет, тенденция которых уже определилась, — это и есть сдвиг полюса и авроральной зоны в сторону России. Насколько проблема актуальна?

Прежде всего, даже определения термина «магнитный полюс» могут быть даны по-разному. «Геомагнитный» полюс — это точка выхода оси магнитного диполя (см. ниже). Есть еще «магнитный полюс» — точка, в которой магнитное поле направлено точно по вертикали по отношению к поверхности Земли. Эти точки разные, потому что магнитное поле Земли имеет весьма сложную конфигурацию.

Уильям Гильберт в конце XVI в. первым предположил, что Земля представляет собой большой магнит, а следовательно, геомагнитное поле аналогично полю такого магнита. Конфигурация поля обычного магнита уже была изучена, это так назы-

ваемый магнитный диполь — структура с двумя полюсами, напоминающая сферическую. Диполь соответствует простейшему источнику магнитного поля — кольцу с электрическим током. Однако структура источников геомагнитного поля внутри Земли более сложна (здесь, говоря о постоянном поле планеты, мы пока временно забудем о магнитосферных токах). Есть сложная комбинация течений в жидком ядре Земли, есть и магнитные аномалии в земной коре у ее поверхности [6]. В ре-

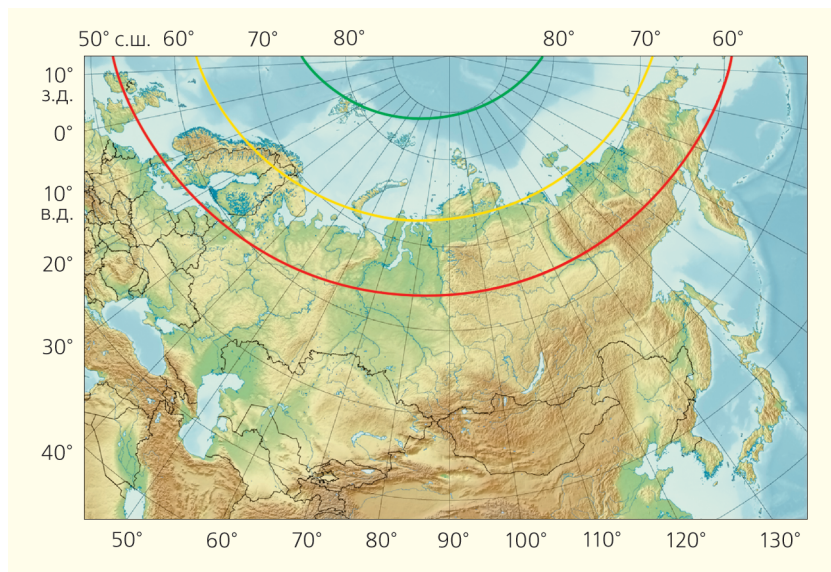


Рис.8. Экваториальная граница авроральной зоны в России для очень спокойных (зеленая дуга), средних (желтая дуга) и возмущенных (красная дуга) условий.

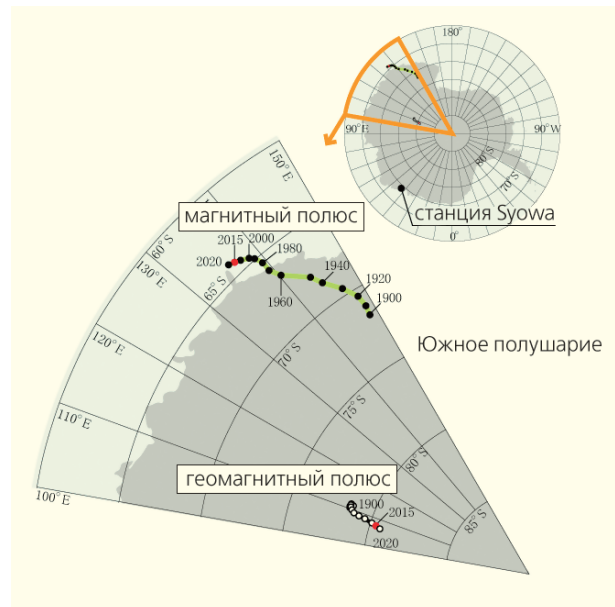
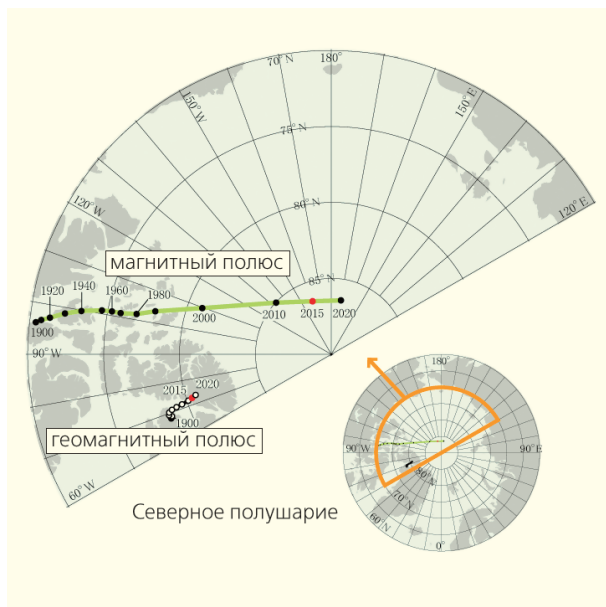


Рис.9. Дрейф магнитного полюса (местной магнитной вертикали) и геомагнитного полюса (полюса магнитного диполя) за последний век.

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>

зультате геомагнитное поле не точно дипольное, хотя и близко к нему. Остаток (после вычитания диполя) удобно разложить на сумму более сложных магнитных конфигураций с четырьмя, восьмью и т.д. полюсами (так называемые квадруполь, октуполь и др.). Всего современная модель геомагнитного поля IGRF включает 13 таких членов с постепенно спадающей амплитудой [7]. Именно эти члены определяют отличие местного поля от дипольного, и, соответственно, положение местной магнитной вертикали — т.е. и координаты магнитного полюса.

Если мы посмотрим на дрейф северных полюсов (а его четко удастся зафиксировать магнитной съемкой, рис.8), то наиболее быстро — на десяток градусов за десяток лет — сдвинулся к российской стороне именно магнитный полюс, а геомагнитный (дипольный) ушел максимум на пару градусов. Это означает, что меняется прежде всего местная картина поля, малые члены в разложении, а не основной дипольный компонент. Однако взаимодействие Земли с солнечным ветром и положение аврорального овала определяет именно дипольная часть геомагнитного поля, так как она спадает при удалении от Земли гораздо медленнее, чем все остальные. Интересно, что южный магнитный полюс движется в противоположную сторону (северный — к географическому полюсу, а южный — к экватору), подтверждая таким образом чисто местный характер явления. Геомагнитные же полюса движутся синхронно (и гораздо медленнее магнитных), так что, несмотря на то что поворот магнитного диполя действительно происходит, говорить о каком-либо быстром сдвиге авроральной активности к Российской Арктике пока не приходится, хотя тенденция такая несомненно есть.

Опасности и их прогноз

Несмотря на свое название, «космическая погода» кардинальным образом влияет не только на космические аппараты и работающих на орбите космонавтов, но и на совершенно земные технические системы и земную биосферу, особенно в обсуждавшихся полярных и приполярных областях. В сумме энергия магнитной бури может достигать 10^{16} – 10^{17} Дж, типичной суббури — 10^{14} – 10^{15} Дж, и от одного до десяти процентов этой энергии попадает в полярную ионосферу [8, 9]. В результате суммарная мощность возмущений аврорального овала в ходе бури составляет десятки гигаватт, а авроральные токи — электроджеты — достигают интенсивности в миллионы ампер. Ясно, что если у вас над головой появится электрическая система с мощностью в несколько раз больше мощности какой-нибудь очень крупной электростанции (например, Саяно-Шушенской ГЭС), бесследно это не пройдет, прежде всего в смысле возбуждения мощных электромагнитных помех. Первым

исторически замеченным следствием магнитных бурь были отказы магнитных компасов. Становится затрудненной и коротковолновая радиосвязь. Причина понятна — для дальней радиосвязи необходимо отражение радиоволн от ионосферы, и если размывается четкая слоистая структура распределения электронов по высоте, то разрушаются и зеркала, от которых могло бы происходить отражение радиоволны. Во время сильных бурь радиосвязь в КВ-диапазоне пропадает на всей планете. В полярных же регионах это происходит во время «зажигания» полярных сияний практически всегда, ведь высыпания из магнитосферы создают очень неоднородную структуру ионизации.

Кажется, что все это уже в прошлом, ведь сейчас мы используем спутниковую навигацию вместо компаса. Спутниковая и мобильная радиосвязь работает в диапазоне гораздо более высоких частот (около 1 ГГц), где влияние ионосферы заметно ослабевает. Но не все так просто. На коротких волнах работают радары оборонных систем дальнего обнаружения. Магнитный компас до сих пор используют, например, для определения ориентации при горизонтальном бурении. Да и высокочастотные, гигагерцевые, радиосигналы, хоть и проходят через ионосферу насквозь, рассеиваются на неоднородностях, что приводит к потере непрерывности получаемых данных. Найти дорогу домой с навигатором такой сбой не помешает, а вот посадить самолет или провести точную геодезическую привязку может помешать вполне.

Еще один новый блок проблем возник в связи с развитием арктических коммуникаций — трубопроводов, электросетей и железных дорог. Все эти объекты представляют собой длинные проводники, идеальные антенны для восприятия относительно медленных геомагнитных и геоэлектрических вариаций (имеющих периоды 10–1000 с). В них наводятся паразитные токи (по опыту наблюдений, достигающие сотен ампер), которые способны вызвать отказ систем автоматизации трубопроводов, железнодорожной сигнализации и др. При попадании в высоковольтные линии электропередачи такие почти постоянные помехи могут сдвинуть режим работы трансформаторов в зону насыщения, что приводит к их перегреву и поломке. На востоке Канады и США (где из-за сдвига магнитного полюса авроральная зона спускается ниже к экватору, в достаточно умеренные географические широты до 50–60°) накоплен целый список таких аварий региональных электросистем. После самой печально известной из них, произошедшей в 1989 г. и оставившей несколько миллионов человек без света, был принят ряд мер для стабилизации энергосистем. Техническая защита от всех таких проблем, конечно, существует (например, резервирование), но стоит она слишком дорого, и тут как раз могут помочь надежные прогнозы космической погоды.

Здесь необходимо отметить несколько обстоятельств. Во-первых, такой прогноз невозможно сделать с применением лишь наземных средств наблюдения. Данные по солнечным вспышкам, потокам солнечного ветра, динамике магнитосферы, глобальным полярным сияниям можно получить только с помощью космических аппаратов. Во-вторых, для мониторинга и прогноза необходимо использовать специализированные спутники, отличающиеся от спутников для фундаментальных исследований Солнца и околоземной среды наличием каналов связи (которые обеспечивают мгновенную передачу информации на Землю) и расположением в особых ключевых точках (где можно вести постоянные однородные наблюдения — например, для слежения за солнечным ветром удобны точки либрации). Наконец, данные по мониторингу и прогнозу в глобальном охвате, в том, что касается наблюдений Солнца и магнитных бурь в целом, хоть и выполняются в основном зарубежными спутниками и обсерваториями, доступны через Интернет и остаются пока практически всеобщим достоянием (сейчас ни одна страна не может обеспечить весь комплекс измерений). Однако данные мониторинга и прогноза с региональной привязкой обычно закрыты из-за их оборонного и коммерческого значения. Кроме того, необходимо и размещение достаточного количества обсерваторий именно в зоне интереса. Поэтому здесь можно рассчитывать только на себя.

В Академии наук разработана серьезная программа исследований солнечной активности. Ученые из Иркутского института солнечно-земной физики создают сейчас многофункциональный наземный комплекс для изучения космической погоды, в том числе в Арктическом регионе. Вместе с Росгидрометом институты РАН реализуют многоспутниковую программу под названием

«Геофизика» для мониторинга ионосферы. Остается установить наблюдения за полярными сияниями, наиболее информативным признаком активности в полярном регионе. Для этого разрабатывается специальный ультрафиолетовый телескоп «Авровизор» [10]. Вероятно, к следующему максимуму солнечной активности (после 2020 г.) российская наука будет готова лучше.

* * *

В заключение хочется вспомнить стихотворение А.Л.Чижевского, посвященное солнечной активности и Галилею. Сегодня мы знаем, в чем Чижевский был прав (в том, что солнечная активность влияет на Землю) и в чем неправ (в ее влиянии на ход истории). Самое главное же — это то, что мы можем предсказать и предотвратить большинство неприятностей.

*И вновь и вновь взошли на Солнце пятна,
И омрачились трезвые умы,
И пал престол, и были неотвратны
Голодный мор и ужасы чумы.*

*И вал морской вскипел от колебаний,
И норд сверкал, и двигались смерчи,
И родились на ниве состязаний
Фанатики, герои, палачи.*

*И жизни лик подернулся гримасой;
Метался компас — буйствовал народ,
А над Землей и над людскою массой
Свершало Солнце свой законный ход.*

*О ты, узревший солнечные пятна
С великолепной дерзостью своей, —
Не ведал ты, как будут мне понятны
И близки твои скорби, Галилей! ■*

Литература

1. Маленькая энциклопедия «Физика космоса». М, 1986.
2. Paschmann G, Haaland S., Treumann R. Introduction to auroral plasma physics // Space Science Reviews. 2002. V.103. Iss.1—4. P.1—19.
3. Зеленый Л.М., Малова Х.В., Артемьев А.В. и др. Тонкие токовые слои в бесстолкновительной плазме: равновесная структура, плазменные неустойчивости и ускорение частиц // Физика плазмы. 2011. Т.37. №2. 137—182.
4. Petrukovich A.A. The elusive onset of geomagnetic substorms // Science. 2008. V.321. P.920—921.
5. Petrukovich A.A. Storm-time and quiet-time substorms in the magnetotail // Disturbances in geospace: the storm-substorm relationship / Eds A.S.Sharma, Y.Kamide, and G.S.Lakhina // Geophysical Monograph Series. American Geophysical Union. 2004. V.142. P.37—43.
6. Короновский Н.В. Магнитное поле геологического прошлого Земли // Соросовский образовательный журнал. 1996. №5. С.56—63.
7. Лукьянова Р.Ю. Магнитный переполох // Наука и жизнь. 2014. №8. С.2—9.
8. Петрукович А.А., Зеленый Л.М. Прогноз погоды XXI века // Наука и жизнь. 2002. №5. С.2—8.
9. Солнечно-земные связи и космическая погода // Плазменная гелиогеофизика / Ред. А.А.Петрукович, Л.М.Зеленый, И.С.Веселовский. М., 2008. С.175—257.
10. Кузьмин А.К., Мерзлый А.М. Перспективный эксперимент по контролю состояния ионосферы Земли с помощью оптического комплекса «Авровизор-ВУФ» в составе группировок высокоапогейных и низкоорбитальных космических аппаратов // Вопросы электромеханики. 2014. Т.142. С.3—18.