

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В АНТАРКТИКЕ: МОНИТОРИНГ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Космической погодой называют комплекс явлений и процессов в космическом пространстве, которые связаны с солнечной активностью и оказывают критическое воздействие на среду обитания человека (геофизическую обстановку). Основными агентами солнечного влияния являются солнечная УФ-радиация, потоки солнечной плазмы, несущие магнитное поле Солнца (солнечный ветер), высокоэнергичные протоны и электроны (солнечные космические лучи). Под воздействием регулярного солнечного ветра магнитное поле Земли (которое в первом приближении является полем магнитного диполя) сжимается на дневной, подсолнечной стороне и вытягивается в анτισолнечном направлении на ночной стороне. Таким образом, в космическом пространстве, заполненном солнечным ветром, формируется полость — магнитосфера, где физические процессы контролируются геомагнитным полем. Форма и размеры земной магнитосферы определяются параметрами солнечного ветра, такими как скорость и плотность солнечной плазмы и величина магнитного поля, переносимого

При действии регулярного «спокойного» солнечного ветра дневная граница магнитосферы находится на расстоянии 10–12 земных радиусов (R_E), утренняя и вечерняя границы на $\sim 15 R_E$, «хвост» магнитосферы простирается на десятки R_E . Взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли представлено схематически на рис. 1, где синим цветом показаны идущие от Солнца потоки плазмы, их торможение на границе магнитосферы и последующее проникнове-

ние внутрь магнитосферы, желтыми тонкими линиями показаны силовые линии геомагнитного поля. Следует помнить о реальном масштабе явлений: Земля находится на расстоянии 149 000 000 км от Солнца, радиус Солнца равен $\sim 696\,000$ км, радиус Земли — $6\,340$ км.

Активные области на Солнце (вспышки, протуберанцы, солнечные пятна) являются источником потоков высокоскоростной солнечной плазмы, содержащей, как правило, сильное магнитное поле. Как раз эти потоки, пронизывающие со скоростью более 800 км/с «спокойный» солнечный ветер (скорость которого ~ 300 км/с), определяют изменчивый характер космической погоды. Воздействие «возмущенного» солнечного ветра, который приходит к Земле на третьи сутки, ведет к изменению формы и размера магнитосферы (в экстремальных ситуациях дневная граница магнитосферы приближается к Земле на расстояние до $6 R_E$). При этом в магнитосфере генерируется комплекс процессов и явлений, называемых магнитосферными возмущениями, которые затрагивают все технические аспекты жизнедеятельности человека. Наиболее сильными проявлениями маг-

нитосферных возмущений являются мировые магнитные бури и магнитосферные суббури. Магнитная буря — это планетарное уменьшение интенсивности геомагнитного поля, обусловленное формированием вокруг Земли кольцевого тока, текущего на расстоянии $\sim 3\text{--}7 R_E$ (см. рис. 1). Магнитосферные суббури характеризуются интенсивными магнитными возмущениями в высоких широтах, куда вторгаются мощные потоки заряженных частиц, поступившие в магнитосферу. Визуальным индикатором таких вторжений служат активные формы полярных сияний (аврора), поэтому полоса широт, где они наблюдаются, носит название авроральной зоны, а магнитосферные суббури часто называют авроральными бурями. При этом в полярных шапках Земли всегда наблюдается также особая, но слабая, по сравнению с суббурями, магнитная активность, обусловленная непрерывным воздействием на магнитосферу «спокойного» солнечного ветра.

Магнитосферные возмущения являются прямой или косвенной причиной многочисленных неполадок

и нарушений в функционировании сложных радиотехнических систем наземного и космического базирования, таких как: нештатное функционирование радионавигационных и радиолокационных систем, проблемы телекоммуникации и систем связи, выход из строя силового и электронного оборудования, нарушения в работе энергетических систем и трубопроводов. Основными факторами, обуславливающими такие негативные эффекты, служат изменения

в структуре авроральной ионосферы. Благодаря высокой степени ионизации ионосфера обладает свойством отражать радиоволны коротковолнового диапазона. Именно эта особенность ионосферы лежит в основе работы систем радиосвязи, радионавигации и радиолокации. Вторжение заряженных «авроральных» частиц оказывает сильнейшее воздействие на ионосферу, вследствие чего распространение радиоволн в возмущенных условиях становится нерегулярным и временами может полностью прекращаться. Ионосферные возмущения оказывают критическое воздействие не только на наземную радиосвязь, но и на прохождение трансionoсферных радиосигналов со спутников, что ведет к нарушениям в системах спутниковой связи и навигации. Другим сильнейшим эффектом вторжения заряженных частиц является резкое повышение проводимости авроральной ионосферы на высотах слоя E и генерация в авроральной зоне мощных электрических токов (электроджетов) мощностью до нескольких миллионов ампер. Формирование электроджетов сопровождается генерацией индуцированных («наведенных») токов в линиях электропередач

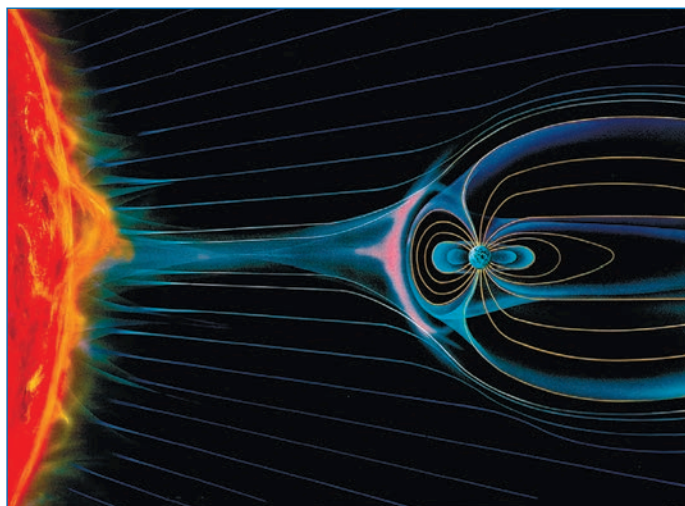


Рис. 1. Солнце и земная магнитосфера

и трубопроводах на земной поверхности с соответствующими негативными и даже катастрофическими последствиями. В частности, даже незначительные магнитные возмущения приводят к сбоям в работе или к полной остановке прецизионной навигации бурового инструмента при наклонно-направленном бурении газовых и нефтяных скважин.

Высокоэнергичные частицы солнечного и магнитосферного происхождения оказывают также сильное воздействие на спутниковую аппаратуру и обуславливают радиационное облучение не только космонавтов, но и экипажей и пассажиров самолетов на высокоширотных авиалиниях. Имеются достоверные сведения о влиянии магнитосферных возмущений на здоровье людей (на состояние сердечно-сосудистой системы и функциональную активность мозга). Поэтому проблема неблагоприятной космической погоды оказывается связанной с широким кругом задач, имеющих как хозяйственное, так и оборонное значение, при этом степень воздействия космической погоды усиливается по мере внедрения в повседневную жизнь микропроцессорной техники и нанотехнологий.

Геомагнитный диполь располагается под углом к оси вращения Земли, поэтому геомагнитные полюса не совпадают с географическими полюсами. В Северном полушарии геомагнитный полюс смещен относительно географического полюса в сторону Америки. В американском секторе долгот авроральная зона (полоса геомагнитных широт от 60 до 70°) проецируется на южную часть Канады, тогда как в евро-азиатском секторе авроральная зона проходит вдоль побережья Северного Ледовитого океана. При этом во время сильных магнитных бурь авроральная зона смещается далее к экватору.

В силу своего географического положения (близости к авроральной зоне) США и Канада уже давно столкнулись с негативными последствиями магнитосферных возмущений. Так, резкий рост индуцированных токов во время магнитной бури 13 марта 1989 года привел к разрушению трансформатора на атомной станции в Нью-Джерси и к последующему выходу из строя всей системы электроснабжения на северо-востоке США. Согласно оценкам специалистов, в случае очень сильных возмущений космической погоды суммарные по земному шару финансовые потери могут достигать 2 трлн долларов США. В случае экстремально мощных солнечных вспышек, которые могут происходить один раз в несколько сотен лет, финансовые потери будут значительно выше.

Учитывая эти обстоятельства, в США давно ведутся оперативные спутниковые измерения параметров солнечного ветра за пределами магнитосферы с целью создания и совершенствования наблюдательных платформ и систем, обеспечивающих надежный прогноз космической погоды и возможность предотвращения негативных последствий ее резких изменений. Краткосрочный прогноз космической погоды осуществляется по данным

постоянных измерений параметров солнечного ветра на борту спутников, находящихся в точке либрации (на удалении около 1,5 млн км от Земли, там где сила притяжения Солнца уравновешивается силой притяжения Земли). Параметры солнечного ветра, зафиксированные в точке либрации, затем пересчитываются на магнитопаузу с учетом измеренной скорости солнечного ветра при молчаливом допущении, что (1) солнечный ветер, зафиксированный в точке Лагранжа, всегда контактирует с магнитосферой и (2) свойства солнечного ветра (т. е. параметры V_{sw} и B_z, B_y компоненты межпланетного магнитного поля (ММП)) не изменяются на пути от точки Лагранжа до земной магнитопаузы. Заблаговременность прогноза (30–60 минут) определяется временем, за которое солнечный ветер проходит от точки либрации до Земли, и, следовательно, зависит от радиальной скорости солнечного ветра. Измерения межпланетного магнитного поля и параметров солнечной плазмы в точке либрации оперативно доступны только американской прогностической службе. Эта информация, заблаговременное знание которой является необходимым для краткосрочного прогноза состояния земной магнитосферы, публикуется на сайте OMNI, но не с той степенью оперативности, которая необходима для целей прогнозирования явлений космической погоды. Россия таких измерений не проводила и не проводит и, следовательно, в части, касающейся краткосрочного прогноза космической погоды, находится в информационной зависимости от служб космической погоды США.

Иначе обстоит дело с мониторингом космической погоды. Исследования, выполненные в ААНИИ более 30 лет назад, показали, что магнитная активность в полярных шапках Земли определяется силой влияния солнечного ветра на магнитосферу, а именно, «функцией взаимодействия» $E_{KL} = V_{sw} \cdot (B_y^2 + B_z^2)^{1/2} \sin^2 \theta / 2$, которая является оптимальной комбинацией таких геоэффективных параметров солнечного ветра, как скорость ветра V_{sw} , азимутальная B_y и вертикальная B_z компоненты межпланетного магнитного поля и угол θ наклона ММП по отношению к геомагнитному диполю. В ходе постоянного воздействия солнечного ветра на земную магнитосферу в ней непрерывно формируются электрические поля и соответствующие продольные (текущие вдоль силовых линий магнитного поля) токи, которые замыкаются через полярную ионосферу (рис. 2). Как результат, в полярных шапках непрерывно действует система ионосферных токов, ответственных за наземные магнитные возмущения. Интенсивность этих возмущений оказывается пропорциональной величине функции E_{KL} , т. е. силе воздействия солнечного ветра. В 1988 году в ААНИИ был разработан и в кооперации с Датским метеорологическим институтом (DMI), а затем Космическим институтом Датского технического университета (DTU Space) введен в практику специальный индекс магнитной активности в полярных шапках (PC index).

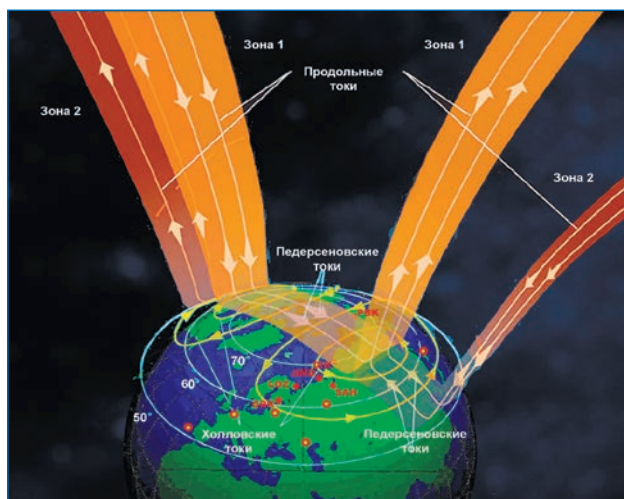


Рис. 2. Система продольных токов, текущих вдоль силовых линий в магнитосфере, и системы токов, текущих в полярной ионосфере, ответственных за генерацию магнитных возмущений в полярной шапке

1-минутный PC индекс рассчитывается независимо по данным магнитных наблюдений на околополюсных станциях Туле в Гренландии (PCN) и Восток в Антарктике (PCS). Специальная методика расчета PC индекса, разработанная в АНИИ, принимает во внимание суточные и годовые изменения проводимости ионосферы в каждой точке, так чтобы PC индекс характеризовал только те изменения магнитной активности, которые обусловлены влиянием

солнечного ветра. Многочисленные анализы, проведенные с использованием спутниковых данных о параметрах солнечного ветра, показали, что PC индекс строго следует вариациям функции E_{KL} , характеризующей мощность воздействия солнечного ветра. Более того, была выявлена взаимосвязь между поведением PC индекса и развитием магнитных бурь и суббурь. Именно эти свойства PC индекса определяют его принципиальное отличие от различных «функций взаимодействия» (которые характеризуют геоэффективность солнечного ветра) и от индексов магнитной активности AL и Dst (которые характеризуют энергию солнечного ветра, реализованную в магнитосфере в форме суббурь или магнитных бурь). Учитывая эти результаты, Международная ассоциация геомагнетизма и аэронавтики (МАГА) одобрила PC индекс магнитной активности как *показатель энергии, поступающей в магнитосферу в процессе взаимодействия магнитосферы с солнечным ветром*.

Рис. 3 показывает, в качестве примера, изменения PCN и PCS индексов и интенсивности суббури (AL индекс) в ходе магнитной бури 10–11 мая 2024 года, когда полярные сияния наблюдались даже в Кисловод-

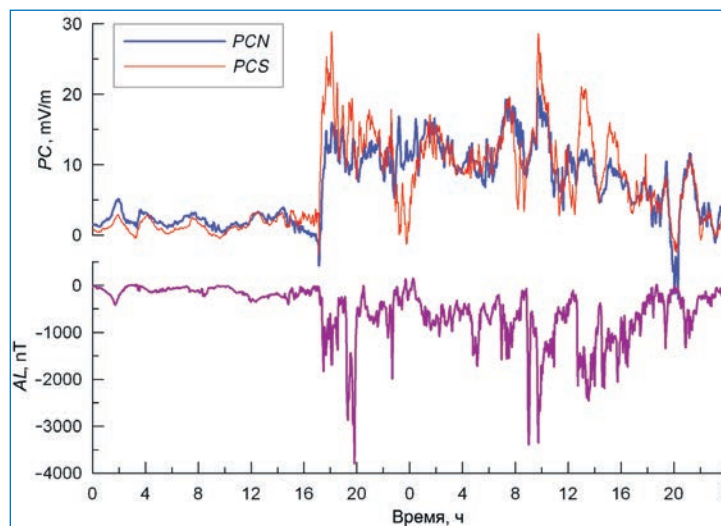


Рис. 3. Ход PCN и PCS индексов и развитие суббури (AL индекс) в период 10–11 мая 2024 года

чаев не соответствует тому солнечному ветру, который взаимодействует с магнитосферой (Vokhmyanin M.V., Stepanov N.A., Sergeev V.A. On the evaluation of data quality in the OMNI interplanetary magnetic field database // Space Weather. 2019. Vol. 17. № 3. P. 476–486; Troshichev O.A., Sormakov D.A. PC index as a proxy of the solar wind energy that entered into the magnetosphere: Verification of the solar wind parameters presented at OMNI website // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2019. Vol. 196. 105147). Действительно, параметры солнечной плазмы, распространяющейся в космическом пространстве, могут испытывать значительные изменения во времени и пространстве вследствие высокой неоднородности солнечного ветра. Поэтому «рассчитанный» солнечный ветер (т. е. солнечный ветер, зафиксированный в точке либрации и редуцированный к земной магнитопаузе) может существенно отличаться от реального солнечного ветра, воздействующего на магнитосферу. Очевидно, что в этих случаях краткосрочный прогноз космической погоды, сделанный по данным измерений в точке либрации, оказывается некорректным. В этой связи следует особо отметить, что PC индекс, получаемый в оперативном ре-

ске (рис. 4). Как можно видеть, PCN и PCS индексы превышали в этот период уровень ~ 10 мВ/м, а интенсивность суббури достигла величины 3700 нТ. Отметим, что критический уровень PC индекса, при котором обычно начинаются суббури, лежит в пределах $1,5 \pm 0,5$ мВ/м.

Особое внимание научной общественности привлекли исследования, которые свидетельствовали о том, что солнечный ветер, фиксируемый в точке либрации, в 20 % слу-

Рис. 4. Снимок сияния, выполненный 11 мая 2024 года в Кисловодске (КГО ГАИШ МГУ)

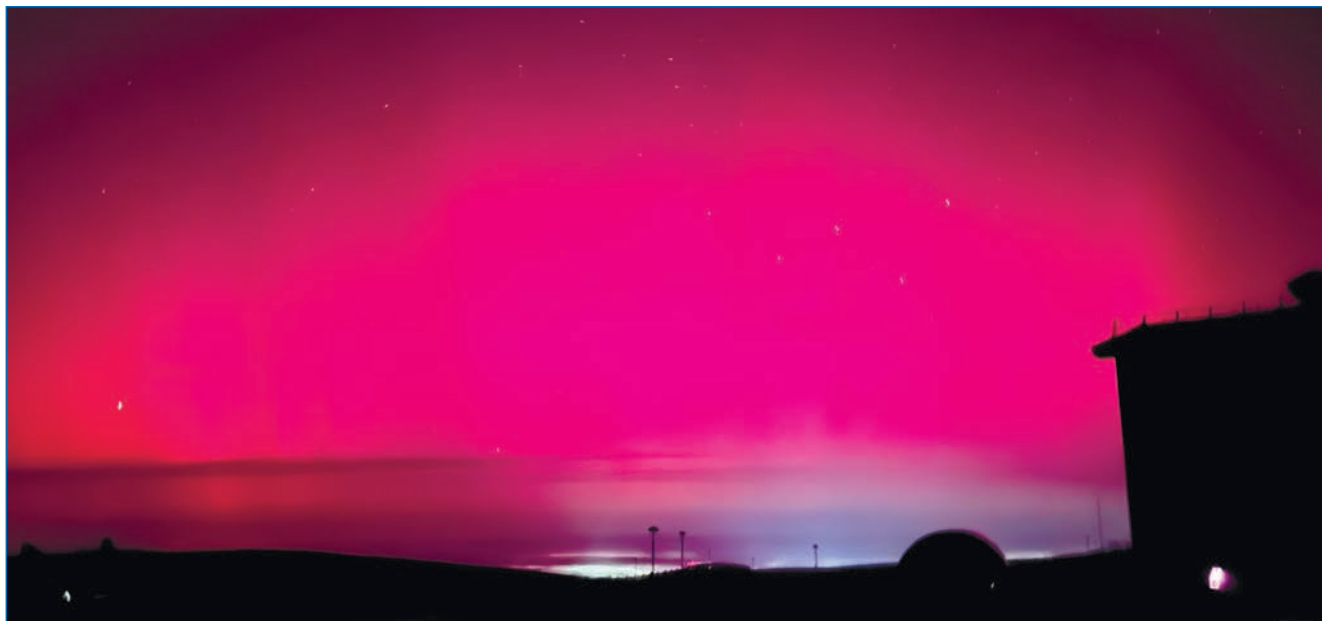




Рис. 5. Вид станции Восток (Антарктика) после реконструкции. Фото П.И. Лунёва

жиге, дает возможность оценить реальное воздействие солнечного ветра на магнитосферу и, таким образом, верифицировать пригодность параметров солнечного ветра, представляемых на сайте OMNI, для анализа солнечно-земных связей.

Возможности использования *PC* индекса как стандарта оценки мощности магнитосферных возмущений были рассмотрены Международной организацией по стандартам (International Standard Organization, ISO). Технический отчет, подготовленный ААНИИ, был рассмотрен рабочей группой ISO WG4 («Космическая окружающая среда») и одобрен представителями различных государств — участников ISO. В 2019 году технический комитет ISO TC20/ПК14 («Космические системы и эксплуатация») рекомендовал этот технический отчет (DTR 23989) в качестве нормативного документа при подготовке нового технического проекта ISO по использованию *PC* индекса в качестве стандарта оценки поступающей в магнитосферу энергии солнечного ветра.

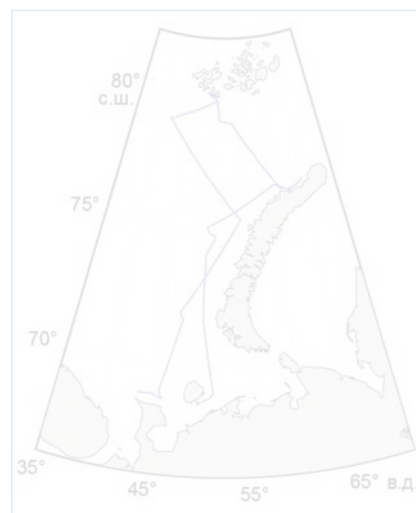
1-минутный *PC* индекс, вычисляемый в режиме реального времени, находится в открытом доступе на сайте <http://pcindex.org>. Согласно сведениям Яндекс Метрики, ежедневно фиксируется более 500 посещений этого сайта (за последний год число посещений превысило 150 000), что свидетельствует не только о мировом признании *PC* индекса, но и о его широком применении в практике научных и прикладных исследований. К сожалению, в России *PC* индекс такой популярностью не пользуется, информация о солнечном ветре, публикуемая американским сайтом OMNI, считается, по-видимому, достаточной. Главной заботой создателей *PC* индекса на 2024–2025 годы является непрерывное, на должном техническом уровне проведение магнитных наблюдений на станции Восток (рис. 5) во время полной реконструкции этой антарктической станции.

О.А. Трошичев (ААНИИ)

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ААНИИ В ХОДЕ ЭКСПЕДИЦИИ «АРКТИЧЕСКИЙ ПЛАВУЧИЙ УНИВЕРСИТЕТ – 2024» НА НИС «ПРОФЕССОР МОЛЧАНОВ» В ИЮНЕ–ИЮЛЕ 2024 ГОДА

В 2024 году в рамках проекта «Арктический плавучий университет» была организована новая научно-образовательная экспедиция. Как и в предыдущие годы, экспедиция проходила на научно-исследовательском судне «Профессор Молчанов». Экспедиционные исследования проводились в период с 25 июня по 15 июля в акватории Баренцева моря, а также на островах архипелагов Земля Франца-Иосифа и Новая Земля и острове Колгуев. В экспедиции принимало участие множество научных и образовательных учреждений РФ, но, как всегда, основными организаторами экспедиции были Северный арктический федеральный университет (САФУ) и Северное управление гидрометслужбы (Северное УГМС).

Уже много лет подряд Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ) принимает участие в организации и проведении экспедиций Арктического плавучего университета, а сотрудники института проводят исследования в экспедиционных



Маршрут экспедиции