

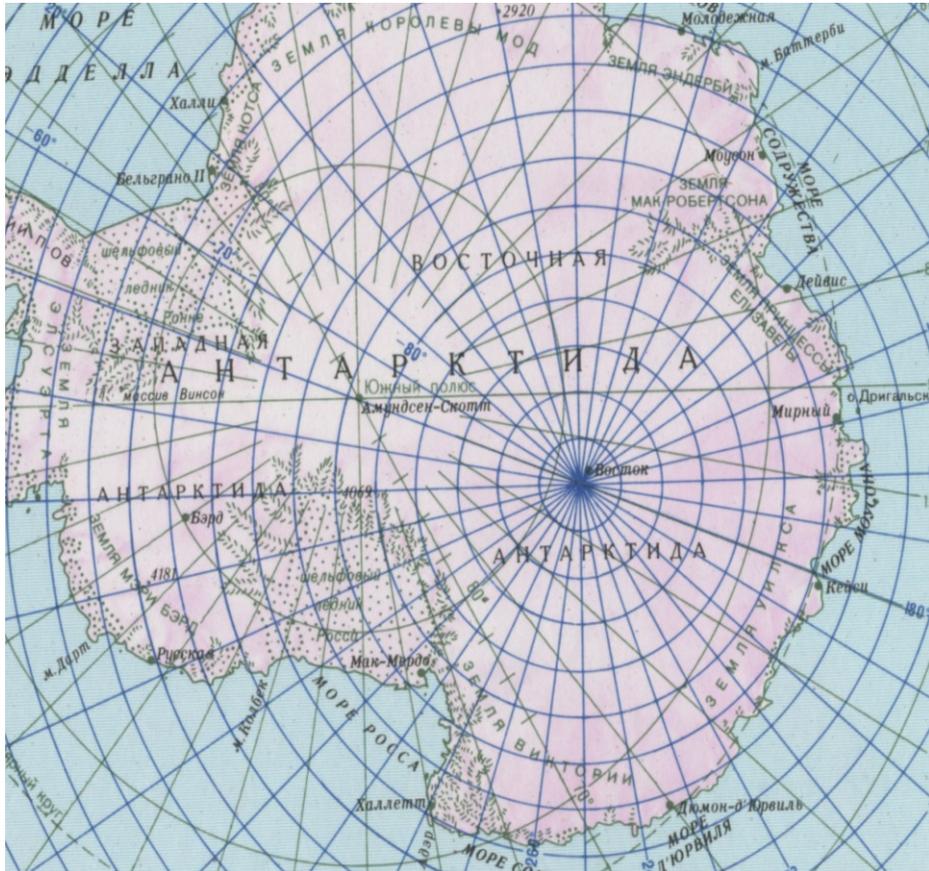


**Возмущённость магнитного поля на станции
Восток как показатель
состояния "космической погоды"**

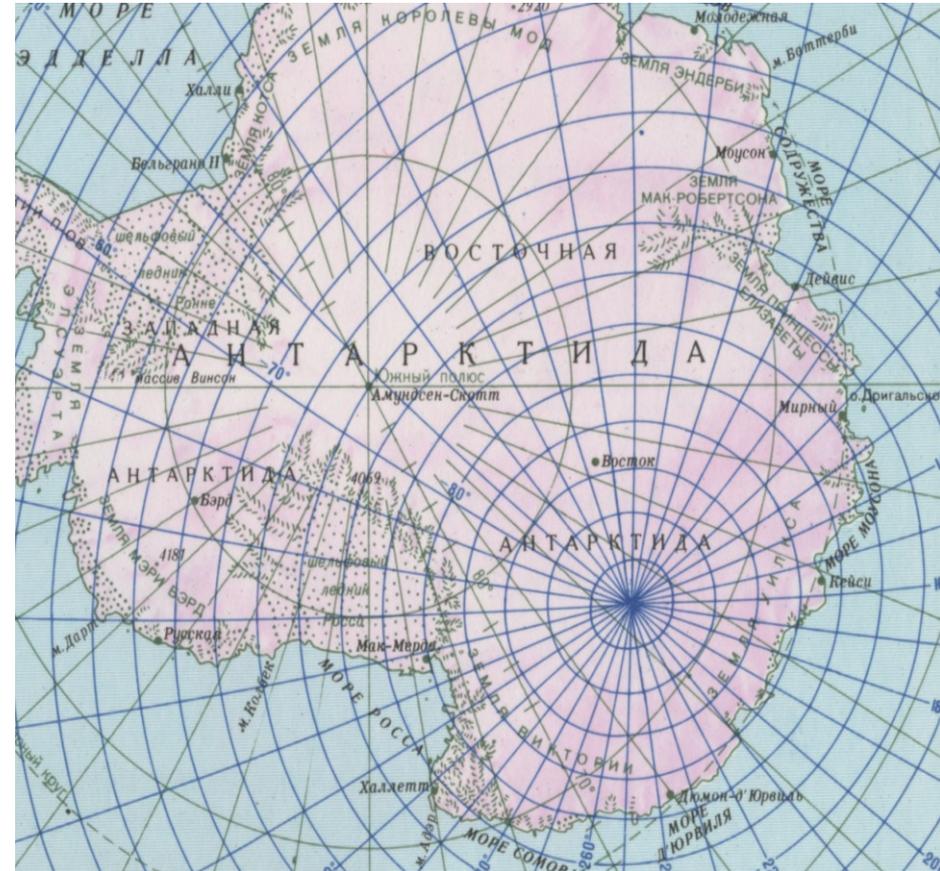
О.А.Трошичев
АНИИ, С.Петербург

Особенности местоположения станции Восток

Система магнитных (дипольных) координат

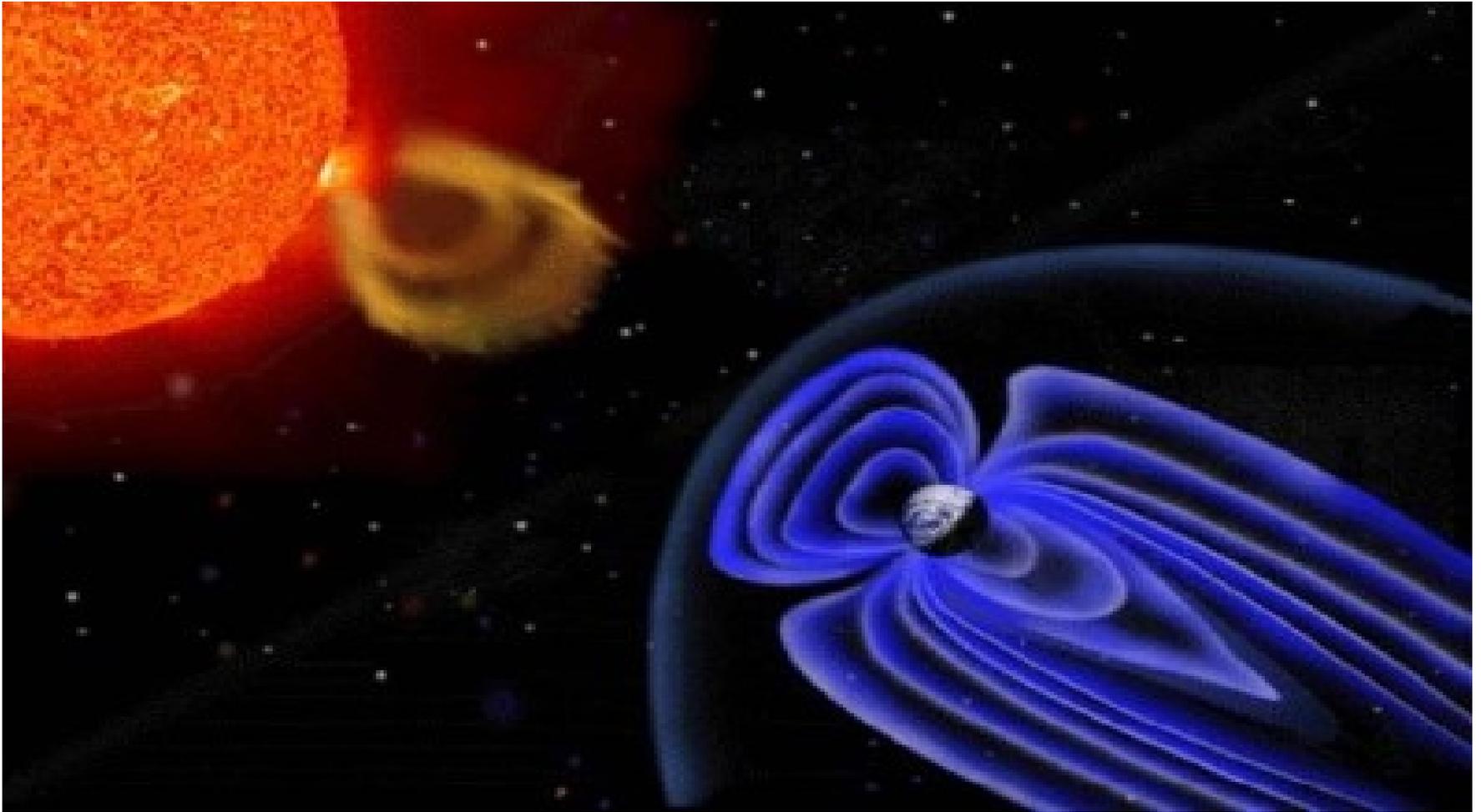


Система магнитосферных координат



Местоположение ст. Восток (в области геомагнитного полюса) обеспечивает уникальную возможность надёжного мониторинга и текущего прогноза (nowcasting) «космической погоды» по данным наземных магнитных измерений.

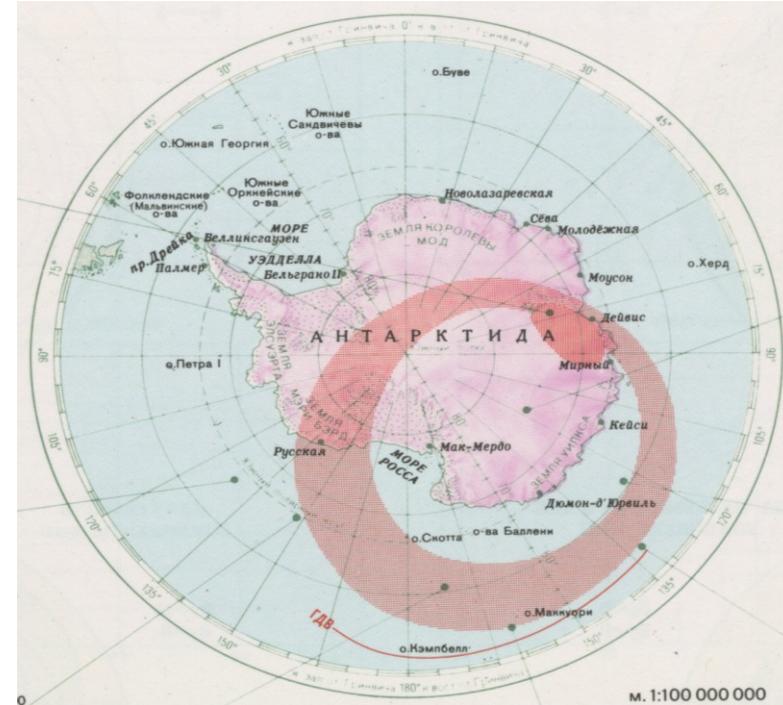
Космическая погода



Околоземное космическое пространство – магнитосфера Земли – находится под постоянным воздействием потоков плазмы, излучаемой Солнцем в космическое пространство. При аномальных изменениях параметров солнечной плазмы в земной магнитосфере возникает комплекс процессов (называемых «космической погодой»), фиксируемых на земной поверхности в виде магнито-ионосферных возмущений

Магнито-ионосферные возмущения

Визуальным проявлением магнито-ионосферных возмущений являются полярные сияния, которые наблюдаются в авроральной зоне.



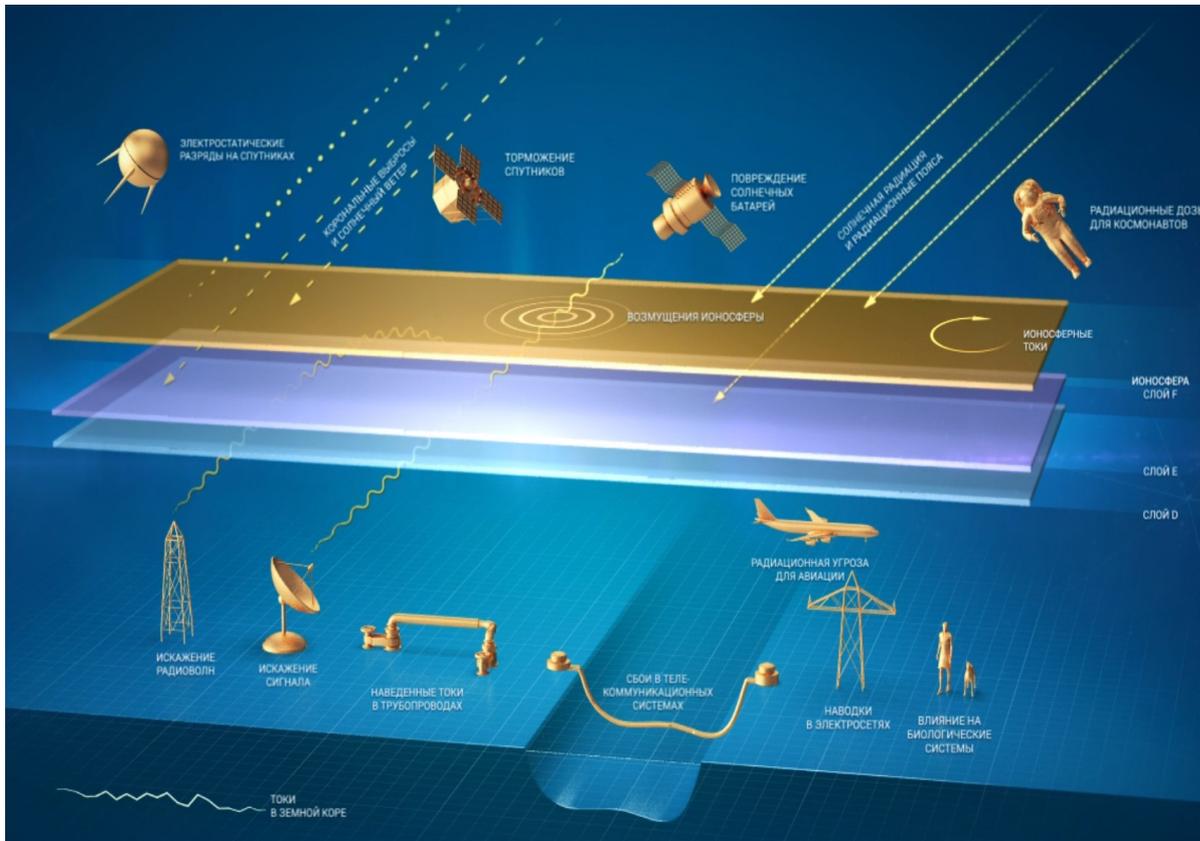
Магнитосферные возмущения разделяют на магнитосферные (или авроральные) суббури, которые возникают при кратковременном воздействии геоэффективного солнечного ветра на магнитосферу и проявляются с наибольшей силой в авроральной зоне, и магнитные бури, которые развиваются при длительном контакте магнитосферы с геоэффективным солнечным ветром захватывают всю магнитосферу.

Область, ограниченная авроральной зоной, носит название полярной шапки.

Станция Восток находится как раз в центре южной полярной шапки.

Негативные эффекты магнитосферных возмущений

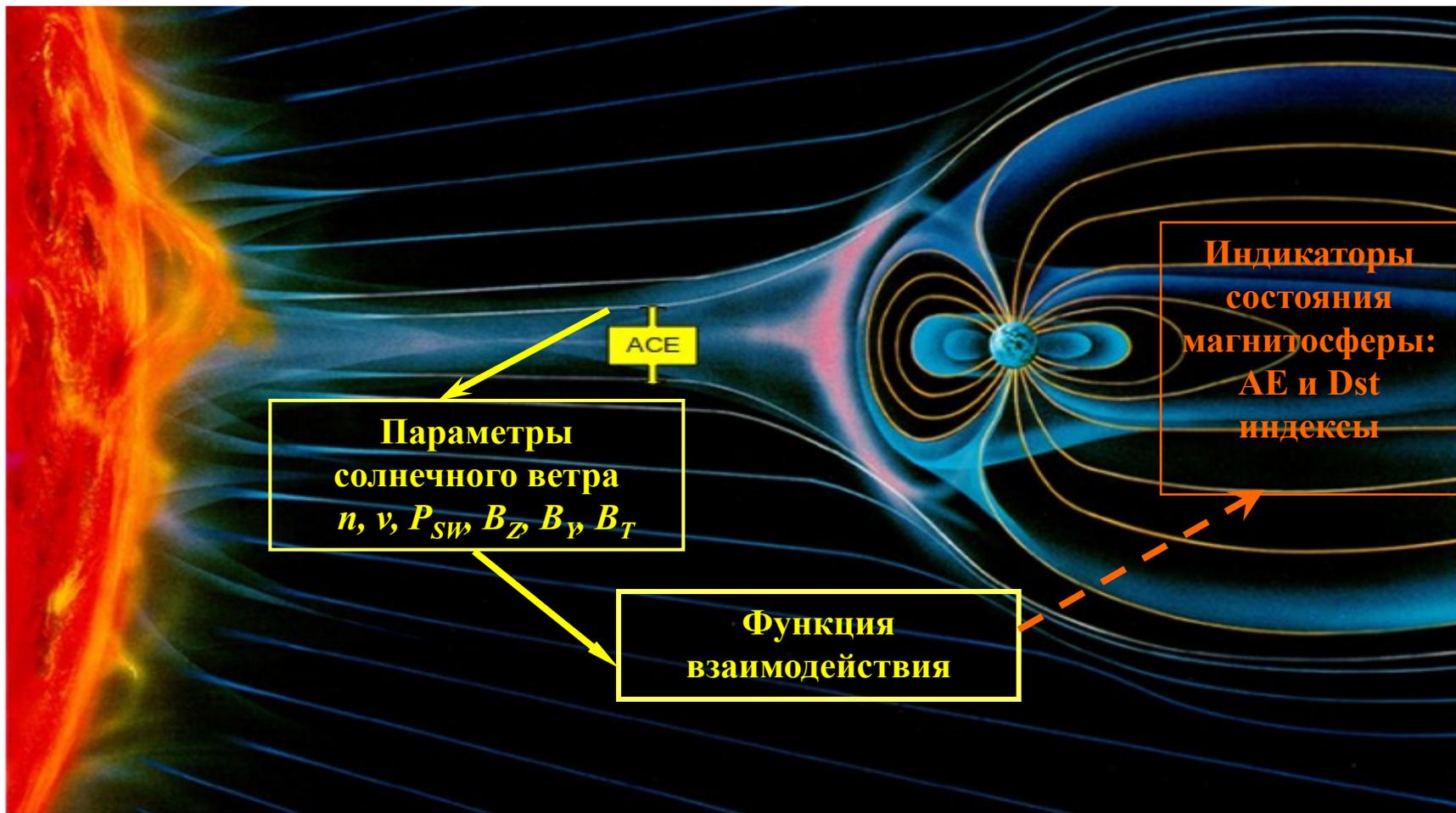
Магнитосферные возмущения оказывают прямое или косвенное воздействие на различные аспекты жизнедеятельности человека, такие как:



- Выход из строя аппаратуры на космических аппаратах,
- Нештатное функционирование связных, радиолокационных и радионавигационных систем,
- Нарушения в работе энергетических систем и трубопроводов,
- Радиационное облучения экипажей самолётов и пассажиров на высокоширотных авиатрассах,
- Аномальное развитие атмосферных процессов, и т.д.

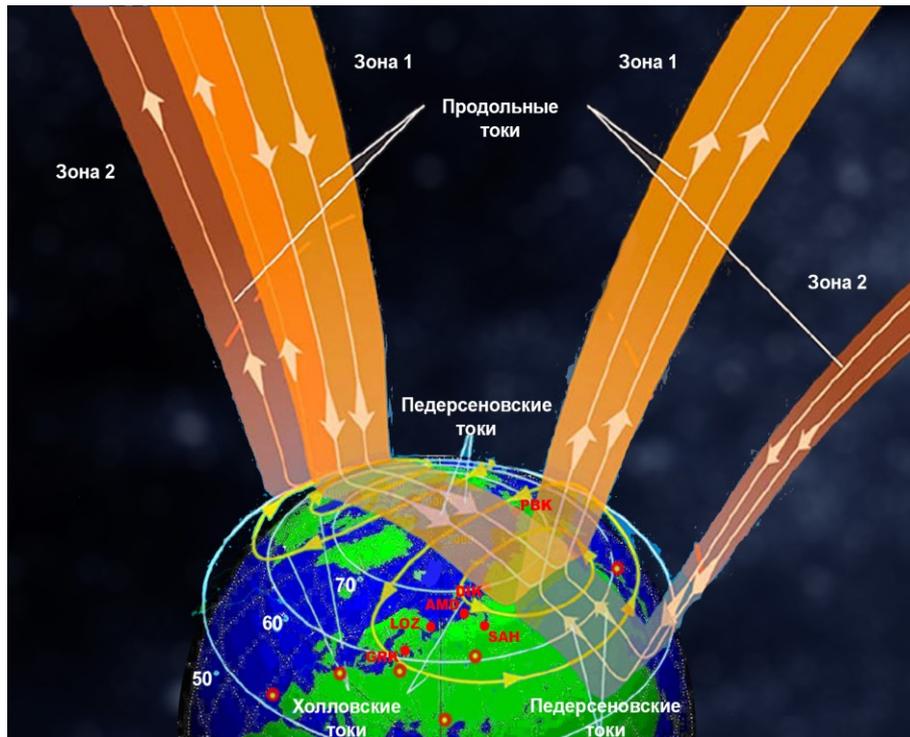
Таким образом, проблема космической погоды оказывается связанной с широким кругом задач, имеющих как хозяйственное, так и оборонное значение, при этом степень воздействия космической погоды на среду обитания человека усиливается год от года по мере внедрения в повседневную жизнь микропроцессорной техники и нанотехнологий.

Возможности прогноза магнитосферных возмущений



Связь между вариациями параметров солнечного ветра и состоянием магнитосферы описывается с помощью гипотетических функций взаимодействия магнитосферы с солнечным ветром, параметры которого измеряются в точке либрации (спутник ACE), на расстоянии ~ 1.5 млн. км. от Земли. Эти измерения являются основой кратковременного прогноза магнитосферных возмущений.

Магнитная активность в полярных шапках как показатель геоэффективности солнечного ветра



Под воздействием солнечного ветра в магнитосфере постоянно генерируются электрические токи, втекающие в ионосферу на утренней стороне авроральной зоны, и вытекающие – на вечерней. Эти токи замыкаются через полярную ионосферу, создавая на земной поверхности магнитные возмущения.

Работы, выполненные в ААНИИ показали, что величина магнитных возмущений в полярной шапке всегда пропорциональна величине межпланетного электрического поля E_{KL} ,

$$E_{KL} = V_{sw} * B_T$$

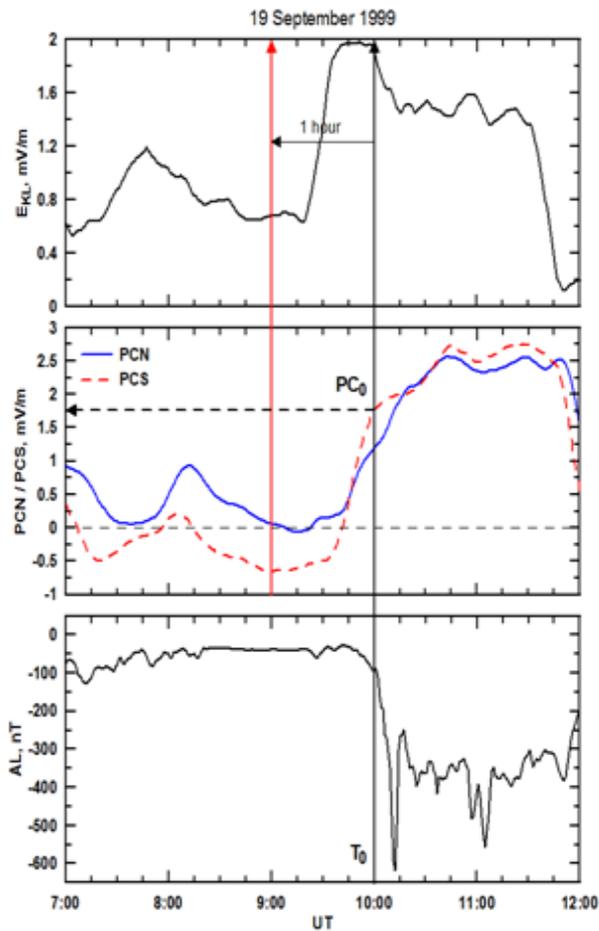
где V_{sw} - скорость солнечного ветра, B_T - межпланетное магнитное поле.

На этом основании в ААНИИ был разработан и введен в практику индекс магнитной активности в полярной шапке (РС индекс), который рассчитывается по данным о магнитных возмущениях на околополюсных станциях Туле (Гренландия) и Восток (Антарктика).

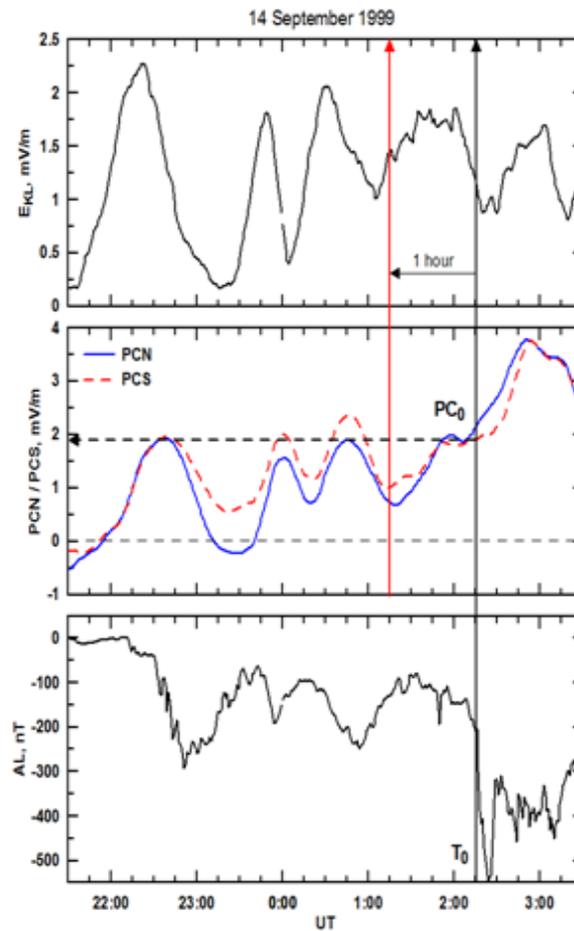
Исследования, выполненные в ААНИИ в 2005-2014гг, показали, что развитие магнитосферных возмущений (магнитных бурь и суббурь) однозначно связано с увеличением величины РС индекса, поведение которого, в свою очередь, определяется вариациями межпланетного электрического поля E_{KL} .

Связь РС индекса с вариациями межпланетного электрического поля и магнитными возмущениями

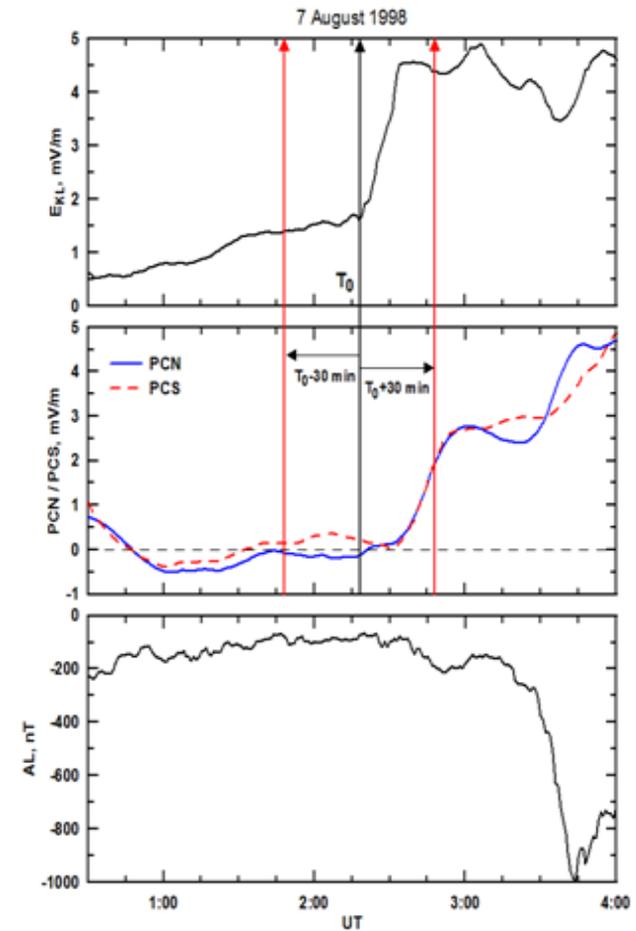
(a) Event with isolated substorm



(b) Event with extended substorm



(c) Coordinated event

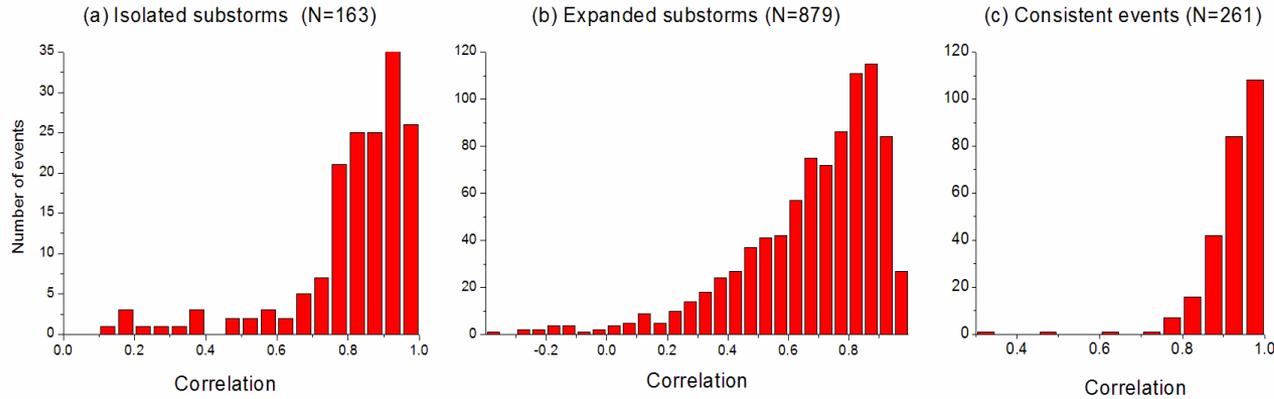


Поведение РС индекса определяется вариациями геоэффективного межпланетного электрического поля E_{KL} , приведённого к границе магнитосферы.

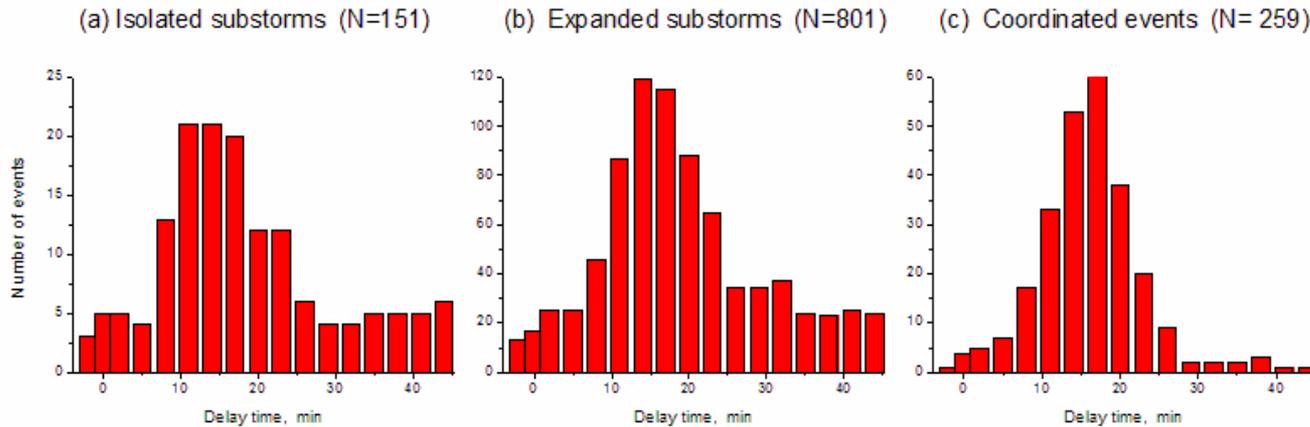
Рост РС индекса является предвестником ионосферных возмущений

PC индекс и вариации межпланетного электрического поля E_{KL}

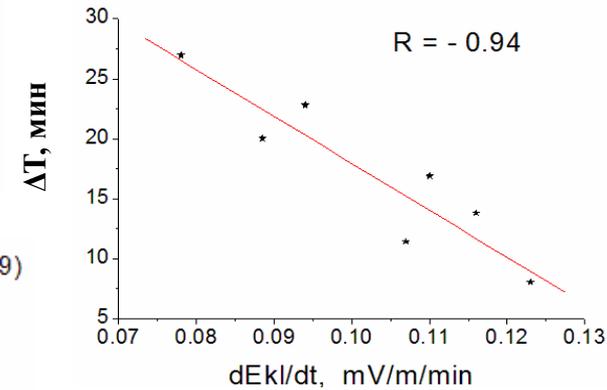
Корреляция между PC и E_{KL} перед внезапным началом магнитосферных суббурь



Временная задержка ΔT в отклике PC на изменения E_{KI}



Зависимость времени задержки ΔT от скорости роста поля E_{KL}



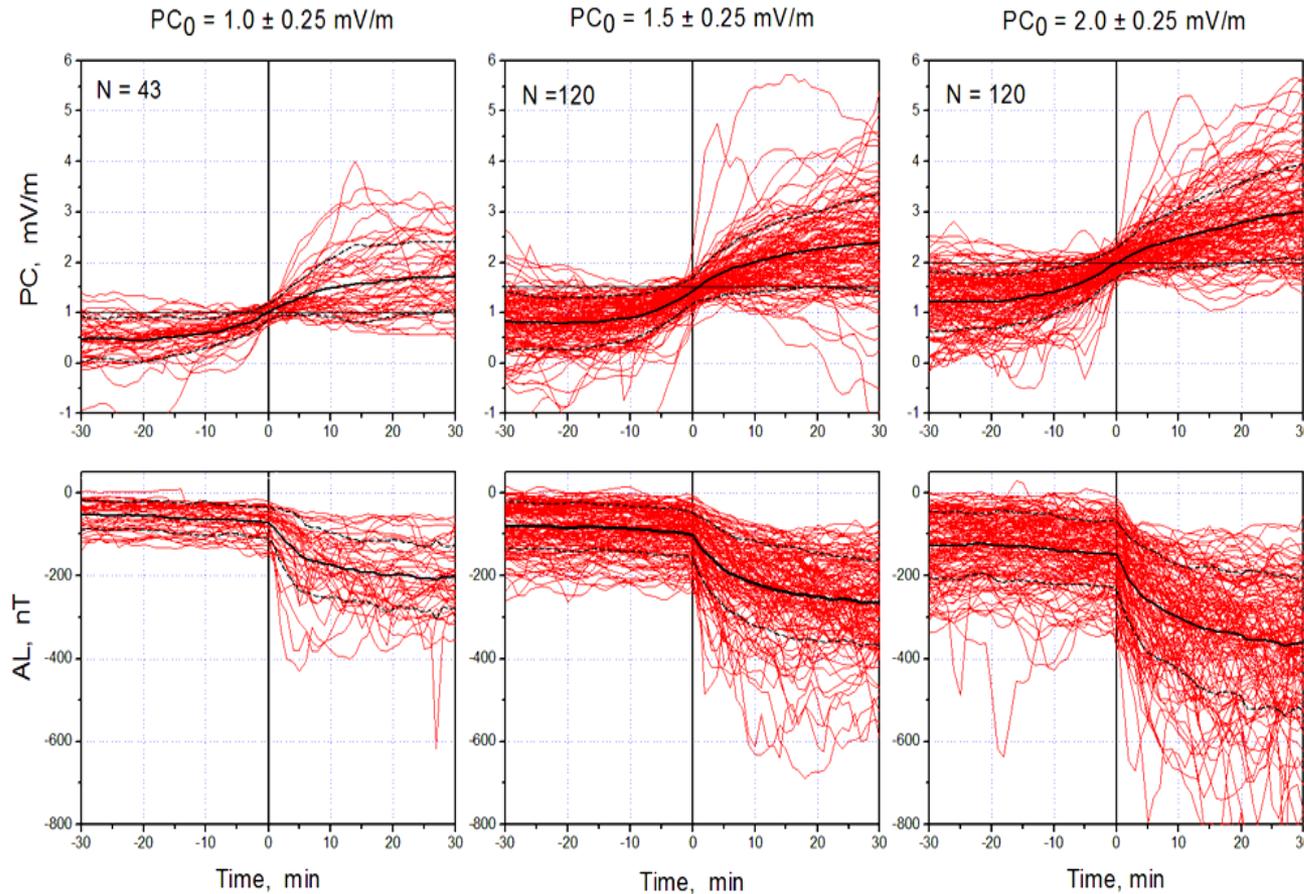
Наименьшее время задержки ($\Delta T \sim 5-7$ минут) достигается при экстремально высоких скоростях роста E_{KL} поля.

Время задержки ΔT в отклике PC индекса на вариации поля E_{KL} контролируется скоростью роста межпланетного электрического поля (dE_{KL}/dt), а не отдельными параметрами солнечного ветра, такими как скорость распространения V_X и вертикальная компонента межпланетного магнитного поля B_Z .

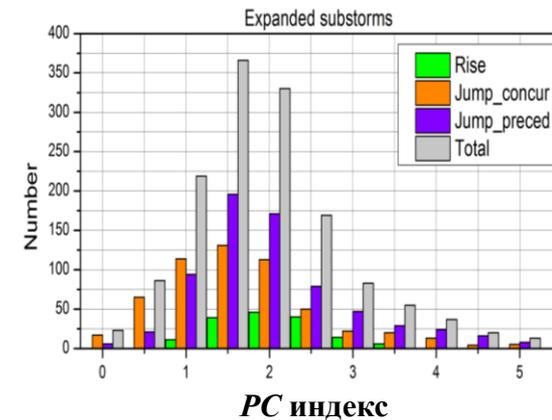
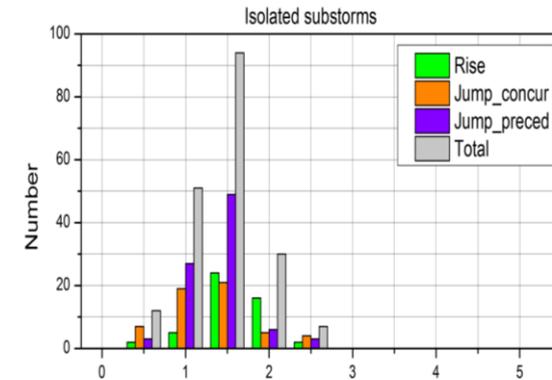
Низкая или отрицательная корреляция между PC и E_{KL} наблюдавшаяся в $\sim 8\%$ рассмотренных суббурь, говорит о том, что солнечный ветер, зафиксированный на спутнике ACE в точке Лагранжа, проходил в этих случаях мимо магнитосферы.

PC индекс и развитие магнитосферных суббурь

(Суббури разделены на группы по величине PC индекса (PC_0) в момент начала суббури)



Зависимость частоты появления суббурь от величины PC



Рост PC индекса всегда предшествует развитию магнитосферной суббури, при этом магнитная возмущённость в авроральной зоне (AL индекс) почти не меняется вплоть до начала суббури.

Суббури начинаются, когда PC индекс достигает определённой пороговой величины (1.5 ± 0.5 мВ/м), вне зависимости от длительности предшествующей фазы роста PC индекса.

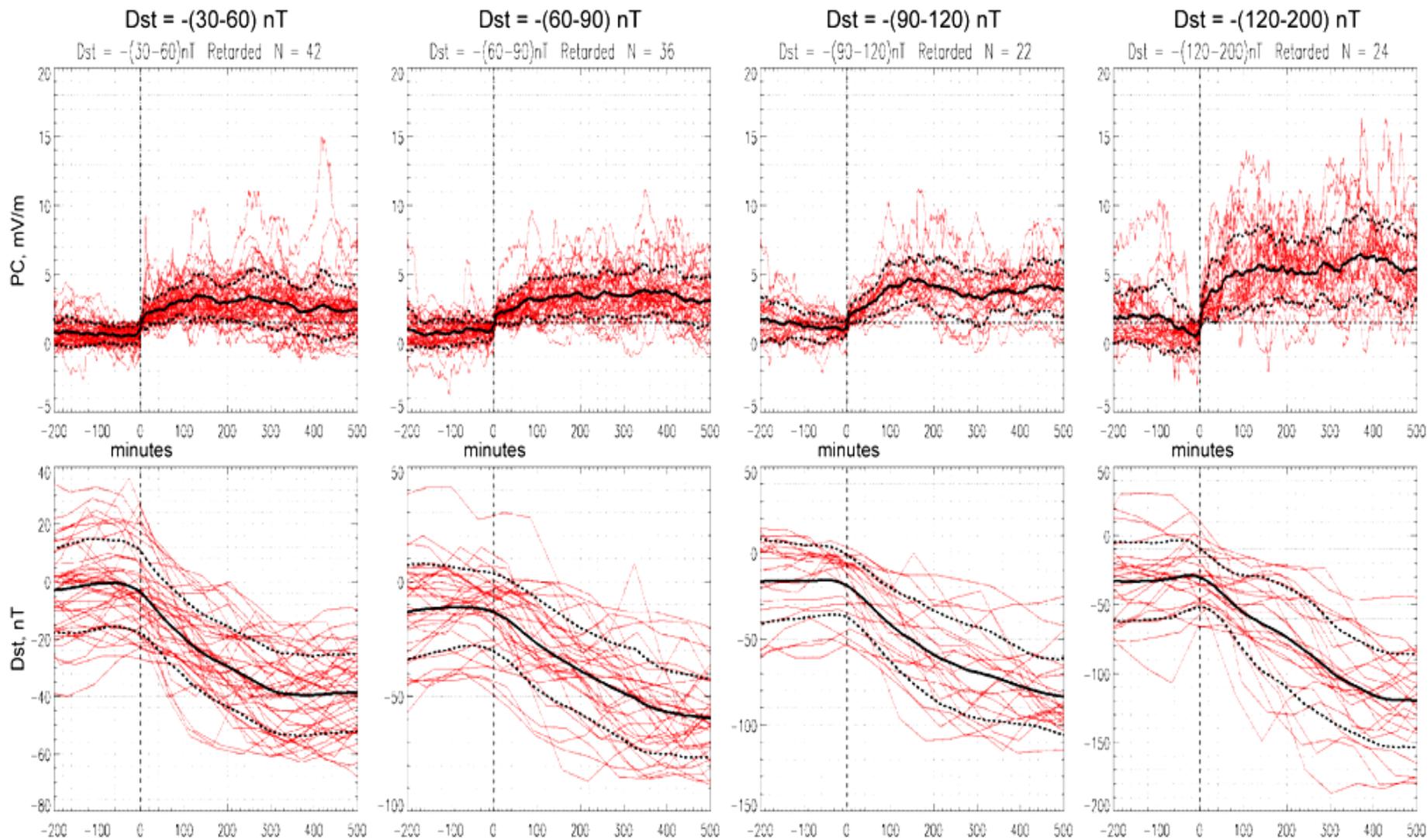
Внезапное начало суббури (SO) связано с резким увеличением скорости роста PC индекса.

Интенсивность суббури связана с величиной PC индекса линейным законом

PC индекс не реагирует на внезапное начало суббури SO и рост PC продолжается начала суббури.

PC индекс и развитие мировой магнитной бури (Dst индекс)

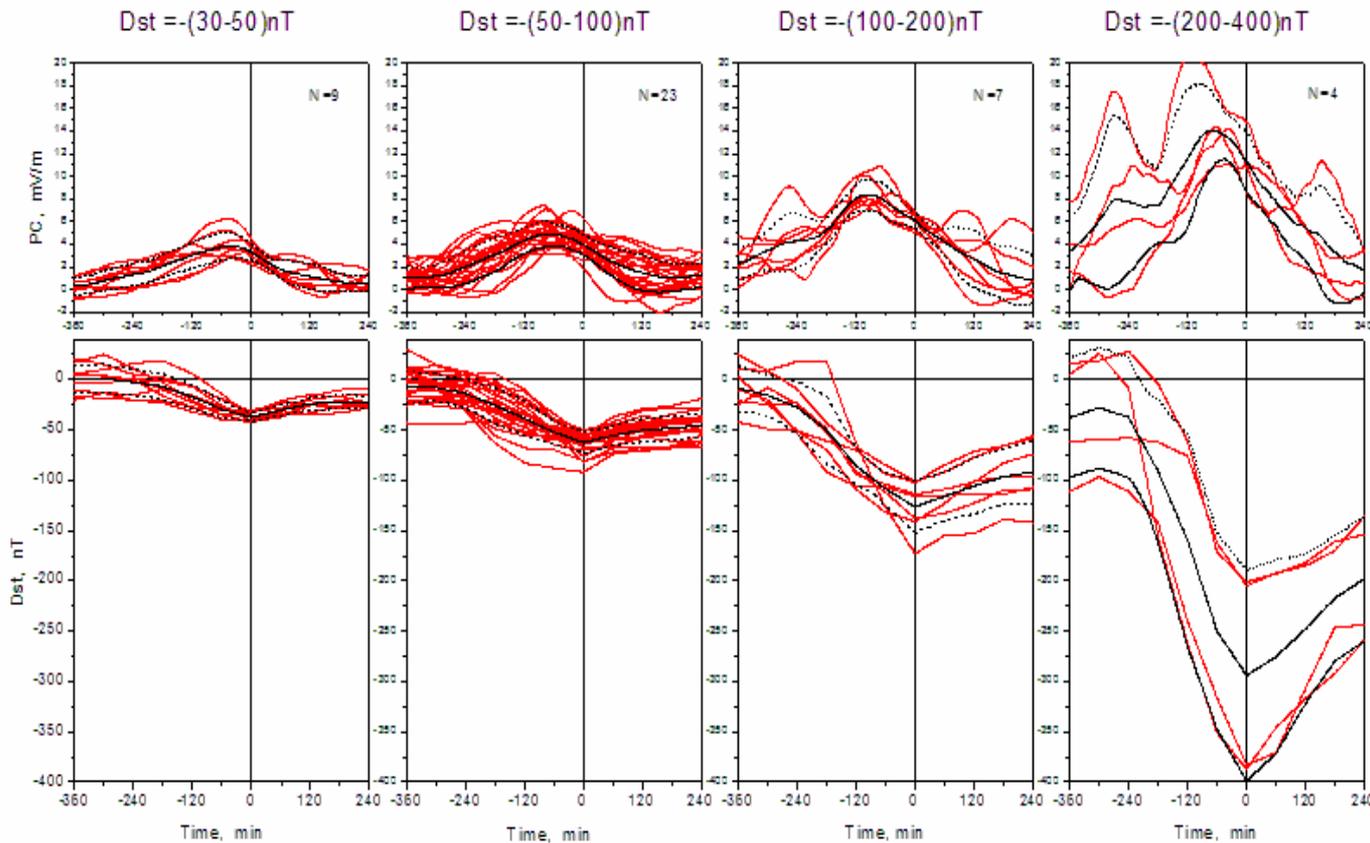
В качестве нулевой даты $T=0$ взят момент превышения уровня $PC=1.5$ мВ/м



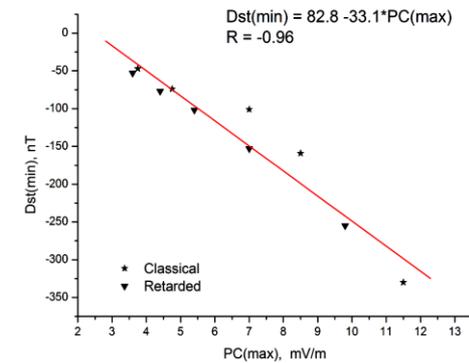
Депрессия геомагнитного поля (основной показатель магнитной бури) начинает развиваться, когда PC индекс превышает пороговый уровень $PC \sim 1.5$ мВ/м

PC индекс и интенсивность магнитной бури (Dst_{min})

В качестве ключевой даты $T=0$ взят момент максимальной депрессии магнитного поля (Dst_{min}). Показан ход сглаженных значений PC индекса, полученные при осреднении «60-мин бегущим окном»



Зависимость интенсивности магнитной бури (Dst_{min}) от величины PC_{max} .

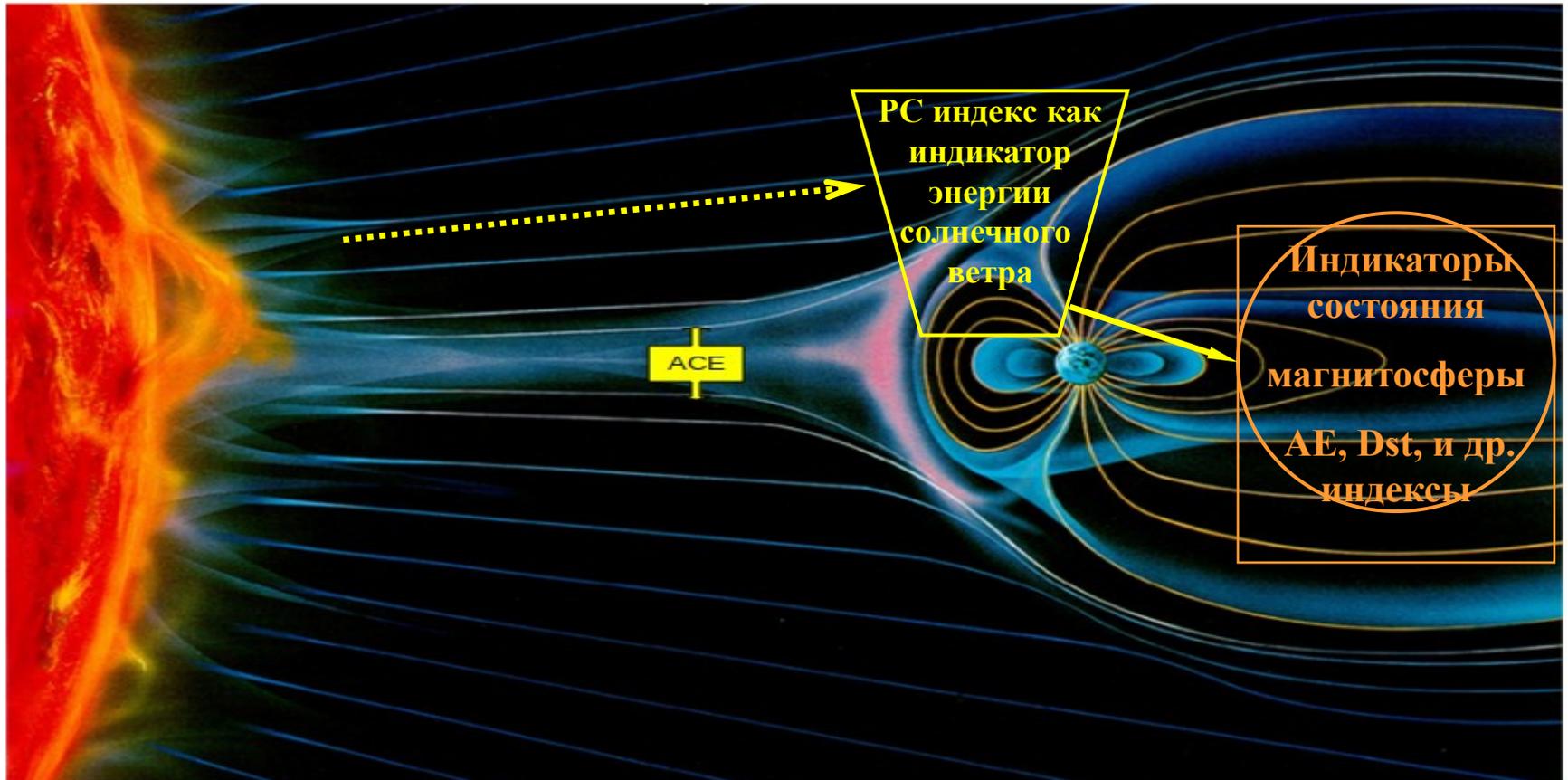


Основные черты магнитной бури определяются поведением PC индекса: буря длится до тех пор, пока PC остаётся выше порогового значения и начинает затухать при уменьшении PC индекса. Наилучшая корреляция между PC и Dst индексами имеет место при сглаживании PC индекса с применением **30-60** –минутного бегущего окна осреднения.

Магнитная буря достигает максимальной интенсивности (Dst_{min}) примерно через час после того, как фиксируется максимальная величина среднечасового PC индекса (PC_{max}).

Величины PC_{max} и Dst_{min} связаны линейной зависимостью.

PC индекс и состояние магнитосферы



На основании полученных результатов был сделан вывод, что *PC* индекс является индикатором энергии солнечного ветра, поступающей в магнитосферу при взаимодействии магнитосферы с межпланетным электрическим полем. Именно эта энергия является источником как магнитоионосферных возмущений в авроральной зоне (магнитосферных суббурь), так и глобальных магнитных возмущений (магнитных бурь).

Если вариации солнечного ветра (измеряемые спутником ACE на расстоянии ~ 1.5 млн. км. от Земли), не коррелируют с поведением *PC* индекса ($\sim 10\%$ событий с магнитосферными суббурями), то это означает, что солнечный ветер, зафиксированный спутником ACE, не контактировал с магнитосферой, т.е. прошёл мимо неё.

*PC индекс – показатель поступающей в магнитосферу
энергии солнечного ветра*

**Резолюция XXII Ассамблеи Международной Ассоциации
Геомагнетизма и Аэронауки, Мехико, Август 2013 г**

IAGA,

noting that polar cap magnetic activity is not yet described by existing IAGA geomagnetic indices,
considering **that the Polar Cap (PC) index constitutes a quantitative estimate of geomagnetic activity at polar latitudes and serves as a proxy for energy that enters into the magnetosphere during solar wind-magnetosphere coupling,**

emphasising that the usefulness of such an index is dependent on having a continuous data series,

recognising that the PC index is derived in partnership between the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI, Russian) and the National Space Institute, Technical University of Denmark (Denmark)

recommends use of the PC index by the international scientific community in its near-real time and definitive forms,

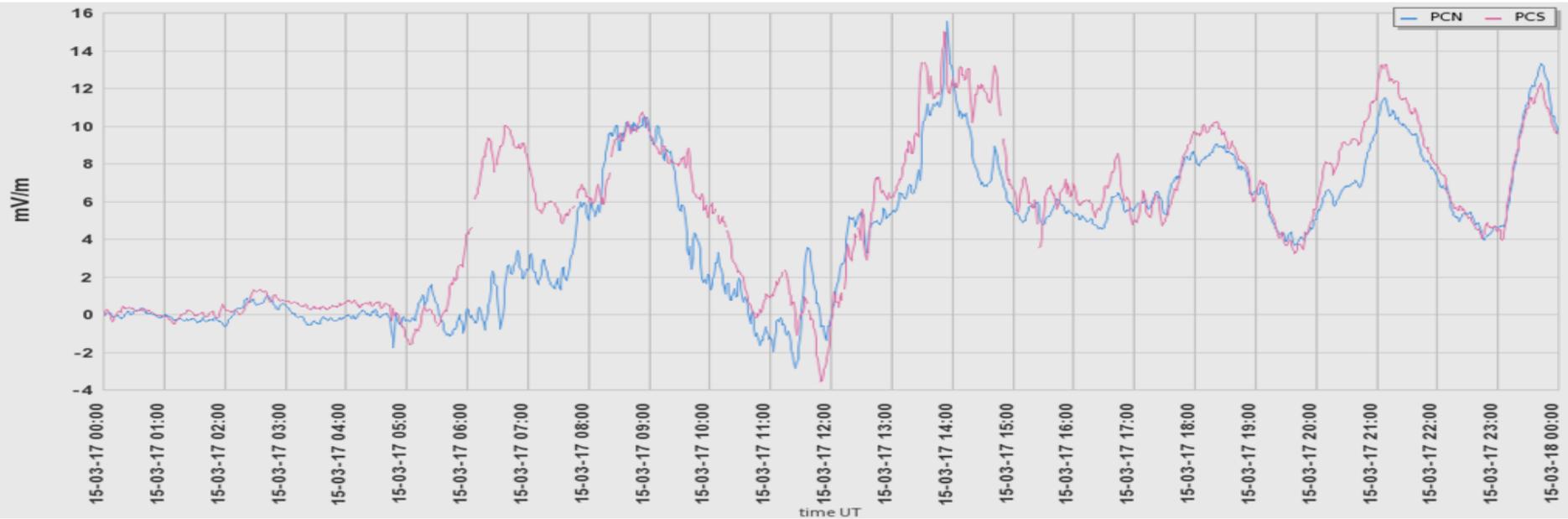
and urges that all possible efforts be made to maintain continuous operation of all geomagnetic observatories contributing to the PC index.

Принимая во внимание, что PC индекс является количественной оценкой магнитной активности в полярных широтах и служит показателем энергии, поступающей в магнитосферу в процессе взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой,

МАГА рекомендует PC индекс в качестве нового международного индекса магнитной активности

и обращается к ААНИИ в России и Технический университет Дании с настоятельной просьбой обеспечить проведение непрерывных магнитных наблюдений, необходимых для получения PC индекса .

РС индекс и мониторинг космической погоды



Мониторинг состояния магнитосферы (временной ход PC, AE, Dst индексов и регионального AR индекса)



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Полярный геофизический центр ФГБУ "АНИИ"



Геофизическая обстановка в полярных регионах

MSK: 18:13:32 5-11-2014

GMT: 15:13:32 5-11-2014

ИНДИКАТОРЫ ТЕКУЩЕЙ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ



PC-индекс



DST-индекс



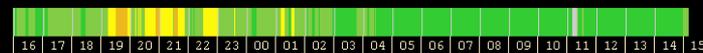
AE-индекс



AR-индекс



Общий уровень
геомагнитной активности



ОПЕРАТИВНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ЗА СУТКИ



Показатель поступающей в магнитосферу
энергии солнечного ветра



Показатель магнитной возмущенности
в авроральной зоне



Показатель магнитной возмущенности
в авроральной зоне Российской Арктики



Показатель интенсивности
мировых магнитных бурь

**Космическая погода
и аномальные атмосферные процессы
в Антарктике**

Особенности атмосферной циркуляции в зимней Антарктике

Режим кatabатических ветров и вертикальная структура атмосферной циркуляции

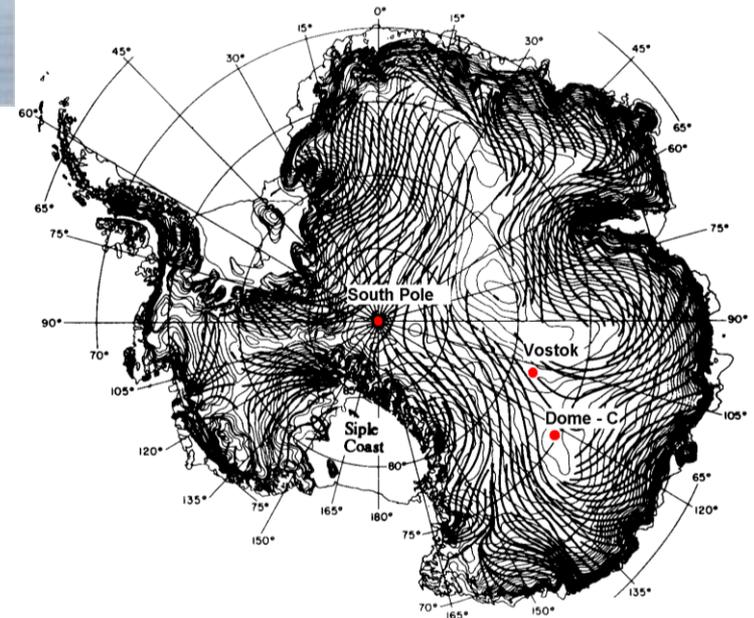


Кatabатический (стоковый) ветер – мощный поток холодных воздушных масс, стекающих вдоль наклонной поверхности ледяного купола.

Стоковый ветер определяется негативной плавучестью холодного воздуха, поддерживаемой сильным радиационным охлаждением атмосферы на поверхности ледового купола.

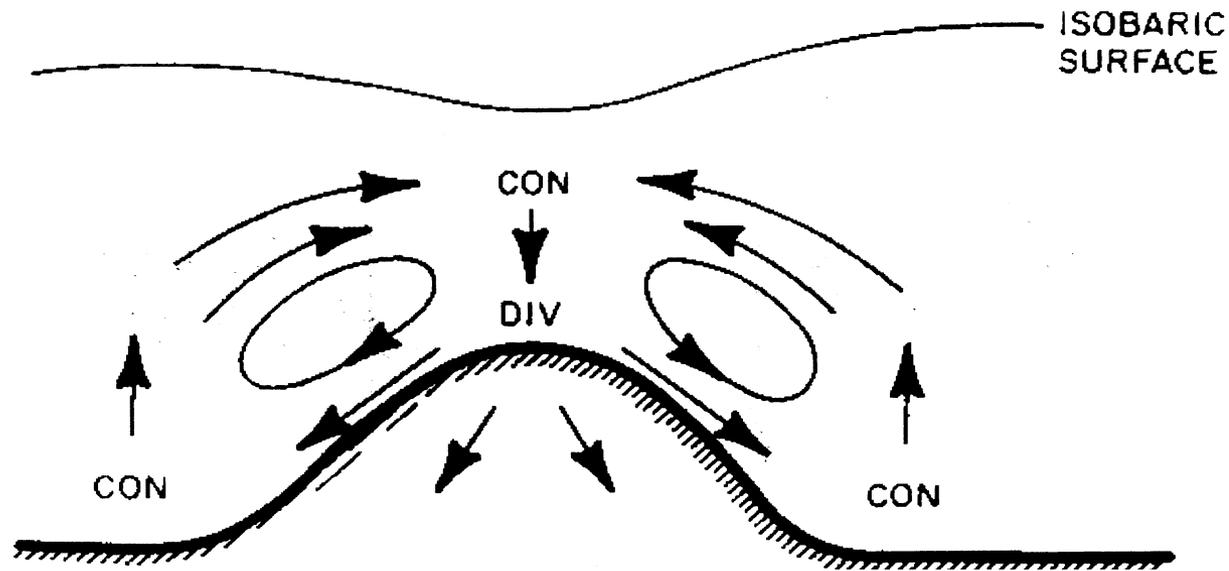
Стоковые ветры, берущие начало на Центральном Антарктическом хребте, направлены радиально к берегам Антарктики [Parish and Bromwich, 1987]. Кatabатический ветровой режим является одним из наиболее стабильных атмосферных явлений на Земле. [Schwerdtfeger, 1984].

Сила Кориолиса (обусловленная вращением Земли) отклоняет стоковый ветер к западу, в результате этого процесса в береговой зоне Антарктиды формируется циркумполярный вихрь.



Особенности атмосферной циркуляции в зимней Антарктике

Режим кatabатических ветров и вертикальная структура атмосферной циркуляции



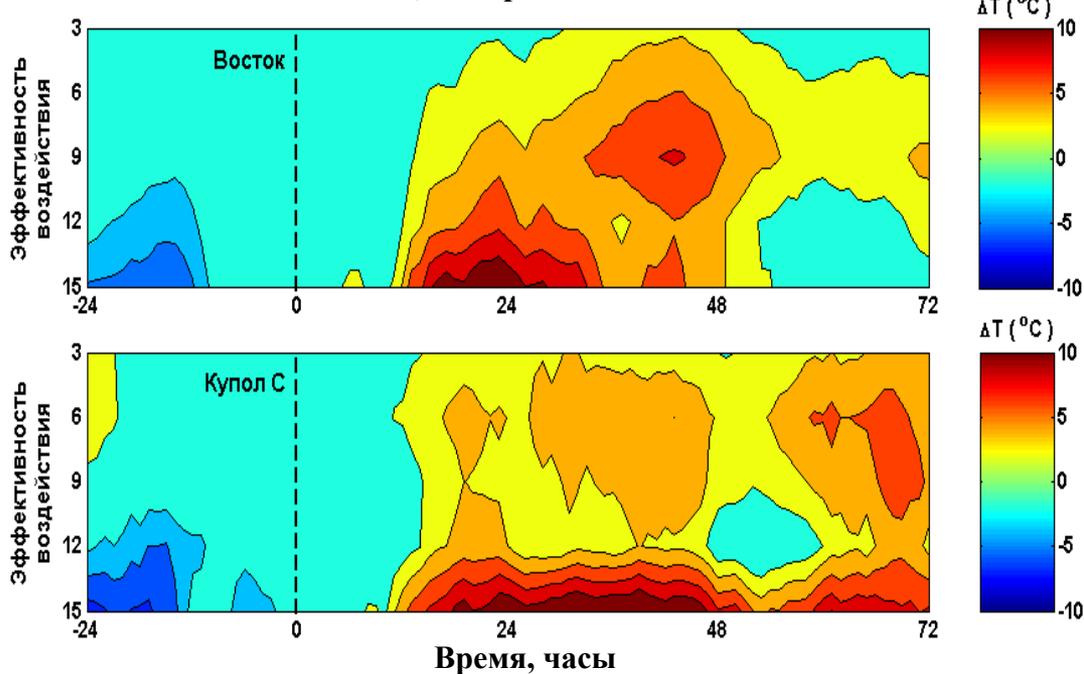
Дефицит воздушных масс возникающий на ледяном куполе вследствие стоковых ветров восполняется притоком воздуха из тропосферы, что обуславливает формирование над зимней Антарктикой крупномасштабной системы меридиональной циркуляции [Parish and Bromwich, 1991].

В результате в атмосфере зимней Антарктики **формируется крупномасштабная система вертикальной циркуляции, включающая** [Egger, 1985; Parish and Bromwich, 1991] сток воздушных масс вдоль ледяного купола, их конвергенцию и восходящий поток вдоль береговой линии, и нисходящий поток в околополюсной области [Egger, 1985; Parish and Bromwich, 1991].

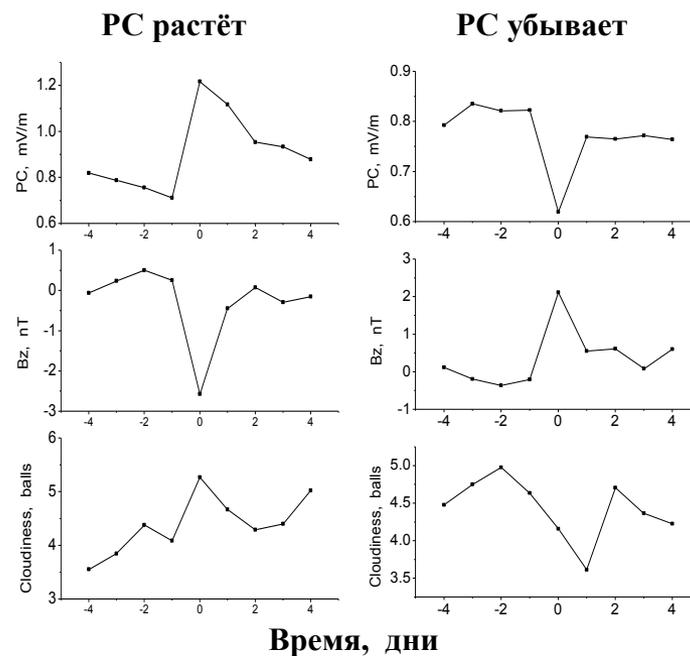
Космическая погода определяет anomальное развитие системы вертикальной циркуляции атмосферы над Антарктикой [Troshichev et al., 2002, 2003; Troshichev and Janzhura, 2004]

Аномальные атмосферные процессы в Центральной Антарктике: внезапные потепления и резкое усиление стокового ветра

Внезапные потепления на станциях Восток и Купол С как функция межпланетного магнитного поля ММП $B_z < -2\text{nT}$ ($T=0$ – начало воздействия южного ММП, ось ординат – длительность воздействия),



Изменение облачности над ст. Восток как функция межпланетного магнитного поля B_z и PC индекса

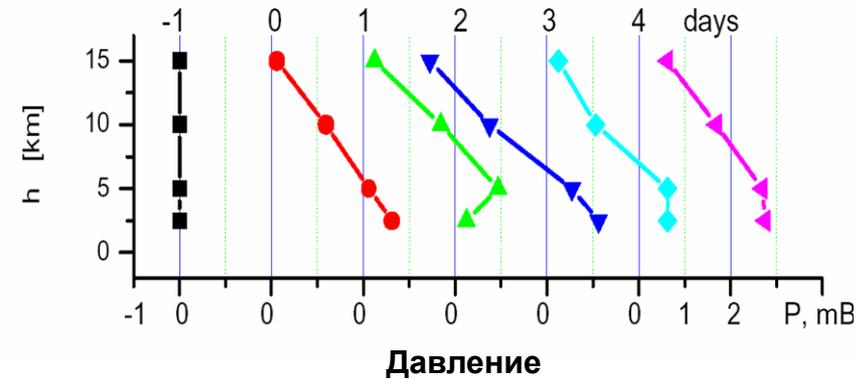
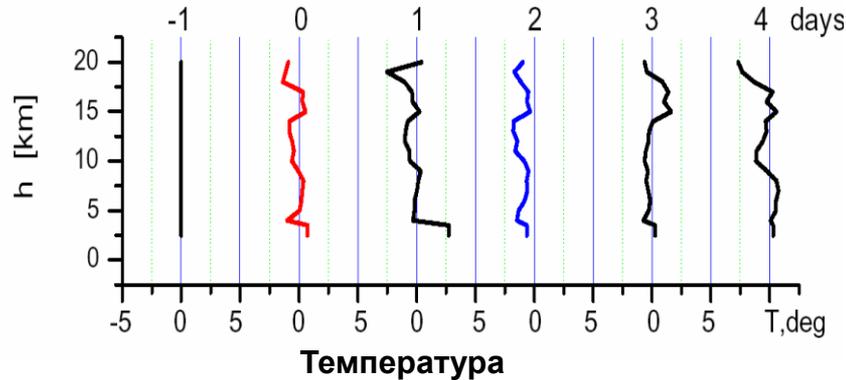
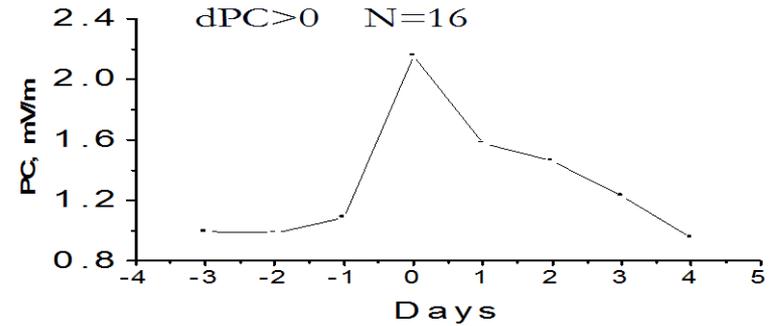
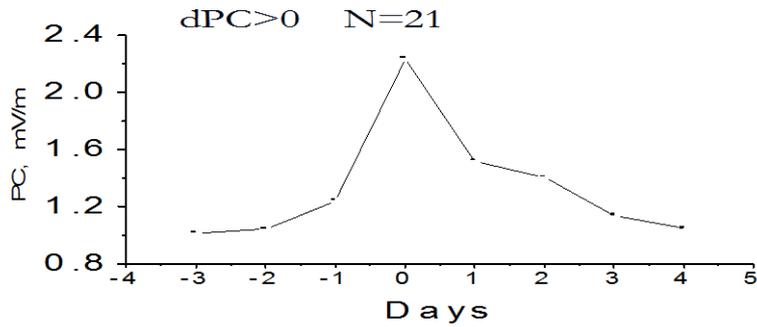


«Сильные потепления» на станциях Восток и Купол С наблюдаются при длительном (более 12 час) воздействии южного ($B_z < 0$) ММП, с временной задержкой ~ 12 часов относительно момента $T=0$ и связаны с формированием облачного слоя.

Изменение температуры в приземном слое атмосферы линейно связано с величиной межпланетного электрического поля E_{KL} : чем больше скачок E_{KL} , тем выше температурный эффект ($\Delta T^\circ = 3.5 - 0.0047 \cdot \Delta E_{KL}$ [nT·km/s]).

Облачность над ст. Восток формируется при росте PC индекса, и уменьшается при его убывании. Максимальный эффект наблюдается либо в день максимума PC , либо на следующий день.

Высотные профили изменений среднесуточной температуры и давления над станцией Восток (по данным аэрологических измерений)



День с максимальным среднесуточным значением PC индекса выбирался в качестве нулевой даты $T=0$. Температурный профиль и профиль давления для $-1^{\text{го}}$ дня выбирался в качестве уровня отсчёта для всех последующих дней.

Температура на высотах $\sim 5-10$ km не меняется при вариациях PC (межпланетного электрического поля), что указывает на местоположение облачного слоя. Выше и ниже этого слоя знак температурных изменений прямо противоположен. В ключевой день и после него в приземном слое ($h = 3.45-3.5$ km) наблюдается потепление, а на высотах $h > 10$ km - похолодание.

В ключевой день (с PC_{max}) резко возрастает давление в приземном слое атмосферы.

Влияние космической погоды на аномальные атмосферные процессы в Антарктике [Troshichev et al., 2003, 2007, 2011]

Воздействие межпланетного электрического поля на аномальные атмосферные процессы в Антарктике реализуется через изменения глобальной электрической цепи и сводится к двум процессам:

Первый процесс – формирование облачного слоя над центральной антарктикой на высотах ~ 5 – 10 км над уровнем моря.

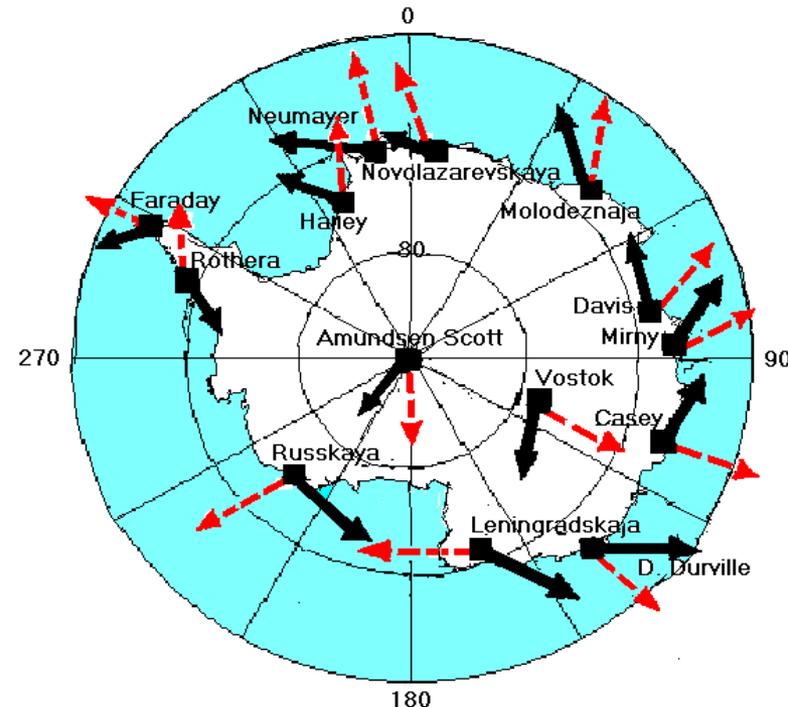
Результат - уменьшение радиационного выхолаживания атмосферы и резкое потепление атмосферы ниже облачного слоя. Чем больше межпланетное электрическое поле и длительность его воздействия, тем выше рост температуры (до 20°C в пределах 12 часов). Внезапные потепления – эксклюзивное явление, обусловленное особенностью атмосферной циркуляции в зимней Антарктиде.

Второй процесс – ускорение спускающихся из тропосферы воздушных масс.

Результат - увеличение давления в приземном слое атмосферы над ледяным куполом и резкий рост скорости стоковых ветров.

Следствие

Когда скорость стоковых ветров достигает влияния определённого критического значения, влияние силы Кориолиса на ветер становится неэффективным и направление стокового ветра в береговой зоне Антарктики меняется с западного на южное, что соответствует распаду циркумполярного вихря.



Влияние аномальных процессов в Антарктике на Южный океан



Если режим аномальных стоковых ветров сохраняется длительное время, массы холодного антарктического воздуха устремляются в Южный океан, оказывая сильнейшее воздействие на все климатические системы южного полушария.

Влияние аномальных атмосферных процессов в Антарктике на климатические системы южного полушария

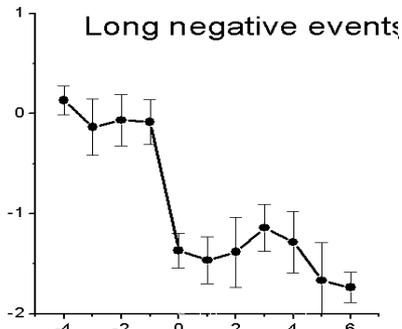
ENSO (El Nino/Southern Oscillation) – цикл климатических изменений, происходящих в тропической зоне Тихого Океана с периодичностью от трёх до семи лет. **ENSO** включает теплую фазу (**Эль-Ниньо**), когда температура поверхностных вод в зоне (5°N-5°S, 120°W-170°W) выше нормы, и холодную фазу (**Ла-Нина**), когда температура падает ниже нормы. ENSO является одним из наиболее мощных источников естественной изменчивости глобальной климатической системы.

Индекс южной осцилляции (SOI) как характеристика фазы осцилляции:

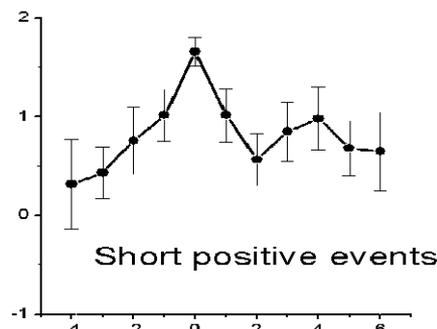
Отрицательный SOI – тёплая фаза (события Эль-Ниньо)

Положительный SOI – холодная фаза (события Ла-Нина).

Эль-Ниньо

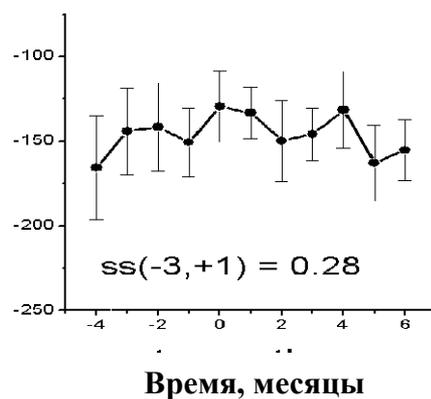
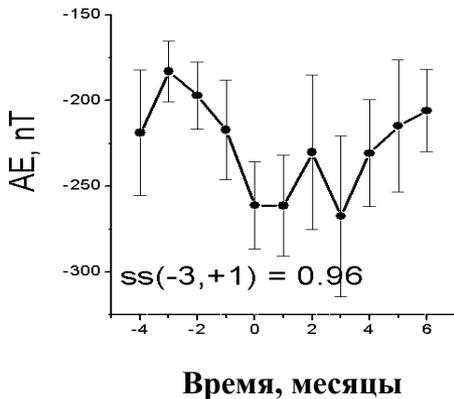


Ла-Нина



Результаты [Troshichev et al., 2011]:

- Короткие (один-два) месяца отрицательные отклонения индекса SOI могут происходить в любое время года без формирования Эль-Ниньо.
- События Эль-Ниньо происходят только в условиях Антарктической зимы (начинаются в марте-июне и заканчиваются к ноябрю-декабрю).
- Событиям Эль-Ниньо предшествует длительное (2-3 месяца) воздействие геоэффективного межпланетного электрического поля (РС-индекс) и высокая планетарная магнитная активность (АЕ-индекс).



Вывод:

Эль-Ниньо формируется под влиянием аномальных процессов в атмосфере зимней Антарктики, связанных с длительным воздействием геоэффективного межпланетного электрического поля.

Спасибо за внимание!

