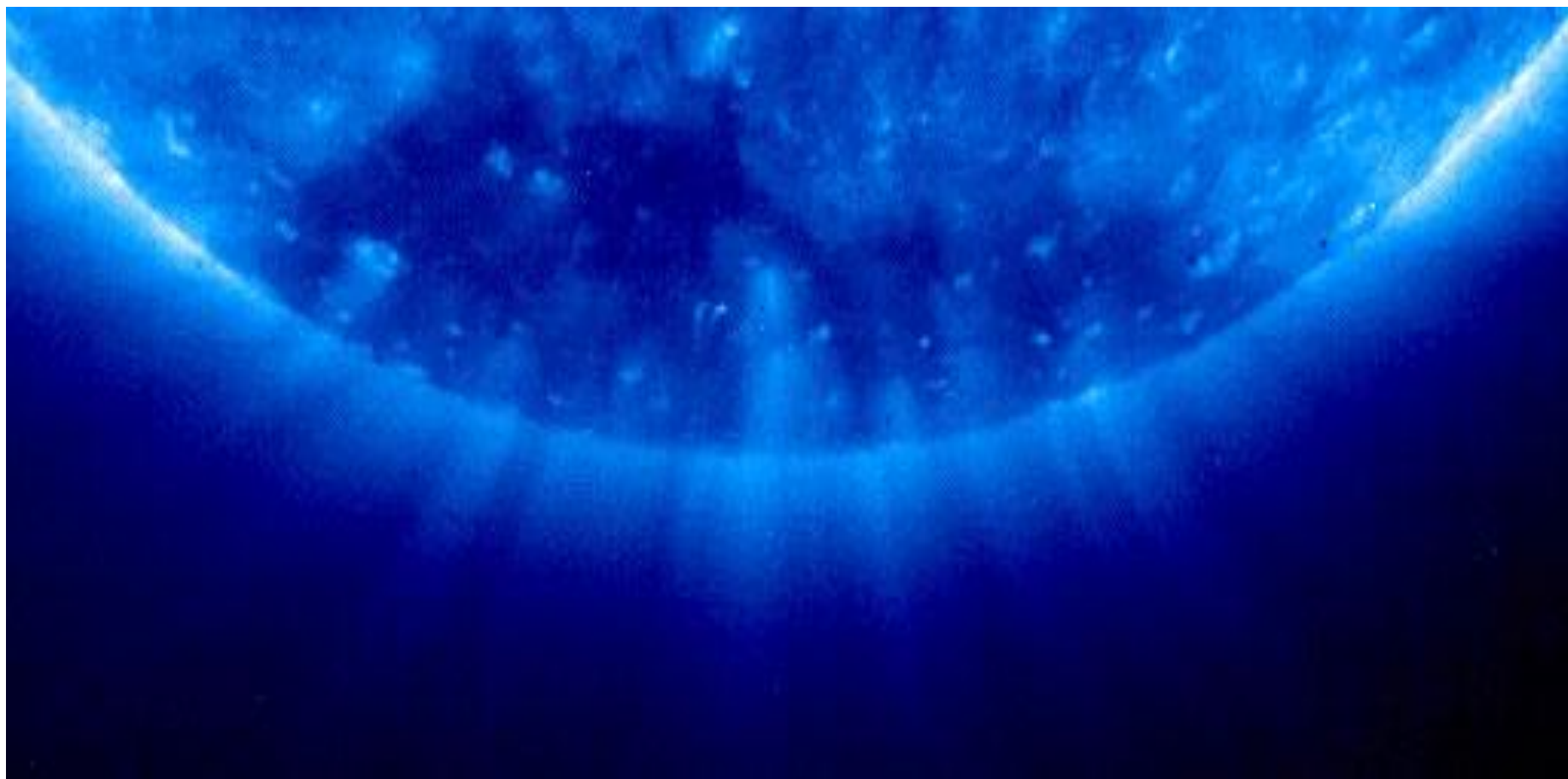


# Источники СПС и корональные дыры: взаимодействие в различные эпохи солнечной активности



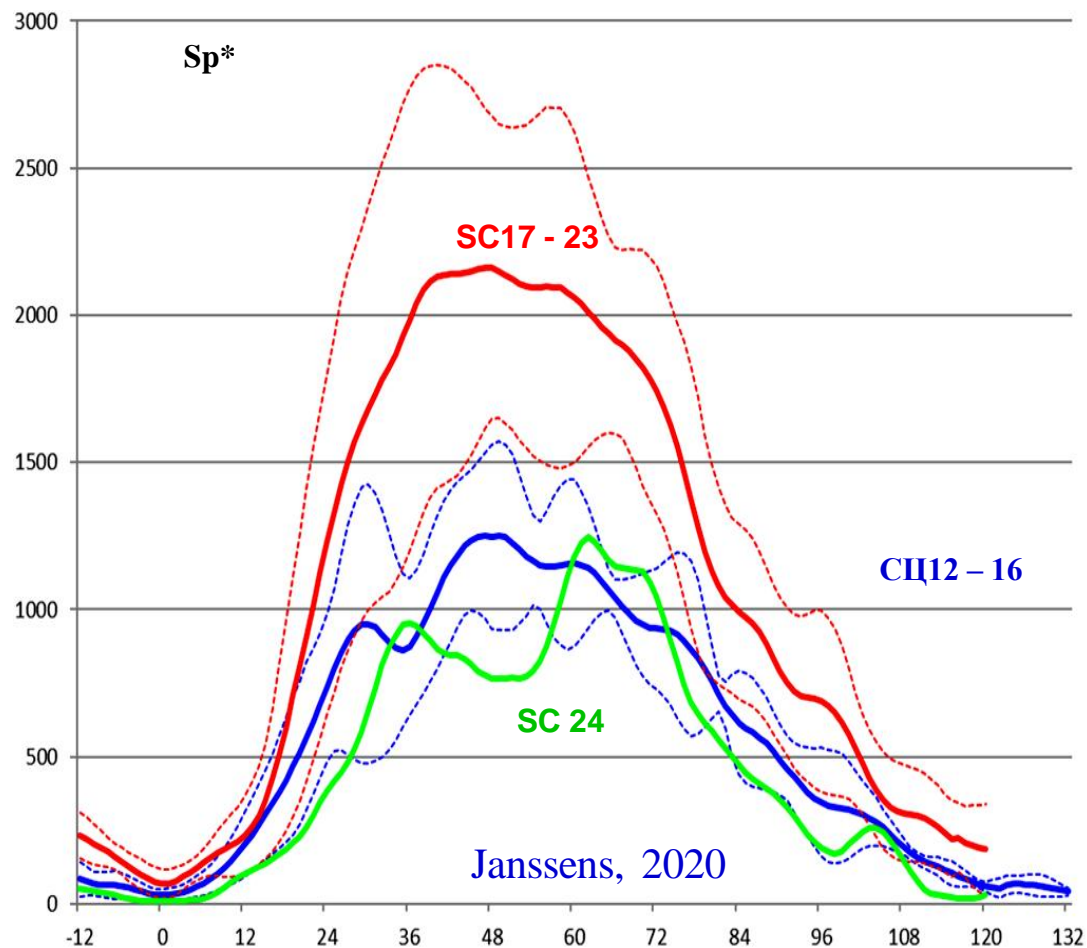
В.Н. ИШКОВ

[ishkov@izmiran.ru](mailto:ishkov@izmiran.ru)

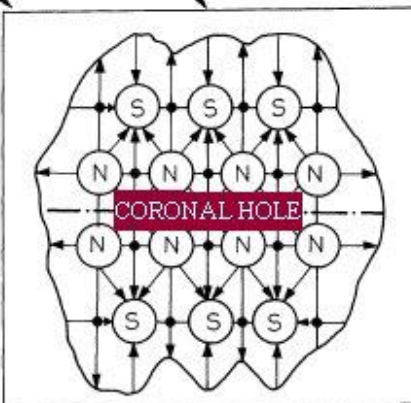
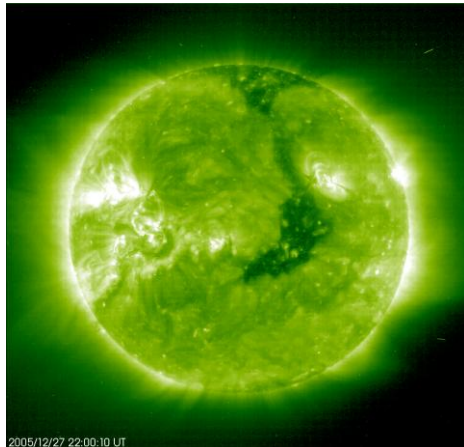
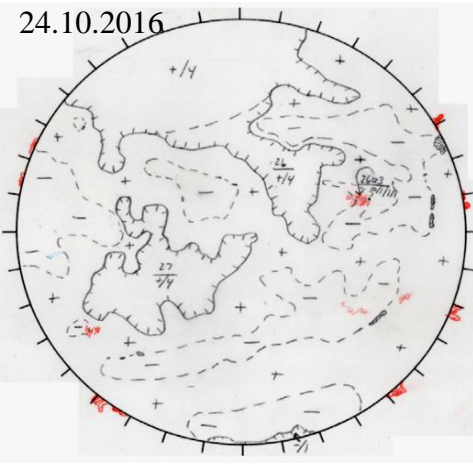


**1. Согласно сценарию цикличности для достоверных циклов СА, 24 СЦ открыл 2-ю эпоху «пониженной» СА, которая перекроет две трети XXI века и сейчас мы живём в фазе минимума текущего СЦ, приближаясь к точке минимума СЦ24 (ИШКОВ, 2012, 16, 17).**

Перестройка общего МП в 23 СЦ к уровню эпохи пониженной СА, вызвала значимое уменьшение напряжённости фона общего магнитного поля (~в 2 раза), привела к цепочке изменений МП всех структур на Солнце в том числе, в корональных дырах (КД), что повлекло изменение их характеристик ВСП КД, которые не обеспечивают достаточного воздействия на ОКП, отсюда – заметный спад осуществления значимых рекуррентных геомагнитных возмущений.



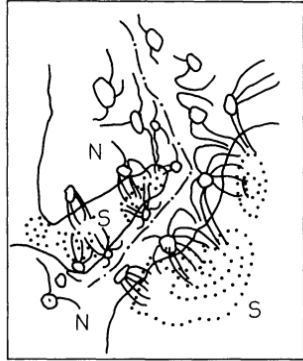
## Корональные дыры : происхождение, I.



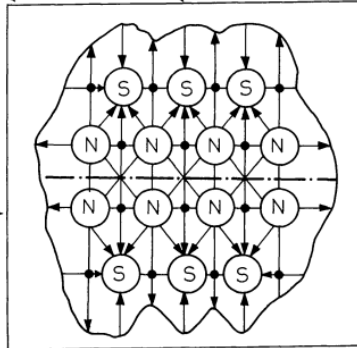
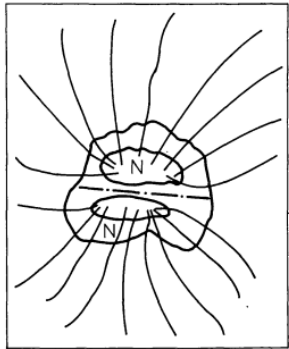
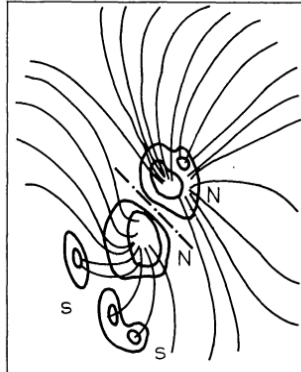
В магнитном отношении Солнце представляет собой совокупность биполярных структур разной величины, непрерывно всплывающих из конвективной зоны, взаимодействующих друг с другом в пределах крупномасштабных Магнитных Униполярных Структур. Если такие соседние МУС имеют разные знаки, между ними образуется нейтральная линия продольного магнитного поля. Всплытия больших биполярных структур или их семейств (Магнитных Потокос) вблизи нейтральной линии приводят к образованию АО, которые дают нам весь спектр вспышечной активности при взаимодействии старого и нового всплывающих МП.

Но, в более редких случаях, складывается ситуация, когда всплывают соседние **независимые** униполярные структуры одного знака, тогда на их соприкасающихся границах начинают действовать силы отталкивания, которые приводят к образованию структур с открытым во вне магнитным полем – **КД**.

## Корональные дыры : структура, II.



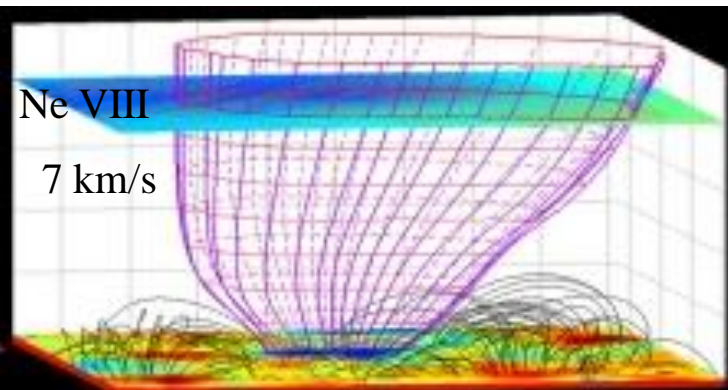
Ishkov, Linke, 1990



Случаи всплытия таких структур в пределах АО или, более редко, в пределах одного пятна, приводят к очень интересным последствиям (Ishkov, Linke, 1990):

- распаду АО на две и быстрому затуханию одной из них или обеих;
- образованию светового моста и быстрому распаду пятна на два соседних одной магнитной полярности

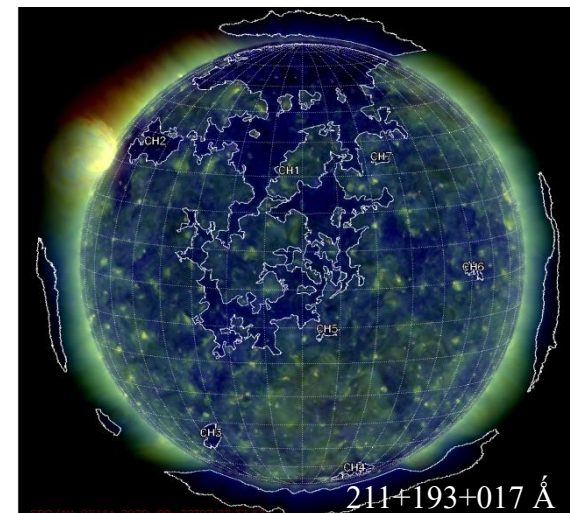
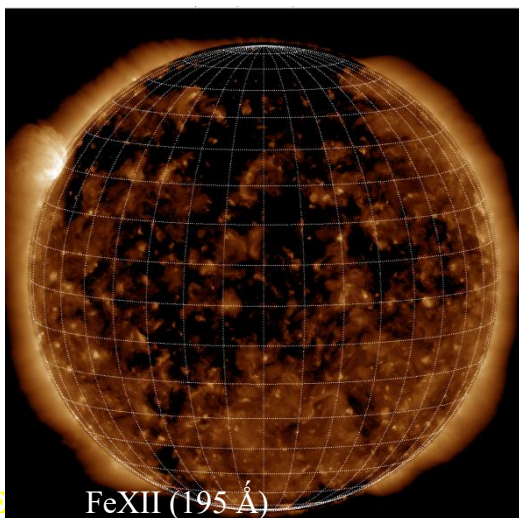
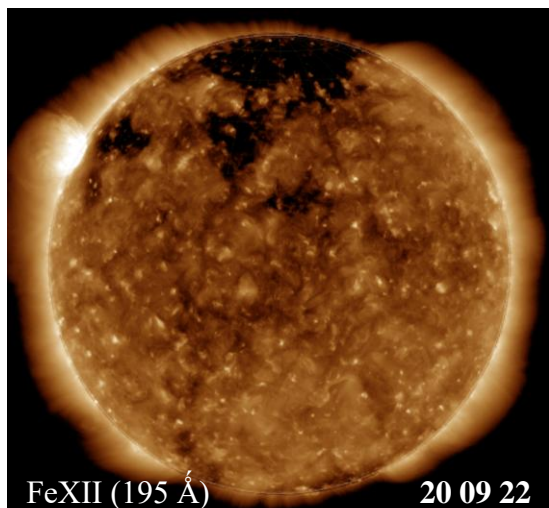
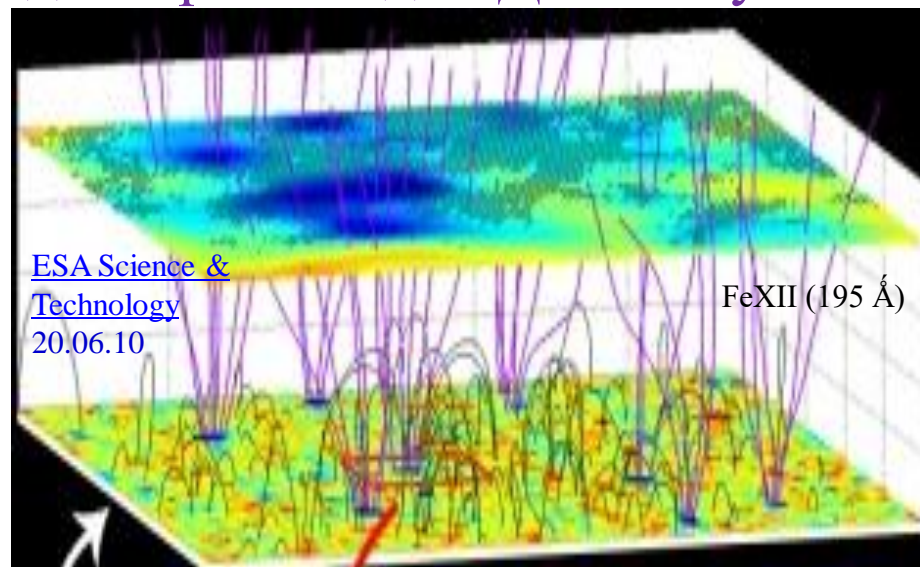
Даже современные методы наблюдения магнитных полей не могут нам дать всю картину зарождения КД на границах УС одного знака и наблюдения возможны только с уже состоявшегося появления КД на высотах, где расхождение силовых линий даёт возможность их наблюдать, обычно это высоты  $20-50 \cdot 10^3$  км, и ВСП КД уже сформировались.



## Корональные дыры : структура, II.

В пределах границ КД наблюдается сложная структура всплытия небольших магнитных потоков, образующих яркие точки, из которых рождаются два сорта выбросов (**jets—cool and hot**) и шлемовидные структуры (**plums**), которые хорошо видны при выходе КД к лимбу или (постоянно) в приполярных КД.

– КД<sub>МП</sub> состоит из трубок (flux tubes), которые связаны с магнитной сеткой. В пределах КД сильные из них ( $>|50G|$ ) доминируют в общем открытом МП КД и вносят в него до 48–71% потока, несмотря на то, что они занимают  $<5%$  площади. Их вклад ( $\sim 80%$ ) и их площадей ( $\sim 7%$ ) в общий открытый КД<sub>МП</sub> максимален во время максимальной фазы эволюции.



## Корональные дыры : характеристики, III

Используя Каталог CHIMERA и добавленные к нему каталоги КД по КА STEREO A, B, группа [Hofmeister, et al 2017, 2018] провела комплексное исследование характеристик КД текущего СЦ24:

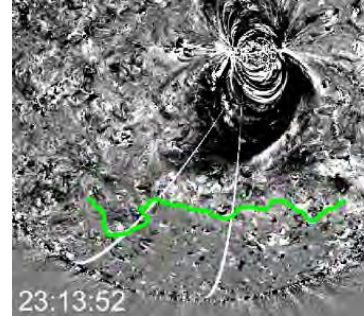
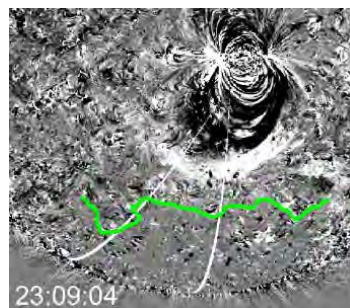
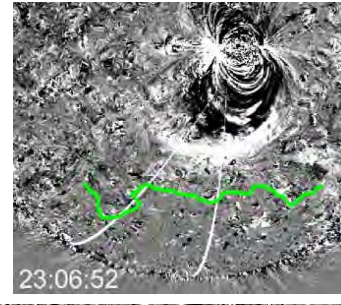
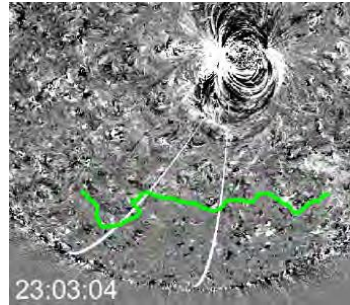
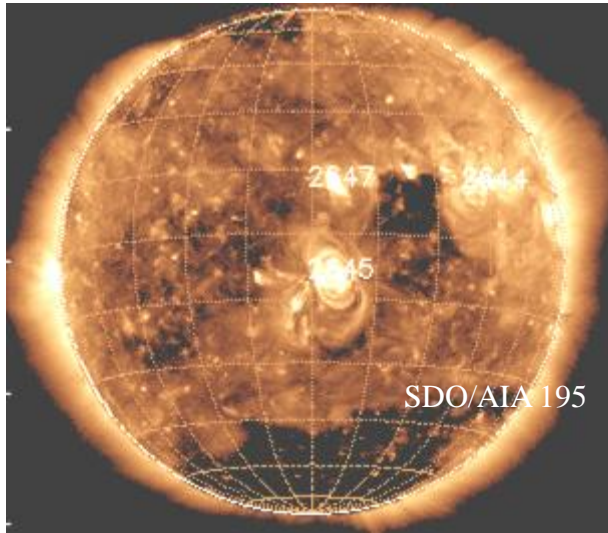
$A_{\text{мед}}(\text{КД}) - 2.39 \cdot 10^{10} \text{ км}^2$ : только 18% всех КД имеет площадь  $A > 5 \cdot 10^{10} \text{ км}^2$ ,  $A_{\text{макс}} - 1.4 \cdot 10^{11} \text{ км}^2 = 2.25\%$ ;

$\langle \Phi_{\text{нсб}} \rangle$  лежит в диапазоне  $2.2 \cdot 10^{19} - 4.7 \cdot 10^{21} \text{ Мх}$ ,  $\langle \Phi_{\text{ав}} \rangle - 9.9 \pm 9.4 \cdot 10^{20} \text{ Мх}$ ; Магнитный поток КД концентрируется в трубки. Трубки магнитного потока, выделенные на уровне 50 G (10 G) покрывают только 1% (10%) площади КД, но содержат 38% (81%) несбалансированного магнитного потока КД. В большинстве КД почти все трубки с магнитным потоком, и особенно трубки с сильным магнитным потоком, выходят за границы КД

$$\langle |B_{\text{ав}}| \rangle = 2.97 \pm 1.55 \text{ G};$$

$|\text{skew}(B)| = 6.6 \pm 1.6$ , определяет, что КД имеют четкую доминирующую полярность

# Корональные дыры : характеристики, IV



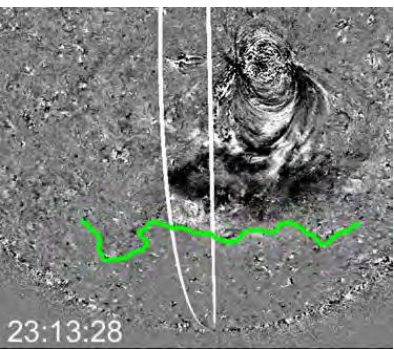
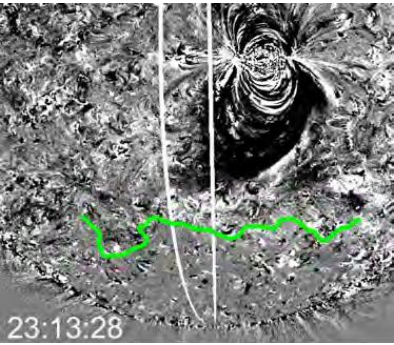
Podladchikova et al., 2019)

Границы КД являются достаточно жёсткой границей для любого возмущения, в солнечной атмосфере (EUV – волны, волны Мортон, СМЕ), причём в отдельных случаях, они определяют направление преимущественного

распространения СМЕ, для СМЕ типа «гало» – это угол первого появления в поле зрения коронографа.

**Особо следует отметить роль КД как усилителей геоэффективности солнечных вспышечных явлений.**

Присутствие КД вблизи АО, где происходит СВС резко повышает их геоэффективность, и расширяет диапазон их локализации. Пример - событие 14.04.1994 г., когда выброс высокоширотного (S50) волокна, расположенного под большой КД, привел к полной перестройке магнитных структур южного полушария Солнца (Мак-Алистер, 1994) и к большой магнитной буре 17.04. 1994



## Корональные дыры в СЦ24 в эпоху пониженной СА

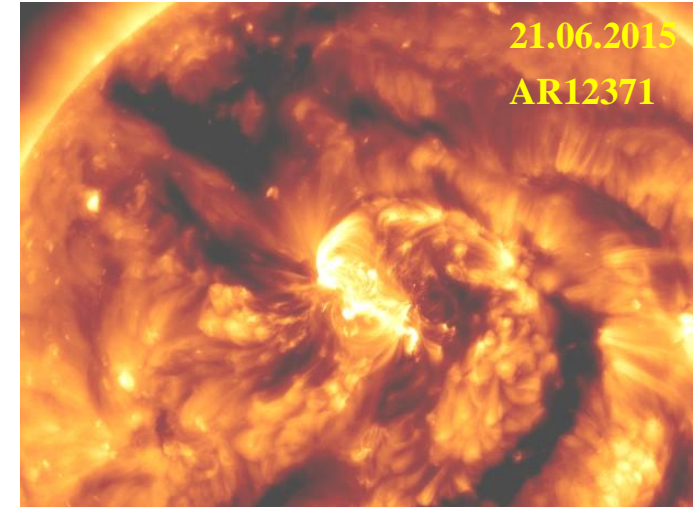
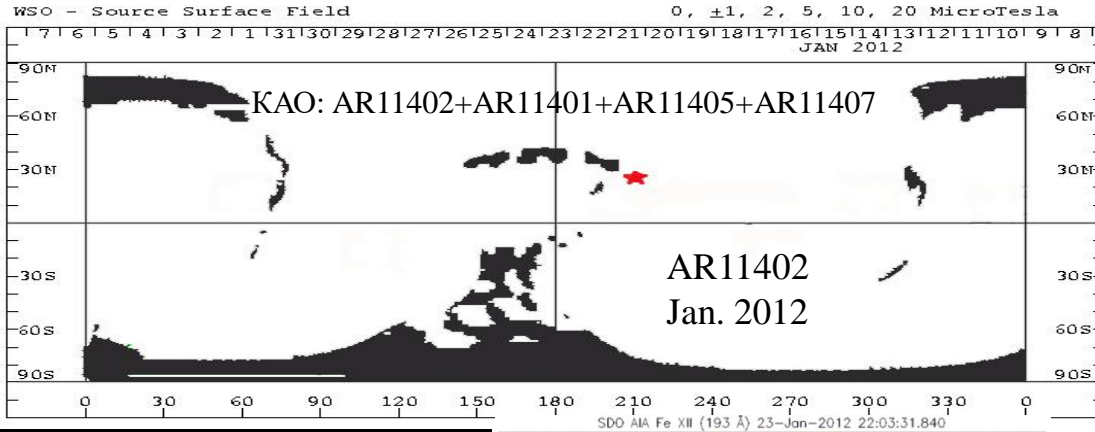
В текущем 24 СЦ как следствие значимого уменьшения общего магнитного поля Солнца мы наблюдаем

– заметное уменьшение величины  $KD_{МП}$  до **0.2–8.7 Гс** (среднее  $3.0 \pm 1.6$  Гс, по сравнению с предыдущими СЦ (**3–36 Гс**) и **~ 20 Гс** в **фазах максимумов** и **1–7 G**, со средним **~5 G** в минимумах предыдущих СЦ, что ослабило геоэффективность их высокоскоростных потоков; в период минимума  $A_{КД}$  была **максимальна**, а  $|V|$  и  $\langle \Phi KD_{МП} \rangle$  оказались **минимальными** за весь период наблюдений КД (с 1981 г.);

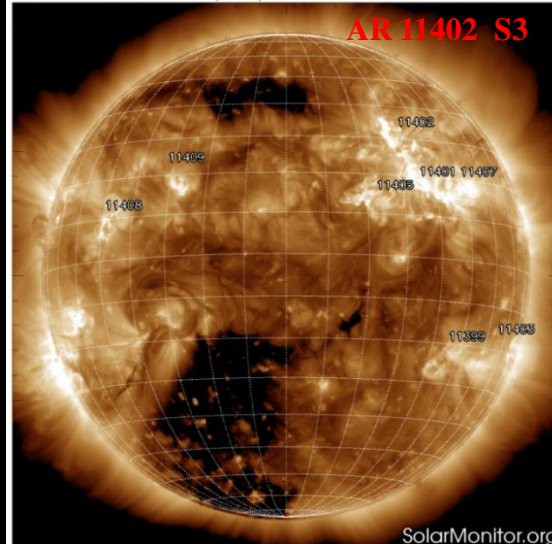
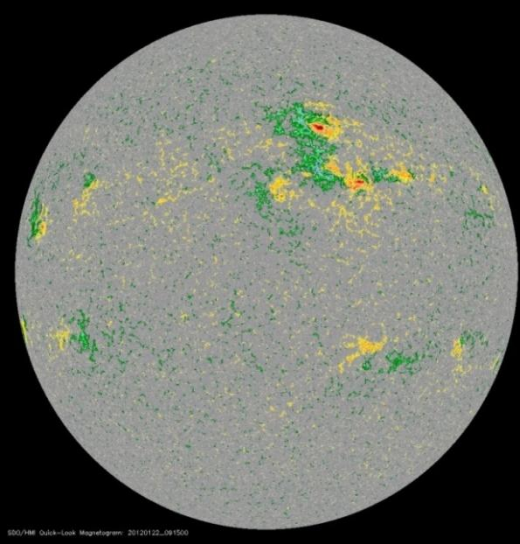
– значительное **уменьшение** всех средних параметров солнечного ветра *по сравнению* со средними показателями в эпоху повышенной СА: скорости СВ и отношения теплового и магнитного давлений ( $\beta$ ) (**~11%**), температуры (**~40%**), теплового давления (**~55%**), массового потока (**~34%**), потока импульса или динамического давления (**~41%**), потока энергии (**~48%**), величины ММП (**~31%**) и его радиальной составляющей (**~38%**), протонного динамического давления – остается вблизи самых низких значений, наблюдаемых в космической эре: **~1.4 нПа**, по сравнению с середины 1970-х до середины 1990-х гг. – **~2.4 нПа**;



## ВЫВОДЫ, 1:



2015/06/21/0102  $6.0 \times 10^2$  GOES H/0236  
1366 км/с M6.5/2B N12W08 S2 12371

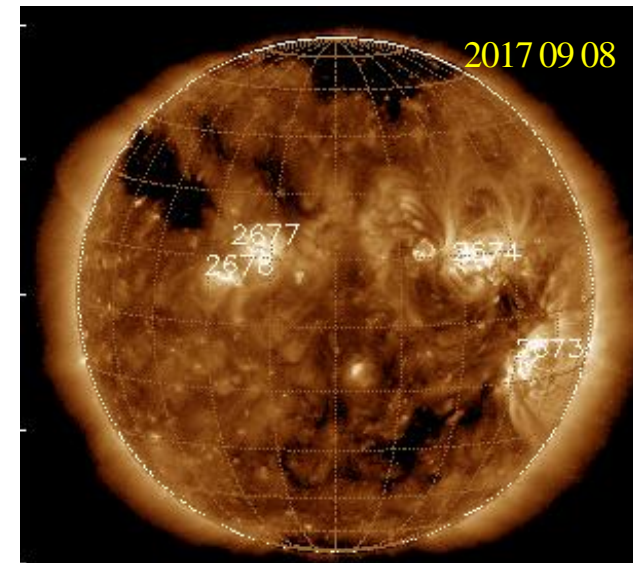
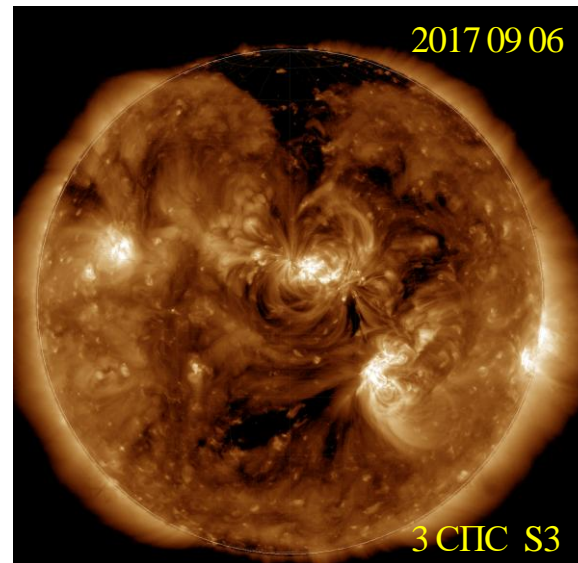
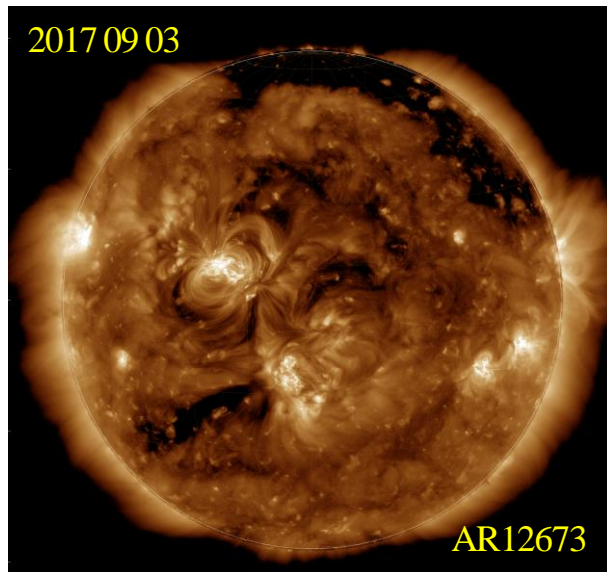


2012/01/23/1530  $6.31 \times 10^3$  GOES H/0400 2175 км/с M8.7/2B N28W21

1. В 24 СЦ все СПС с максимальными потоками S3 (4) происходили в КАО (3 КАО), но лишь в 2-х из них вблизи от них отмечена КД.

2. Наибольшие ( $\geq 10^3$  pfu), в том числе и экстремальные, потоки СПС в большинстве случаях, отмечены, когда вблизи ( $\leq 15^\circ$ — $\sim 180$  Мгм) АО или КАО присутствуют КД, а КВВ от источника вспышки имеет высокую скорость  $\geq 1800$  км/с.

## ВЫВОДЫ, 2:



**3. Относительная доля АО с соседствующими КД (с 1981 г.) во всех СЦ различных эпох примерно одинакова (~60%).**

**4. В 24 СЦ из 54 активных областей (19 КАО), в которых осуществились уверенно отождествлённых СПС, 31 АО локализовалась вблизи ( $<15^\circ \sim 180$  Мгм ) КД с различной ориентацией от них.**

**5. Таким образом, не было найдено доказательств физического взаимодействия магнитных полей АО – источников СПС и открытых конфигураций КД, кроме непрозрачности границ КД для любого возмущения, распространяющихся в солнечной атмосфере, хотя присутствие КД вблизи источников СПС экстремальными потоками, такое взаимодействие допускает.**

**БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!!**



**Работа выполнена на базе Каталога солнечных протонных событий 21 – 24-го циклов солнечной активности и поддержана грантом РФФИ № 19-02-00264**