

**Конференция «Гелиогеофизические
исследования в Арктике-2»,
24-26 сентября 2018, г. Мурманск**



ЗАВИСИМОСТЬ СУББУРЕВОЙ АКТИВНОСТИ ОТ УРОВНЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ДВИЖЕНИЙ В ОБОЛОЧКЕ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ОБЛАКА

Бархатов Н.А.¹, Воробьев В.Г.², Ревунов С.Е.¹, Ягодкина О.И.²

¹*Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина*

²*Полярный геофизический институт*

Аннотация

Исследование посвящено изучению связи суббуревой геомагнитной активности с уровнем МГД турбулентности в оболочках магнитных облаков солнечного ветра, следующих за их ударными волнами. Такие ударные волны на переднем фронте облака во многих случаях по данным патрульных КА наблюдаются в потоке солнечного ветра. При этом между ударной волной и ведущим краем магнитного облака регистрируется турбулентная оболочка. Ударная волна магнитного облака является прозрачной для замагниченного потока солнечного ветра, однако возникающие турбулентные движения в оболочке, следующей за ударной волной, во многом определяются ориентацией межпланетного магнитного поля по отношению к плоскости ударной волны.

В рамках разрабатываемого подхода общепринятым считается ассоциация уровня турбулентности в оболочке с квазипараллельными и квазиперпендикулярными ударными волнами. В связи с этим, необходимой частью исследования является предлагаемый нами алгоритм поиска ударных волн в потоке солнечного ветра и расчета ориентации их ударных плоскостей. Показано, что увеличение интенсивности суббуревых процессов наблюдается в случае квазипараллельных ударных волн магнитных облаков. Полученные результаты согласуются с аналитическими оценками.

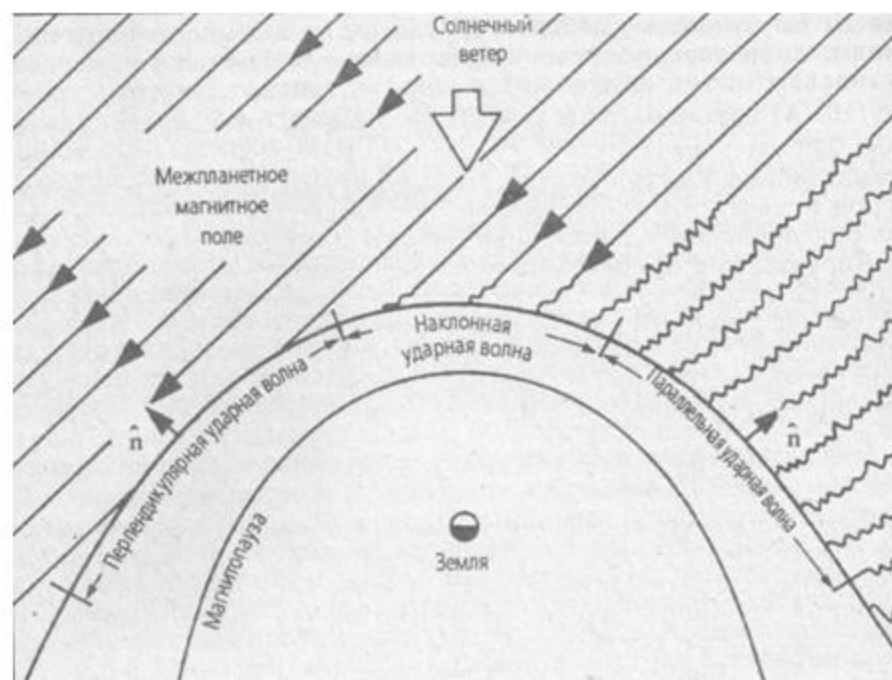
Основные положения исследования

- ☐ Между ударной волной и ведущим краем быстрого (магнитозвуковое число Маха $M \gg 1$) магнитного облака (МО) солнечного ветра регистрируется турбулентная оболочка.
- ☐ Ударная волна магнитного облака прозрачна для замагниченного потока солнечного ветра, но уровень интенсивности турбулентных движений в оболочке во многом определяются ориентацией межпланетного магнитного поля по отношению к плоскости ударной волны.
- ☐ Общепринята связь уровня турбулентности в оболочке с квазипараллельными и квазиперпендикулярными ударными волнами.
- ☐ Устанавливается зависимость суббуревой геомагнитной активности от уровня МГД турбулентности в оболочках магнитных облаков солнечного ветра

Квазипараллельная и квазиперпендикулярная ударные волны

Об уровне турбулентности в переходной области можно судить по величине угла между направлением нормали к ударному фронту и вектором ММП (ориентации фронта ударной волны магнитного облака по отношению к вектору ММП)

Определение величины этого угла позволяет разделить ударные волны магнитных облаков на квазипараллельные и квазиперпендикулярные.



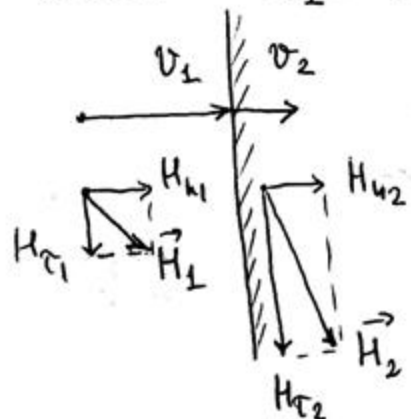
Разделы исследования

- ☐ Стабилизирующая роль магнитного поля солнечного ветра для турбулентных движений в оболочке облака.
- ☐ Алгоритм выделения ударных волн с помощью классификации замеченных разрывов в потоке солнечного ветра.
- ☐ Расчет ориентации их ударных плоскостей.
- ☐ Анализ связи суббуревой активности с наличием турбулентных областей следующих за ударной волной магнитных облаков солнечного ветра.

Условия на ударной волне для магнитного поля солнечного ветра для подавления турбулентных движений в оболочке облака

$$m \neq 0, \quad \left\{ V = \frac{1}{\rho} \right\} \neq 0 \quad V - \text{узелный объем}$$

$$\Sigma_{\text{ли}} \quad v_1 \equiv v_{n1}, \quad \text{то}$$



$$H_{n1} = H_{n2}$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{v_{n1}}{v_{n2}} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

$$\frac{H_{t1}}{H_{t2}} = \frac{v_{n2}}{v_{n1}} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

Связи между:

для турб. и. волн

$$H_{t2}^2 \geq 4\pi \rho_2 v_2^2$$

$$\left(\frac{H_{t1} v_1}{v_2} \right)^2 \geq 4\pi \rho_2 v_2^2$$

$$\left(\frac{\vec{H}_1 \times \vec{v}_1}{\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2} \right)^2 \geq 4\pi \rho_2 \frac{v_2^2}{v_1^2}$$

для турб. и. волн

$$H_{n2}^2 \geq 4\pi \rho_2 v_2^2$$

$$H_{n1}^2 \geq 4\pi \rho_2 v_2^2$$

$$\left(\frac{\vec{H}_1 \cdot \vec{v}_1}{v_1} \right)^2 \geq 4\pi \rho_2 v_2^2$$

1. Стабилизирующая роль магнитного поля солнечного ветра для турбулентных движений в оболочке облака

Магнитное поле подавляет турбулентные движения за ударным фронтом при выполнении одного из неравенств [Бархатов и др., 2001]:

$$\left(\frac{\mathbf{B}_1 \times \mathbf{V}_1}{V_1 V_2} \right)^2 \gg 4\pi\rho_2 \frac{V_2^2}{V_1^2}; \quad (1)$$

$$\left(\frac{\mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{V}_1}{V_1} \right)^2 \gg 4\pi\rho_2 V_2^2 \quad (2)$$

V_1 и V_2 – скорости потока перед ударной волной и за ней в системе отсчета, движущейся вместе с плазмой; B_1 – магнитное поле перед ударной волной.

В этом случае происходит замена среды оболочки измененным на ударной волне замагниченным солнечным ветром.

Турбулентность в замагниченной плазме или ее отсутствие обусловлены характерными временами

Время оборота вихря – время переноса энергии: $\tau \sim \frac{\ell}{u}$
(ℓ – раз. м. попер.)

В ионизованной м. плазме – это время Альфвена: $\tau_A \sim \frac{\ell}{u_A}$

Нет каскада, т.е. турбулентности, если
 $\tau_A > \tau$

2. Алгоритмы выделения ударных волн с помощью классификации разрывов замеченных в потоке солнечного ветра

Основы алгоритмов классификации заключаются в анализе соотношений параметров на МГД разрывах.

- Разрывы, перемещающиеся вместе с солнечным ветром, должны быть тангенциальными или контактными, так как только для этих двух видов выполняется условие равенства нулю скорости перпендикулярной поверхности разрыва.
- Разрывы, перемещающиеся относительно солнечного ветра, должны быть вращательными разрывами или ударными волнами. Вращательные разрывы (волны) перемещаются относительно плазмы солнечного ветра со скоростью не зависящей от амплитуды волны, но определяющейся плотностью плазмы и напряженностью ММП.
- Классификация, напрямую опирающаяся на условия на МГД разрывах, не может быть применена к экспериментальным данным, полученным с одного КА, поскольку всегда остается неизвестным ориентация фронта разрыва. **Векторные соотношения входящие в условия на разрывах, оказываются бесполезными.**
- Для решения поставленной задачи классификации можно использовать только скалярную часть условий.

Адаптированная часть условий на разрывах

- 1) **тангенциальный разрыв**, для которого характерно сохранение сумм давлений до и после скачка параметров, т.е. выполняется условие $P + \frac{H^2}{8\pi} = const$.
- 2) **контактный разрыв**, когда скорость и магнитное поле постоянны: $V = const$, $H = const$.
- 3) **вращательный разрыв** наблюдается так же при $V = const$, $H = const$, но с дополнительным условием – концентрация плазмы до и после скачка не должна меняться ($N = const$).
- 4) **ударные волны**, для которых характерно увеличение концентрации плазмы, неизменное значение нормальной составляющей магнитного поля при росте магнитного поля (быстрая ударная волна) или при уменьшении поля (медленная ударная волна) за скачком.

Классификация разрывов проводится согласно скалярной части условий по одному из параметров N , $|B|$ или комбинации параметров $\sum P = P + \frac{H^2}{8\pi}$.

Для этого было разработано два сценария (алгоритма). Согласно первому алгоритму классификация должна начинаться с разделения скачков по сумме давлений $\sum P = P + \frac{H^2}{8\pi}$, согласно второму – с разделения по магнитному полю.

Схемы сценариев примененных для автоматической ИНС классификации и «ручной» классификации

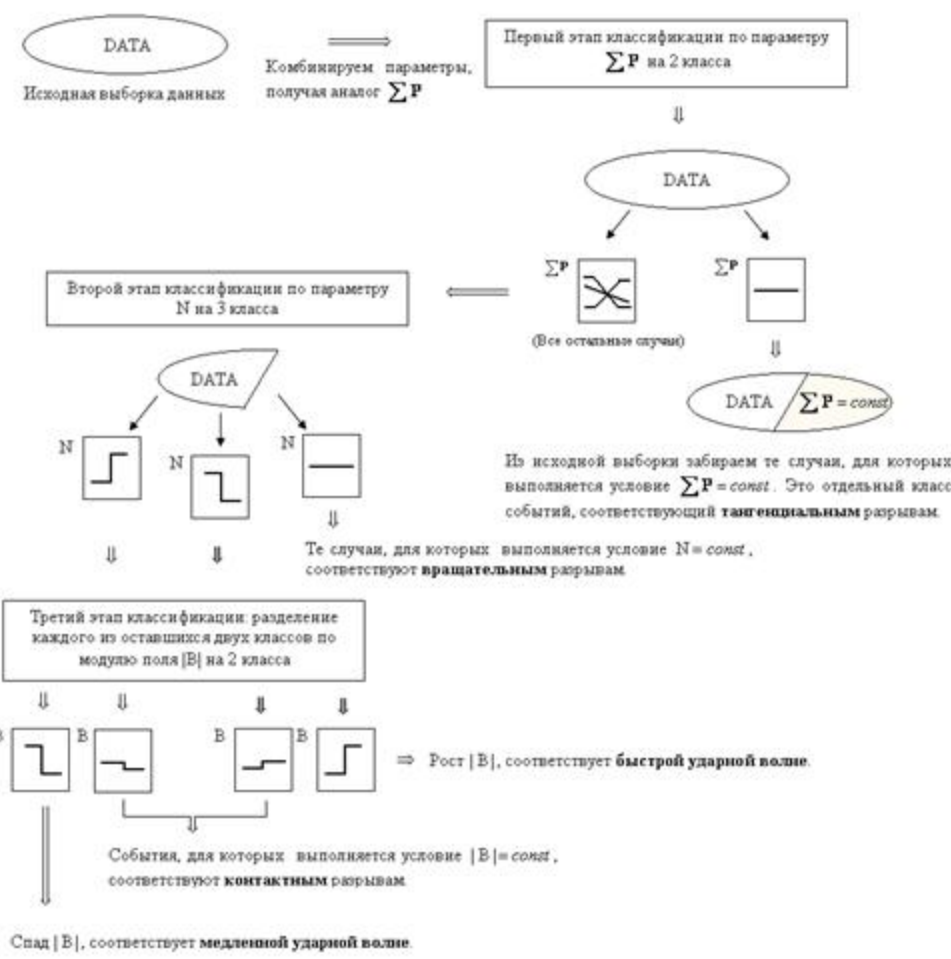


Схема №1.
Первичная классификация по сумме давлений.

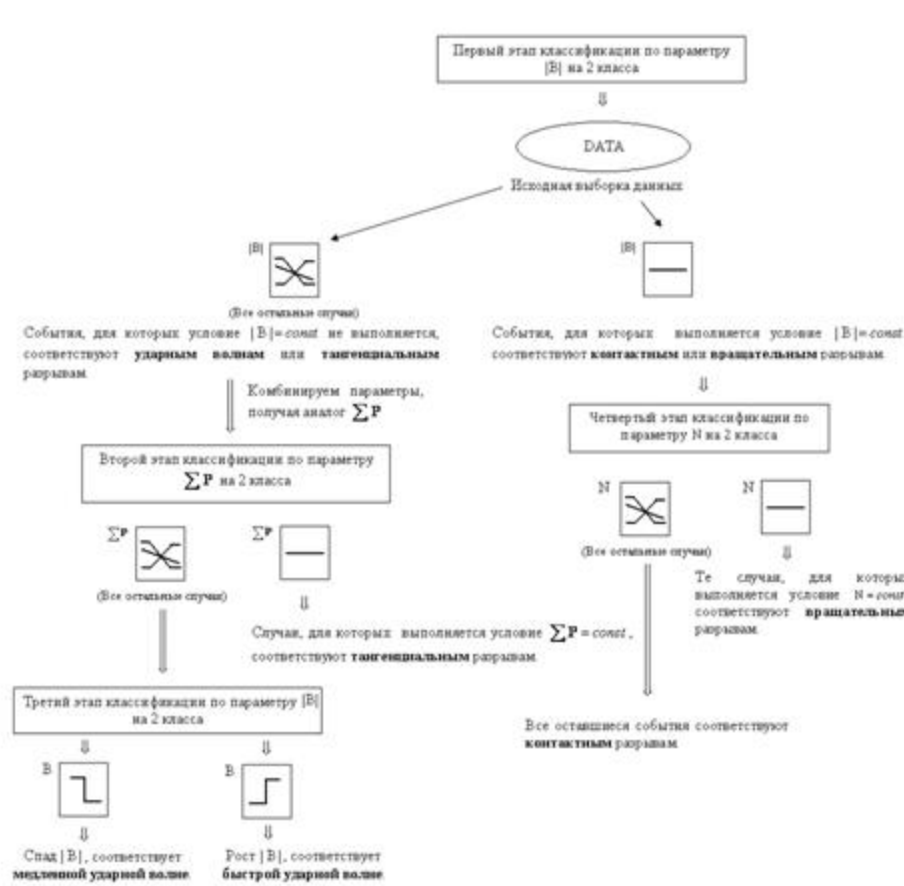


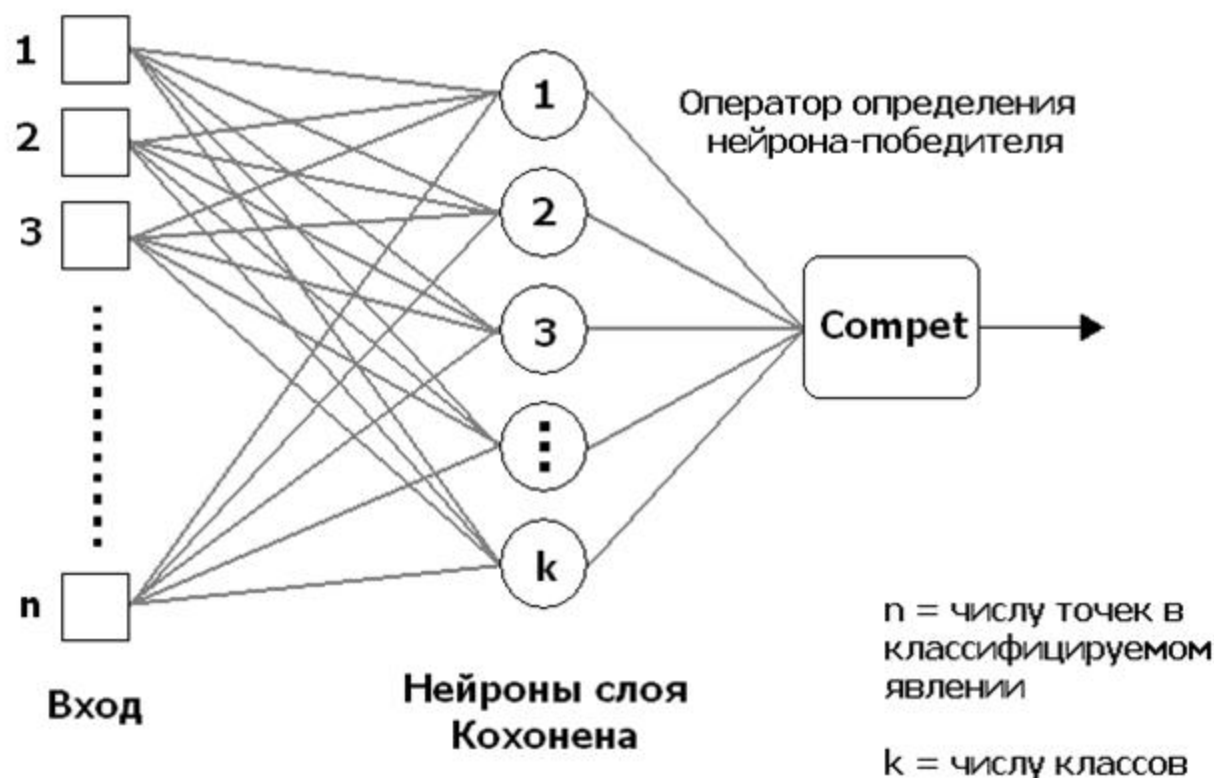
Схема №2.
Первичная классификация по магнитному полю.

Автоматическая классификация выполнена классификационной самообучающейся нейронной сетью «Слой Кохонена»

Общая идея алгоритма заключается в том, что в процессе самообучения путем коррекции весов усиливаются связи между возбужденными нейронами.

Это означает, что происходит закрепление образа, отвечающего конкретной части событий из всей группы рассматриваемых событий.

Таким образом сеть способна обобщать схожие образы, относя их к одному классу.



Архитектура слоя Кохонена и алгоритм его настройки предполагает, что для каждого входного вектора будет активизирован лишь один нейрон (нейрон-победитель).

Для данного входного вектора только один нейрон Кохонена выдает логическую единицу, все остальные выдают ноль.

Слой Кохонена классифицирует входные векторы в группы схожих векторов. Это достигается с помощью такой подстройки весов, что близкие входные векторы активизируют один и тот же нейрон.

В результате обучения слой приобретает способность объединять схожие входные векторы и разделять несхожие входные векторы.

3. Расчет ориентации плоскостей ударных волн

- Уровень турбулентности в оболочке облака для средних значений вектора ММП в основном зависит от тангенциальной компоненты ММП к плоскости ударного фронта.
- В результате на фронте может заметно измениться значение геоэффективной B_z компоненты ММП в солнечно-магнитосферной системе координат и этим увеличить геомагнитную эффективность облака.

Для ответа на эти вопросы важно знать ориентацию ударных волн, которую определяем по теореме о компланарности для векторов магнитного поля на УВ [Хундхаузен, 1976]. При этом учитывается неизменность величины нормальной составляющей ММП к поверхности фронта ударной волны.

На УВ меняется только тангенциальная составляющая ММП: $\Delta \mathbf{B} = \Delta \mathbf{B}_\tau = \mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1$

Тогда, согласно теореме нормаль $\mathbf{n}$ к ударной волне параллельна векторному произведению

$$\mathbf{N} = \Delta \mathbf{B} \times (\mathbf{B}_1 \times \mathbf{B}_2)$$

$\mathbf{B}_1$ – магнитное поле перед ударной волной, $\mathbf{B}_2$ – магнитное поле за ней, вектор $\Delta \mathbf{B} = \mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1$ лежит в плоскости ударной волны.

Значение угла между $\mathbf{N}$ и $\mathbf{B}_1$ определяет тип УВ: квазипоперечный или квазипродольный:

$$\xi = \arccos \frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{B}_1}{|\mathbf{N}| |\mathbf{B}_1|}$$

3. Расчет ориентации плоскостей ударных волн

- Уровень турбулентности в оболочке облака для средних значений вектора ММП в основном зависит от тангенциальной компоненты ММП к плоскости ударного фронта.
- В результате на фронте может заметно измениться значение геоэффективной B_z компоненты ММП в солнечно-магнитосферной системе координат и этим увеличить геомагнитную эффективность облака.

Для ответа на эти вопросы важно знать ориентацию ударных волн, которую определяем по теореме о компланарности для векторов магнитного поля на УВ [Хундхаузен, 1976]. При этом учитывается неизменность величины нормальной составляющей ММП к поверхности фронта ударной волны.

На УВ меняется только тангенциальная составляющая ММП: $\Delta \mathbf{B} = \Delta \mathbf{B}_\tau = \mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1$

Тогда, согласно теореме нормаль $\mathbf{n}$ к ударной волне параллельна векторному произведению

$$\mathbf{N} = \Delta \mathbf{B} \times (\mathbf{B}_1 \times \mathbf{B}_2)$$

$\mathbf{B}_1$ – магнитное поле перед ударной волной, $\mathbf{B}_2$ – магнитное поле за ней, вектор $\Delta \mathbf{B} = \mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1$ лежит в плоскости ударной волны.

Значение угла между $\mathbf{N}$ и $\mathbf{B}_1$ определяет тип УВ: квазипоперечный или квазипродольный:

$$\xi = \arccos \frac{\mathbf{N} \cdot \mathbf{B}_1}{|\mathbf{N}| |\mathbf{B}_1|}$$

4. Анализ связи суббуревой активности с наличием оболочек за УВ магнитных облаков солнечного ветра

Используемые данные с 1-мин разрешением (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>):

Проанализированы параметры плазмы солнечного ветра (концентрация N и скорость V), компоненты вектора ММП $B(B_x, B_y, B_z)$ в GSM системе координат и значения AL индекса магнитной активности в авроральной зоне **для 33 случаев быстрых магнитных облаков 1998-2012 гг. с УВ и оболочками.**

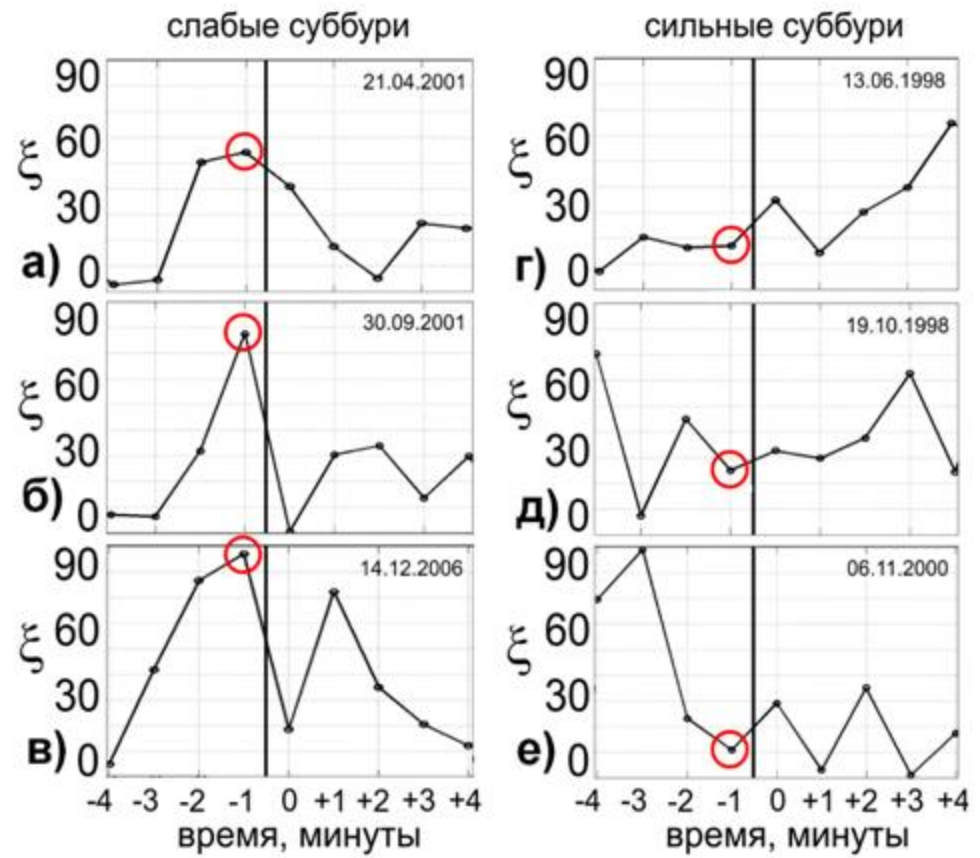
Суббуревая активность оценивалась интегральным значением AL индекса за интервал времени от момента обнаружения УВ до начала регистрации тела магнитного облака.

Процессы в ММП на фронте ударной волны не изучались, поскольку минутные данные не позволяют анализировать турбулентную среду в пределах ширины фронта ударной волны.

Для иллюстрации взяли 6 событий:

три события, соответствующие наиболее сильным (13.06.1998; 19.10.1998; 06.11.2000) и три - самым слабым (21.04.2001; 30.09.2001; 19.11.2007) проявлениям суббуревой активности.

Динамика углов между вектором ММП в потоке солнечного ветра поглощаемым оболочкой магнитного облака и нормалью к ударной волне (УВ) магнитного облака для шести событий

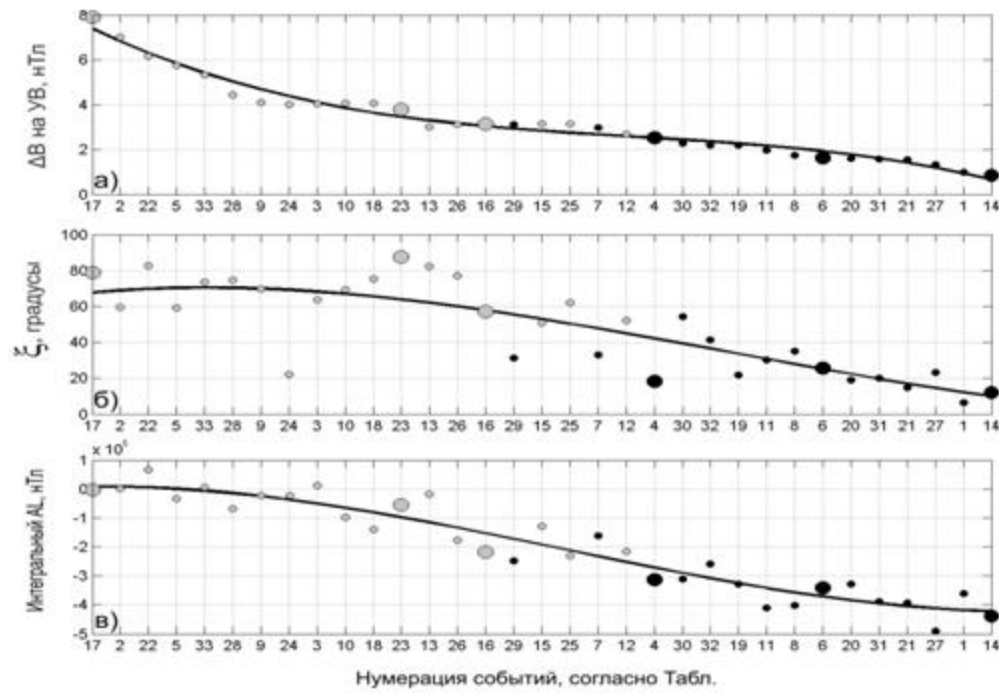


Примеры вариаций углов ξ между вектором ММП и нормалью к ударной волне до и после регистрации фронта УВ

Квазипараллельная ($\xi \leq 30^\circ$) и квазиперпендикулярная ($\xi \geq 60^\circ$) ударная волна.

Вычислялось интегральное значение AL индекса за интервал времени от момента обнаружения ударной волны до начала регистрации тела магнитного облака.

Анализ динамики углов между вектором ММП и нормалью к фронту УВ, величины скачков модуля ММП на УВ и значений интегрального AL



Серые точки - квазиперпендикулярные УВ (большие кружки-3 базовых события) , черные точки - квазипараллельные УВ (большие кружки – 3 базовых события), сплошные прямые – аппроксимация полиномом 3 порядка для всех анализируемых 33 случаев МО.

Распределение событий выполнено на основе сортировки по величинам скачков ММП на УВ.

Большие углы для квазиперпендикулярных УВ при неизменной нормальной составляющей магнитного поля приводят к заметному скачку ММП.

Малые углы для квазипараллельных случаев вызывают малые изменения модуля ММП. Большие значения модуля магнитного поля за ударной волной стабилизируют волновые процессы в переходной области и понижают уровень интенсивности турбулентных движений. Эти значения отвечают наименьшей суббуревой активности.

Вывод

Установлена связь суббуревой активности с наличием турбулентных оболочек регистрируемых за ударной волной магнитных облаков солнечного ветра.