Интерпретация квазипериодических колебаний факельных образований на Солнце

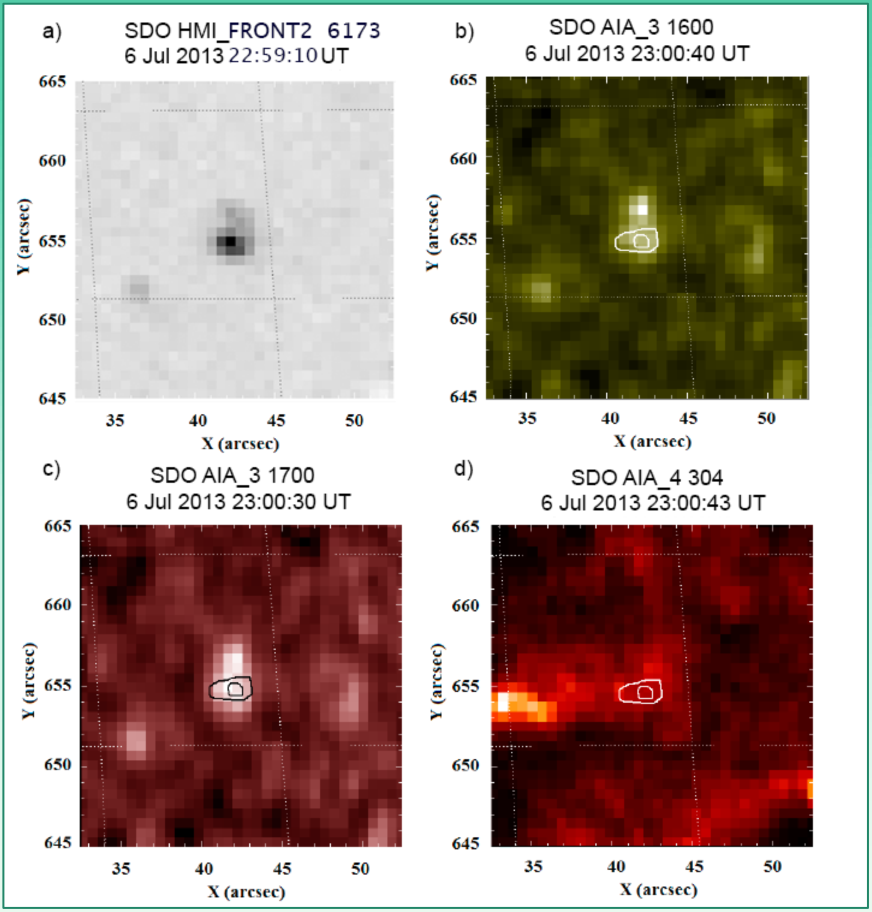
Стрекалова П. В.[1], Смирнова В. В.[1], Наговицын Ю. А.[1,2]
Соловьев А. А.[1]

[1]Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Россия
[2]Санкт-Петербургский Государственный Университет Аэрокосмического Приборостроения

Иркутск 2019

Факельные образования

ФО — надкласс, объединяющий мелкомасштабные, долгоживущие, устойчивые, уединённые магнитные структуры.



ФО не принадлежат факельным полям вокруг пятен или активных областей.

Характерные параметры:

- Время жизни — 9-33 часа (по магнитному полю)
- Напряжённость магнитного поля— 350-1100 G (максимальная)
- Характерный размер — 1500-4000 км

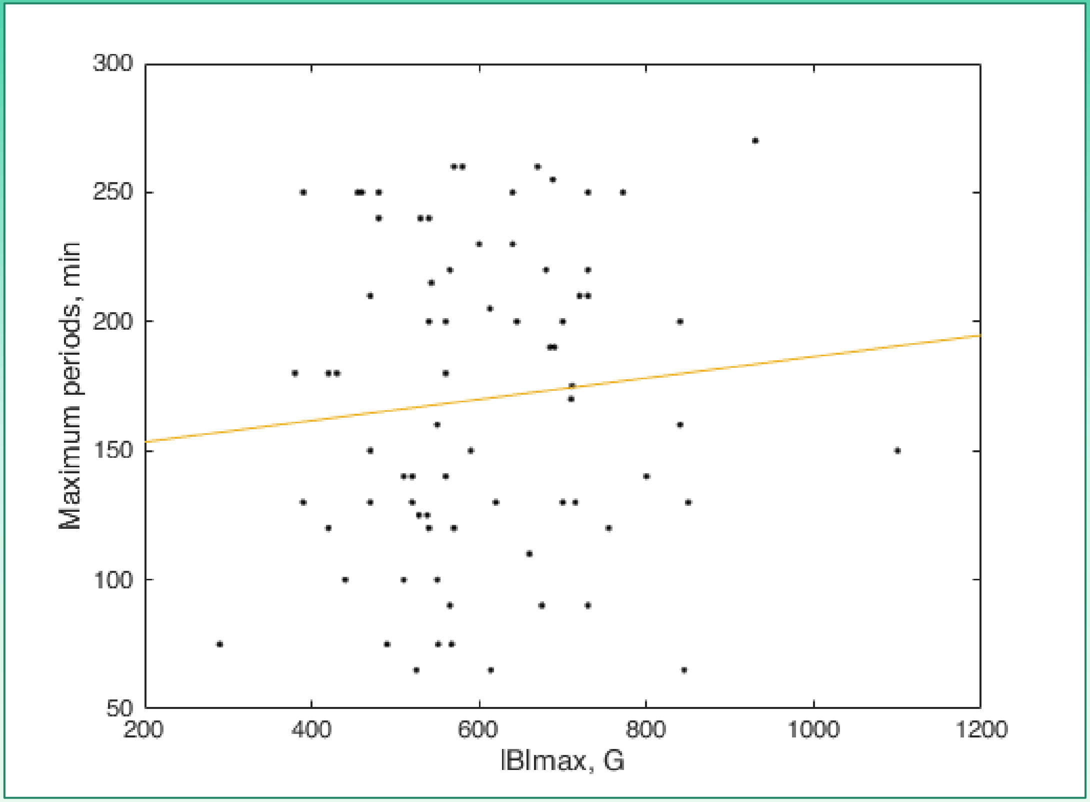
Колебания магнитного поля

Использованы магнитограммы SDO HMI:

- пространственное разрешение 1″
- шаг по времени 45 секунд

Для выявления колебаний использовался вейвлет-анализ и метод EMD [Huang et al., 1998]

Наиболее интересны (наименее изучены) долгопериодические колебания магнитного поля с периодами 25-280 минут



Анализ на цветные шумы

Полученные колебательные моды проверялись на принадлежность к цветным шумам, чья спектральная энергия распределена по степенному закону:

$S \sim 1/f^{\alpha}$

S – спектральная плотность мощности сигнала

α – параметр, определяющий цвет шума.

- $\alpha = 0$ – белый шум
- $\alpha = 1$ – розовый шум
- $\alpha = 2$ – красный шум

Критерии «шумности» мод:

- Визуальный наклон распределения спектральной энергии.

  Энергии *E* шумовых мод связаны с периодом *P*, как $E*P^{(1-\alpha)}=const$

- Шумные моды имеют диадный характер. Т.е. увеличение периода каждой последующей моды приблизительно в два раза *[Flandrin et al 2015]*
- Амплитуды красного и розового шумов имеют нормальное распределение

[Wu & Huang, 2003]

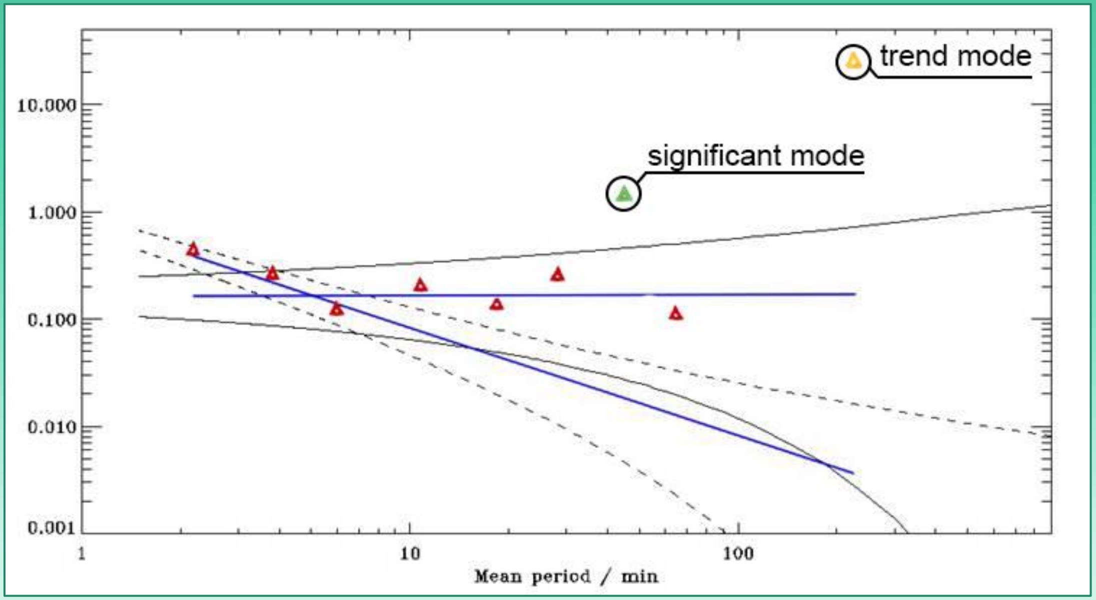
Цветные шумы в сигнале

Колебательная мода значимая, когда её спектральная энергия лежит выше доверительных интервалов цветных шумов.

Доверительные интервалы для каждого типа шума определялись путем моделирования синтетических шумов в соответствии с законом распределения их спектральной энергии.

Трендовая всегда лежит выше всех доверительных интервалов, но значимой, очевидно, не является.

[Kolotkov et. al, 2016]



Зависимость спектральной энергии колебаний от периода. Сплошные линии показывают доверительный интервал розового шума, пунктирные линии обозначают белый шум. Значимая мода находится чуть выше доверительного интервала розового шума (пример)

Значимые колебательные моды

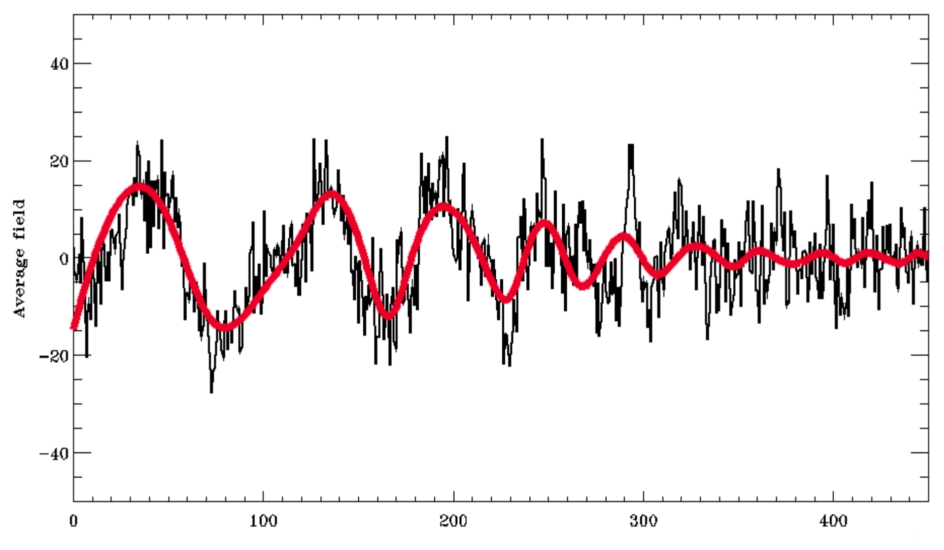
Во всех исследованных случаях, где максимальное магнитное поле превышало 500 Гс, было обнаружено по одной значимой моде одного из трёх типов:

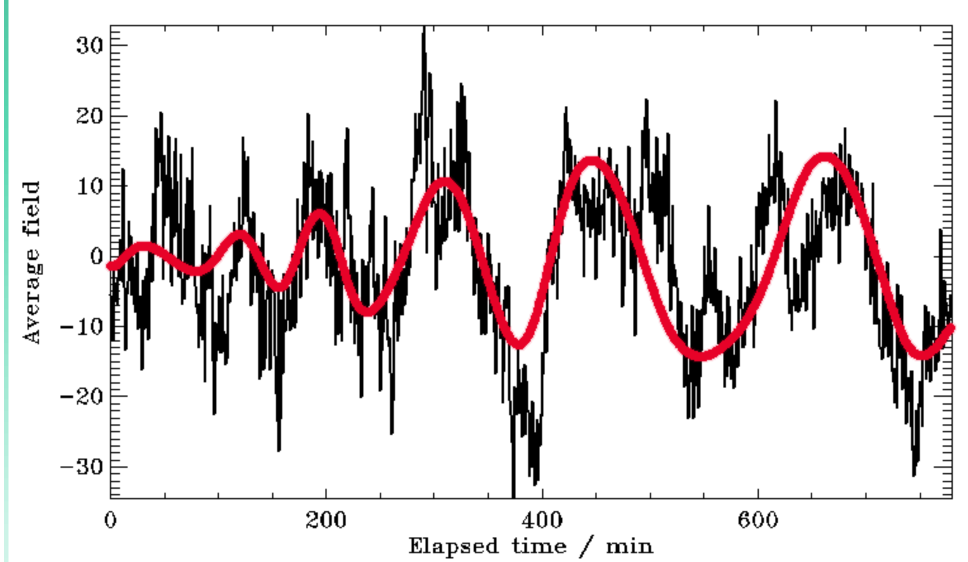
1) Период и амплитуда растут со временем

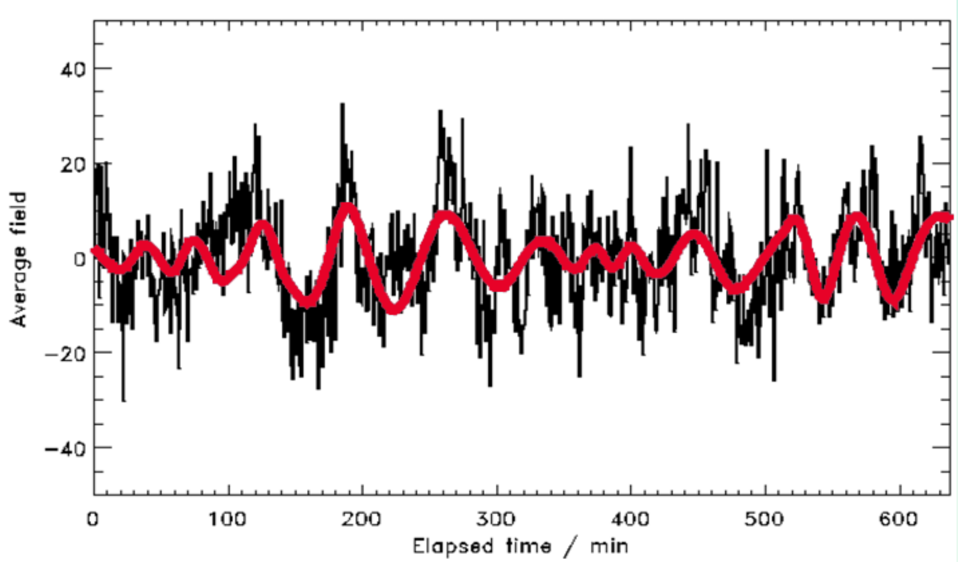
2) Период и амплитуда уменьшаются со временем

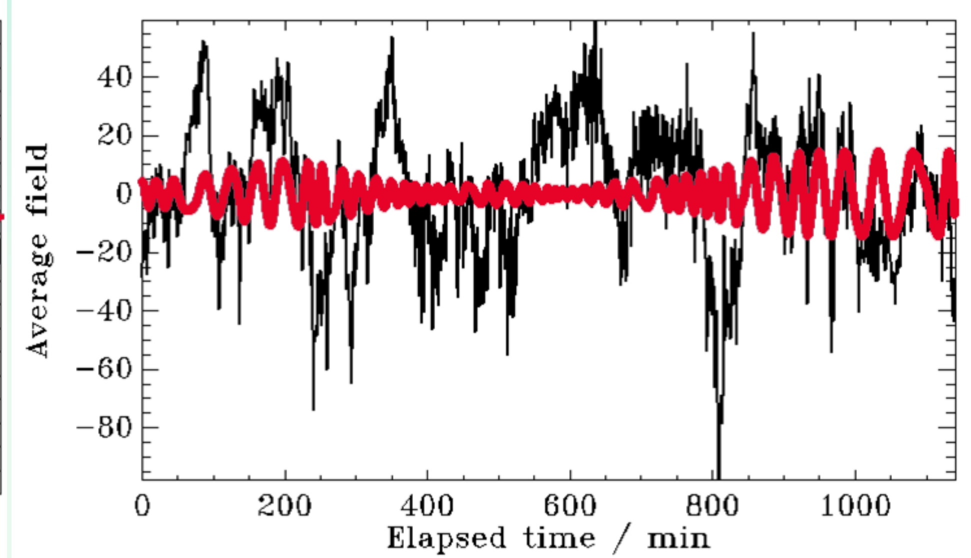
3) Режимы возрастания и убывания амплитуды и периода сменяют друг друга

Виды значимых мод









Аналитическое описание значимых мод

Первый подход [Solov'ev et al., 2019] : **ФО** – как система с переменной по времени жёсткостью.
Для неё решается уравнение малых линейных колебаний при наличии трения (демпфирования):

$$\ddot{x}(t) + 2\beta\dot{x}(t) + W^2(t)x(t) = 0, \quad (1)$$

W (t) - эффективная упругость системы (возвращающая сила на единицу массы).

Было получено решение:

$$x(t) = A_0 exp[(\gamma - \beta)t] \cos\left[\frac{\omega_0}{2\gamma} exp(-2\gamma t) + \varphi\right], \quad (2)$$

A_o – амплитуда колебаний
γ – инкремент возрастания,
β – коэффициент трения,
W(t) –эффективная упругость системы (возвр. сила на ед. массы)
ω_o – частота в нач. момент,
φ – начальная фаза

Изменяя параметры β, γ, ω_0 и φ можно подобрать функции, достаточно хорошо описывающие колебания 1 и 2 типа. Но для 3 типа – либо собирать кусочную функцию из частей с разными начальными параметрами, либо в рамках механической аналогии переходить к альтернативному выражению возвращающей силы, вводя модуляцию амплитуды.

Аналитическое описание значимых мод

Первый подход [Solov’ev et al., 2019] : **ФО** – как система с переменной по времени жёсткостью.
Для неё решается уравнение малых линейных колебаний при наличии трения (демпфирования):

$$\ddot{x}(t) + 2\beta\dot{x}(t) + W^2(t)x(t) = 0, \quad (1)$$

W (t) - эффективная упругость системы (возвращающая сила на единицу массы).

Было получено решение:

$$x(t) = A_0 exp[(\gamma - \beta)t] \, cos\left[\frac{\omega_0}{2\gamma} exp(-2\gamma t) + \varphi\right], \quad (2)$$

A_o – амплитуда колебаний
γ – инкремент возрастания,
β – коэффициент трения,
W(t) –эффективная упругость системы (возвр. сила на ед. массы)
ω_o – частота в нач. момент,
φ – начальная фаза

Переходим в рамках механической аналогии:

$$W^2(t) = \omega_0^2 \exp(-4\gamma t) - \gamma^2 + \beta^2 \quad (3)$$

$$\Rightarrow$$

$$W^2 = \omega_0^2[1 - a\sin(\gamma(t - t_0))]^2 \quad (3a)$$

где 0<*a*<*1* константа, определяющая амплитуду периодической модуляции.

Аналитическое описание значимых мод

Второй подход основан на фитировании значимых мод с последующей физической интерпретацией.
Исходя из предположения о нелинейности колебаний, возьмём выражение колебаний:

$$x(t) = A\sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right), (4)$$

Теперь предположим, что амплитуда изменяется по Гауссу:

$$A = A_0 \exp\left(\frac{-(t-t_0)^2}{2c^2}\right), (5)$$

Свяжем амплитуду и период соотношением, полученным в статье [Kolotkov et al., 2017] для одного из наших объектов, который имел значимую моду 1 типа:

$$T = dA^p + b, (6)$$

где d, p, и b константы.

Можно подобрать значения параметров для колебаний 1 и 2 типа, соответствующие наблюдениям. Однако случай биений всё же требует отдельного рассмотрения.

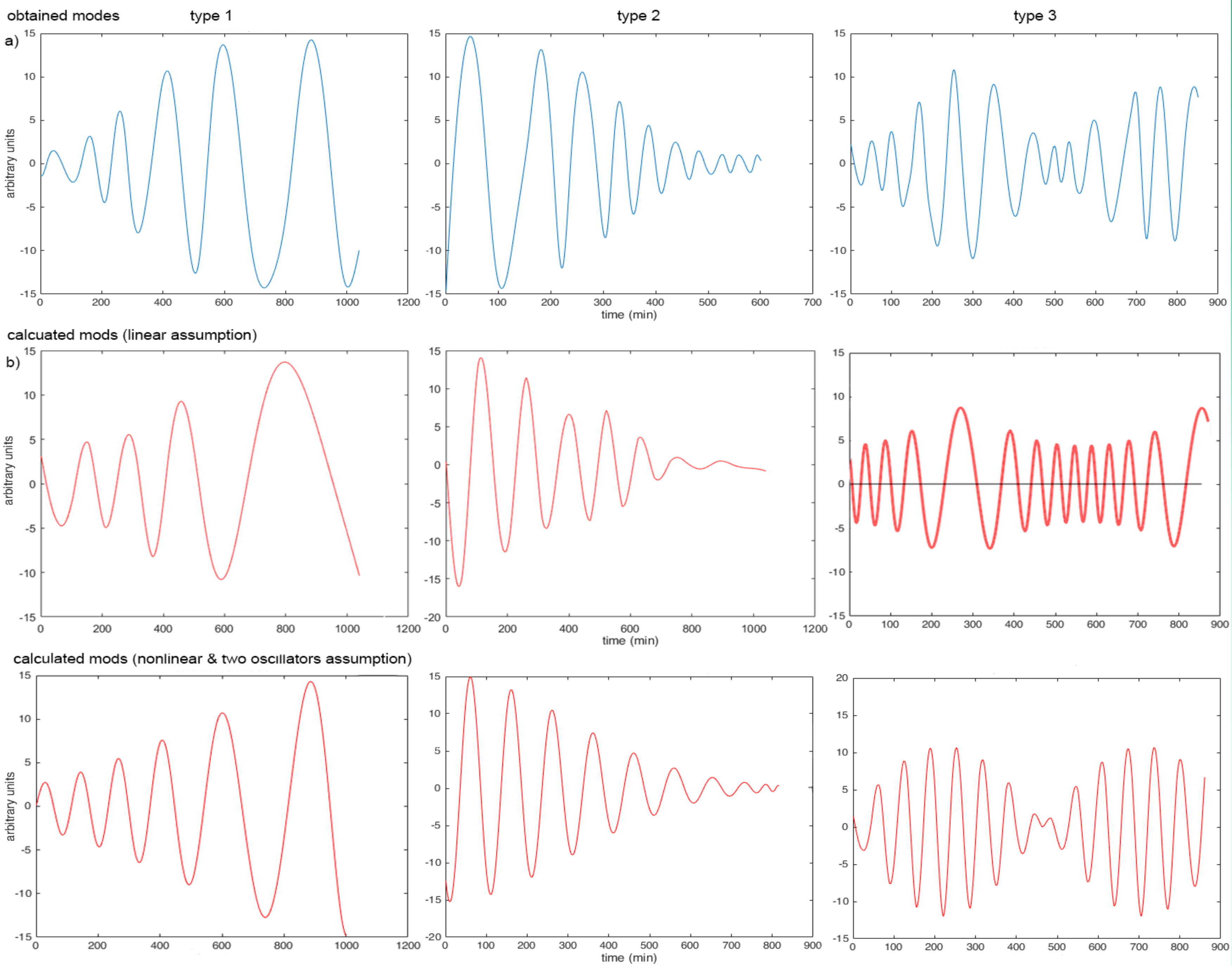
Аналитическое описание значимых мод

Для случая **биений** мы использовали приближение системы двух линейных осцилляторов со слабой связью, рассматривая колебания системы как суперпозицию двух колебаний с близкими частотами.

Одним их известных решений уравнений движения для такой системы является уравнение:

$$\boxed{x(t) = 2A\sin\omega_a t \cdot \sin\omega_b t, \quad (7)}$$

Где ω_a – средняя частота колебаний системы, а ω_b – частота изменения амплитуды


obtained modes
type 1
type 2
type 3
a)
arbitrary units
time (min)
calcuated mods (linear assumption)
b)
arbitrary units
time (min)
calculated mods (nonlinear & two oscillators assumption)
arbitrary units
time (min)

Выводы

- И линейный, и нелинейный подходы могут описать колебательные моды, полученные из сигнала магнитограмм ФО для мод 1 и 2 типа, однако нелинейный подход с введением степенной зависимости точнее фитирует форму наблюдаемых колебаний.
- Вопрос о физике процесса пока остаётся открытым. Можно предположить, что «лёгкие» ФО испытывают толчки со стороны более массивных динамических структур, например, супергранул, а возвращающими являются горизонтальные магнитные силы магнитных трубок ФО.
- Случай с биениями достаточно хорошо описывается системой двух слабосвязанных осцилляторов. Это может говорить о воздействии на ФО внешних объектов, колеблющихся на близких частотах, или о взаимодействии относительно слабо связанных структур внутри ФО (магнитные трубки из которых состоят ФО).
- Предложенные аналитические модели способны в первом приближении описать выявленные колебания, однако становится очевидно, что реальная физика колебательных процессов, происходящих в магнитном поле факельных образований, гораздо более сложна.

Выводы

Анализируя полученные результаты можно предположить, что колебательная система слабонелинейная и гораздо более точно может быть описана с помощью уравнения Дуффинга:

$$\ddot{x} + k\dot{x} + \omega^2 x + \alpha x^3 = F\cos\omega t, \quad (8)$$

Это уравнение представляет собой пример системы с нелинейной восстанавливающей силой и затуханием, совершающей вынужденные колебания при гармоническом внешнем воздействии.

Однако даже численное его решение является довольно сложной задачей.

Спасибо за внимание!