

Отклик частотного масштаба ИАР на вариации солнечной и магнитной активности в 24-м солнечном цикле

Potapov A.S., Polyushkina T.N.

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, potapov@iszf.irk.ru

Ионосферный альвеновский резонатор (ИАР) является неотъемлемым элементом всей ионосферно-магнитосферной структуры. Текущие параметры резонатора отражают состояние ионосферы. Подробно были проанализированы суточная, сезонная и солнечно-циклическая модуляции многополосного излучения ИАР. Используются результаты магнитных наблюдений излучения на среднеширотной обс. Монды за период 24-го цикла солнечной активности с 2009 по 2019 гг. Наиболее ярко выражена суточная модуляция, проявляющаяся в изменении частоты всех гармоник излучения на протяжении суток — от минимума вблизи местного полудня до максимальных значений в период от поздних вечерних до ранних утренних часов. Менее известна сезонная модуляция средней частоты излучения ИАР — от минимума летом до максимума в зимние месяцы. При этом глубина суточной модуляции также меняется в течение года, но противофазно частоте: минимум зимой, а максимум летом. Мы выявили также четкую модуляцию частоты ИАР в цикле солнечной активности: среднегодовая частота обратно пропорциональна среднегодовому числу солнечных пятен с коэффициентом корреляции 0.99. Если суточная модуляция почти полностью обусловлена вариацией электронной концентрации, то сезонные и циклические зависимости имеют более сложную природу. Есть основания предполагать, что в их формировании большую роль играют изменения ионного состава ионосферы. Это открывает возможности наземной диагностики высотного профиля относительной концентрации ионов по измерениям частотной структуры излучения ИАР.

Восемнадцатая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)». ИКИ РАН, Москва, 16–20 ноября 2020 г.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00574.

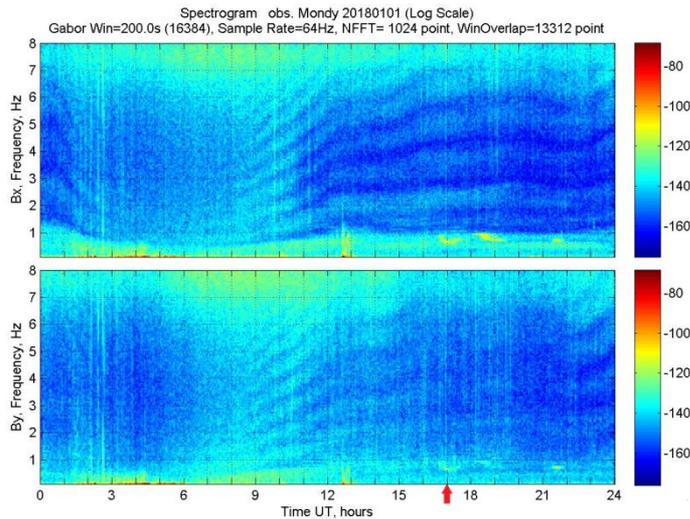


Рисунок 1. Пример суточной спектрограммы излучения ИАР. Показаны меридиональная (B_x) и азимутальная (B_y) составляющие магнитного поля. Стрелка внизу показывает местную полночь.

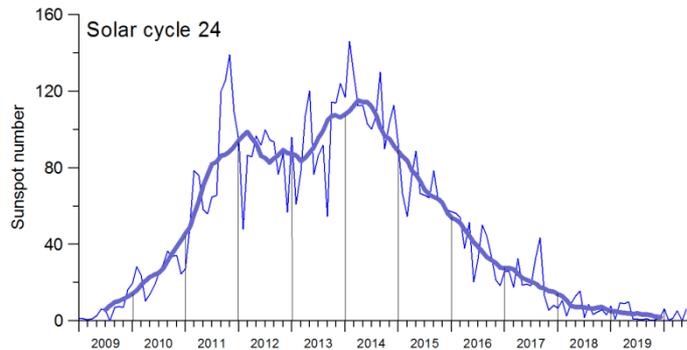


Рисунок 2. Вариация числа солнечных пятен во время 24-го солнечного цикла. Тонкая ломаная линия — среднемесячные значения числа солнечных пятен. Сплошная толстая линия — скользящее среднее по 13 точкам.

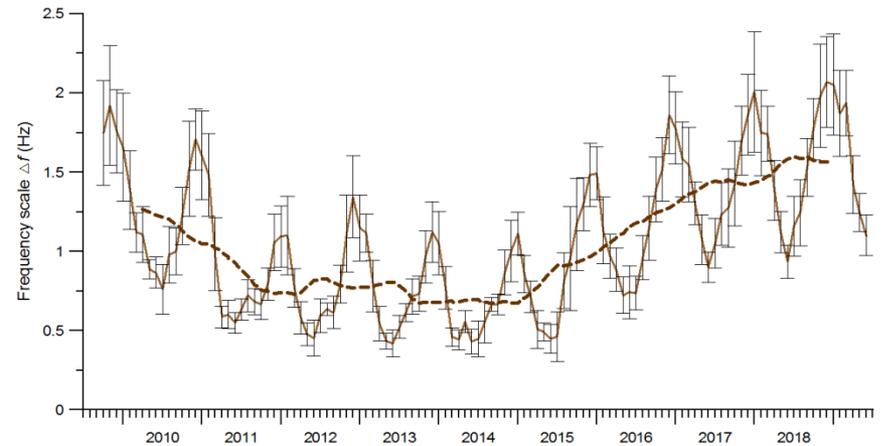


Рисунок 3. Вариация среднемесячных значений Δf за почти 11-летний период наблюдений. Вертикальными линиями показаны стандартные отклонения вычисленных значений Δf ; штриховая линия — скользящее среднее по 13 точкам.

Рисунок 3, на котором показан временной ход среднемесячных значений частотного масштаба Δf (разности между частотами соседних полос) за весь период наблюдений, ясно указывает на то, что помимо суточной модуляции частоты, ярко заметной на спектрограмме рис. 1, излучение ИАР подвержено также сезонной и солнечно-циклической модуляции.

Минимум усредненного циклического хода Δf (начиная со второй половины 2013 года и включая весь 2014 год) точно совпадает с фазой максимума цикла, а максимумы значений Δf достигаются в годы минимума цикла (2009 и 2019). Максимум сезонной вариации Δf падает на зимние месяцы, а минимум — на летние.

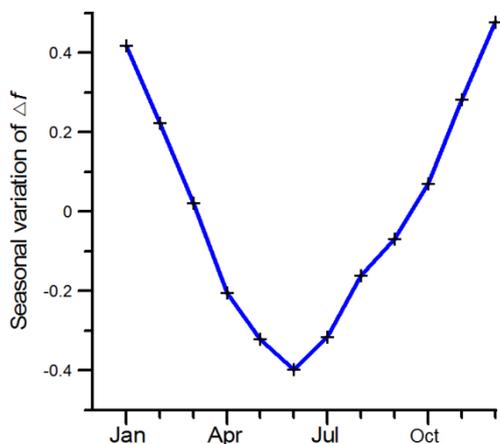


Рисунок 4. Усредненная по циклу сезонная модуляция частотного масштаба излучения ИАР.

Для построения рис. 4 из каждого среднемесячного значения Δf_{ij} вычиталось среднее за соответствующий j -й год значение $\sum_i(\Delta f_{ij})/12$, после чего вычислялись средние по циклу значения S_i сезонной вариации частотного масштаба (этой процедурой была исключена циклическая вариация Δf):

$$S_i = \sum_j \left(\Delta f_{ij} - \sum_i (\Delta f_{ij}) / 12 \right) / 9$$

Здесь Δf_{ij} означает среднее за i -й месяц j -го года значение частотного масштаба Δf , вычисленное по измерениям частот гармоник в полночь местного времени (17 UT); $i = 1, 2, \dots, 12$; $j = 1, 2, \dots, 9$. Использовались результаты измерений за 9 полных лет, с 2010 по 2018 гг.

На рисунке 1 видно, что вся «гребенка» спектральных полос в течение суток сдвигается от минимума вблизи местного полудня, до максимума в полночь или ранние утренние часы. Глубина суточной модуляции меняется. Ее среднемесячные значения показаны на рисунке 5. Изменения глубины модуляции значительны: от 0.3–0.4 зимой до 0.7–0.8 в середине года. На фазе роста солнечной активности (2010–2012) сезонная вариация достаточно регулярна. В максимуме регулярность нарушается и восстанавливается лишь через полтора года после начала фазы спада, продолжаясь до конца цикла.

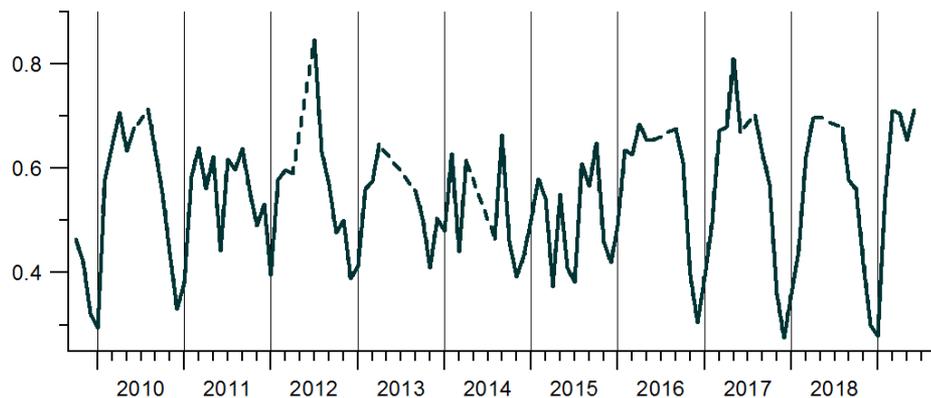


Рисунок 5. Изменения глубины суточной модуляции Δf за весь период наблюдений (б); сплошная линия — изменения глубины модуляции; отрезки штриховой линии — отсутствие данных.

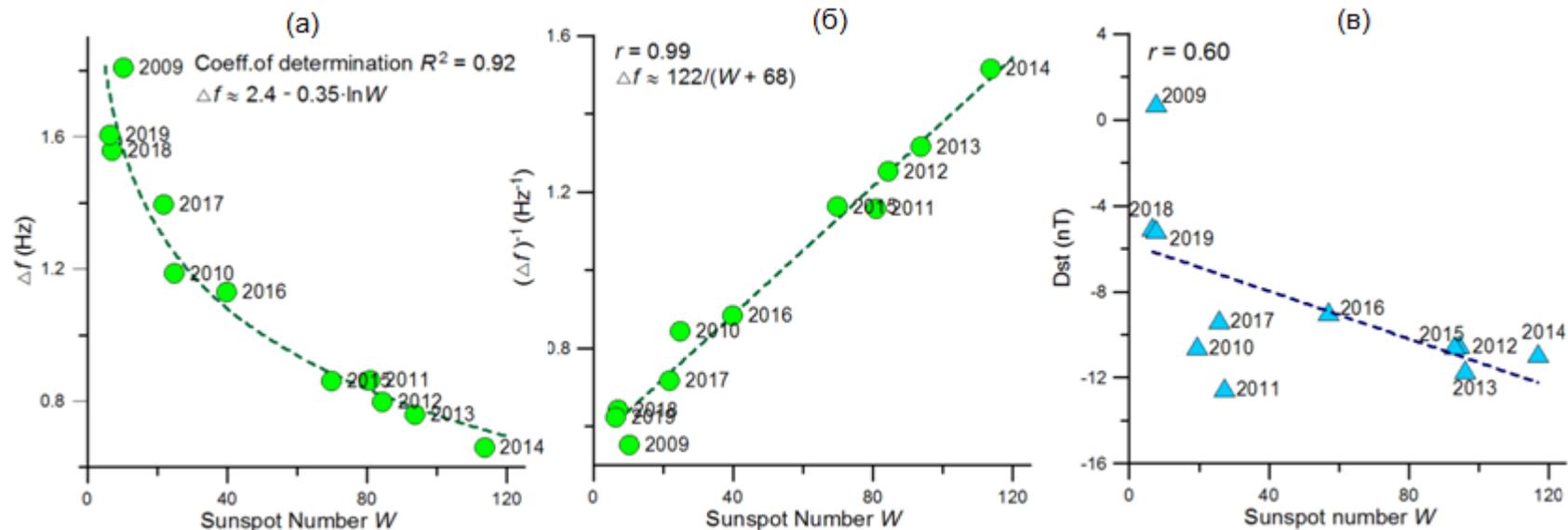


Рисунок 6. Графики зависимости частотного масштаба Δf от среднегодовых чисел солнечных пятен W (а); обратного частотного масштаба $1/\Delta f$ от W (б); среднегодового Dst-индекса от W . Штриховые линии — линейная (а и в) и логарифмическая (б) регрессии.

Наиболее убедительно влияние солнечной активности на частотный режим ИАР демонстрируется сопоставлением среднегодовых значений числа солнечных пятен W с частотным масштабом Δf (рис. 6а) или $1/\Delta f$ (рис. 6б). Для сравнения на рис. 6в показана зависимость среднегодовых индексов Dst от числа солнечных пятен. С другими индексами магнитной активности (Kp и AE) связь еще слабее.

Излучение ИАР зависит от состояния ионосферы более сложным образом, чем, например, критическая частота f_0F2 радиозондирования ионосферы. f_0F2 жестко связана с электронной концентрацией N_e в области F2 и не зависит от других ионосферных параметров. Наоборот, для частотного масштаба ИАР электронная концентрация является лишь основным определяющим параметром, но на величину Δf влияет также характер высотных профилей N_e , ионного состава и напряженности геомагнитного поля, поскольку все эти параметры определяют условия распространения альвеновских волн вдоль оси резонатора. Это открывает возможности наземной диагностики высотного профиля относительной концентрации ионов по измерениям частотной структуры излучения ИАР.