

УДК 550.385.37+550.383

ДИНАМИКА ИОНОСФЕРНЫХ АЛЬВЕНОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ (ИАР) С КОНЦА 21 ПО 24 ЦИКЛ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2019 г. Б. В. Довбня¹, *, Б. И. Клайн¹, **, Н. А. Куражковская¹, ***

¹Геофизическая обсерватория Борок филиал института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
п. Борок Ярославская обл., Россия

*e-mail: dovbnya@inbox.ru

**e-mail: klain@borok.yar.ru

***e-mail: knady@borok.yar.ru

Поступила в редакцию 05.02.2018 г.

После доработки 20.02.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

Представлены результаты исследования динамики ионосферных альвеновских резонансов (ИАР) в диапазоне частот (0–10) Гц по данным наблюдений магнитного поля на среднелинейной обс. Борок ($L = 2.8$) с конца 21 по 24 цикл солнечной активности. Показано, что в 30% случаев ИАР сопровождаются одновременным наблюдением структурированных геомагнитных пульсаций $Pc1$ (“жемчужины”) и в 70% случаев ИАР регистрируются без возбуждения $Pc1$. Характерной особенностью жемчужин является то, что они наблюдаются преимущественно на частоте первой резонансной полосы ИАР. Обнаружено качественное совпадение динамики частот ИАР и волновых пакетов $Pc1$ в 80% случаев. Максимум вероятности наблюдения ИАР приходится на предполуденные часы (2000–2200) MLT. Сезонная вариация ИАР характеризуется наличием двух равноденственных максимумов. Показано, что 11-летняя вариация излучения ИАР контролируется динамикой некоторых параметров солнечного ветра и ММП. Вероятность наблюдения ИАР максимальна (в годы минимума солнечной активности), когда соотношение плотности протонов к плотности ионов гелия (α -частиц) – Np/Na (заметим, что в солнечном ветре обычно принято использовать обратную величину, т.е. Na/Np) и параметр β (характеризующий отношение теплового давления к магнитному давлению) достигают максимальных значений, а динамическое давление солнечного ветра – P_{dyn} (контролирующее сжатие магнитосферы) понижено. Совпадение динамики частот первой резонансной полосы ИАР и жемчужин, а также их сезонной и циклической вариации может свидетельствовать о взаимосвязи этих колебательных процессов и возможном общем механизме их генерации.

DOI: 10.1134/S0016794019010061

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы большой интерес вызывает исследование так называемых ионосферных Альвеновских резонансов (ИАР), например, [Довбня и др., 2013; Бару и др., 2014; Dudkin et al., 2014; Surkov and Hayakawa, 2014; Полюшкина и др., 2015; Потапов и др., 2016]. Впервые возможность существования в ионосфере резонатора для альвеновских волн, получившего название ионосферного Альвеновского резонатора, теоретически была показана в работе [Поляков и Рапопорт, 1981]. Экспериментальным подтверждением существования ионосферного альвеновского резонатора было обнаружение резонансных структур в спектре естественного электромагнитного шума [Беляев и др., 1987]. Позднее появилось множество отечественных и зарубежных публикаций, посвященных экспериментальному и теоретическому исследованию ИАР [Беляев и др., 1989а, 1989б; Bely-

aev et al., 1999, 2000; Bosinger et al., 2002; Бару и др., 2013; Surkov and Hayakawa, 2014; Полюшкина и др., 2015]. Кроме того, предпринимались попытки исследования ИАР по спутниковым наблюдениям [Dudkin et al., 2014]. В этих и ряде других работ подробно описаны морфологические особенности ИАР.

Типичные ИАР на динамических спектрах имеют вид дискретных спектральных структур в диапазоне частот 0–10 Гц. Их основными характеристиками являются вероятность наблюдения и частота спектральных полос. По обыкновению ИАР появляются при спокойной или умеренной геомагнитной активности [Yahnin et al., 2003]. Известно, что ИАР наблюдаются в широком диапазоне геомагнитных широт, например: низких [Bosinger et al., 2002], средних [Полюшкина и др., 2015] и высоких [Belyaev et al., 1999]. Максимум вероятности наблюдения ИАР приходится на ло-

кальную полночь [Бару и др., 2013]. Относительно сезонной вариации ИАР в литературе существует противоречивая информация. Так, для сезонной вариации частоты спектральных полос и продолжительности их наблюдений характерен максимум в зимнее солнцестояние [Yahnin et al., 2003; Бару и др., 2013; Полюшкина и др., 2015]. Согласно [Бару и др., 2013] также велика вероятность регистрации ИАР в зимний сезон. Однако в работе [Полюшкина и др., 2015] не обнаружено зависимости вероятности наблюдения ИАР от сезона. Анализ статистики ИАР показал, что они преимущественно регистрируются в годы минимума солнечной активности [Belyaev et al., 2000; Бару и др., 2014].

Многими исследователями отмечается, что закономерности ИАР тесно связаны с локальным состоянием ионосферы. Так, в работе [Полюшкина и др., 2015] обнаружена корреляция суточных и сезонных вариаций частоты резонансных полос с изменениями критической частоты f_0F_2 ионосферы. В работе [Бару и др., 2014] показано, что между вариацией ИАР в цикле солнечной активности и поведением критической частоты ионосферного слоя F_2 существует обратная зависимость.

В литературе обсуждается несколько альтернативных механизмов возбуждения резонансных спектральных структур, вследствие которых они появляются, например, грозовая активность в экваториальных областях [Беляев и др., 1989a], плазменные неустойчивости (feedback instability) [Lysak, 1991; Pokhotelov et al., 2001], ионосферные нейтральные ветра [Surkov et al., 2004] и другие. Этот факт свидетельствует о том, что вопрос об источнике ИАР до конца не решен, и стимулирует дальнейшие исследования этого явления.

Следует заметить, что во всех исследованиях рассматривается отклик характеристик ИАР, в основном, на локальные ионосферные параметры. Вместе с тем влияние глобальных процессов на закономерности возбуждения ИАР в литературе практически не обсуждается. Исключение составляет работа [Гульельми и Потапов, 2017], в которой исследовалось влияние межпланетного магнитного поля на суточную активность ИАР. Принято считать, что ИАР – сугубо ионосферное явление. Однако ранее в работах [Dovbnya et al., 2012; Довбня и др., 2014] отмечалось, что эмиссии, имеющие резонансную структуру спектра ионосферного Альвеновского резонатора, в некоторых случаях могут сопровождаться серией структурированных геомагнитных пульсаций $Pc1$, называемых “жемчужинами” (string-of-pearls). Каждая серия $Pc1$ состоит из последовательности волновых пакетов в диапазоне частот 0.2–5.0 Гц, повторяющихся с определенной периодичностью. На магнитограммах четко видна характерная модуляция

амплитуды жемчужин, а их динамические спектры имеют специфическую структуру [Гульельми и Троицкая, 1973]. Как известно, геомагнитные пульсации $Pc1$ относятся к внутримангнитосферным процессам и их возбуждение во многом определяется взаимодействием солнечного ветра с магнитосферой Земли. В связи с вышесказанным представляет интерес исследование влияния параметров межпланетной среды на процессы возбуждения ИАР, генерация которых может быть взаимосвязана с возбуждением геомагнитных пульсаций $Pc1$.

В настоящей работе исследованы закономерности суточной, сезонной и циклической вариации вероятности наблюдения излучений ИАР с конца 21 по 24 цикл солнечной активности и предпринята попытка поиска параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), управляющих динамикой среднеширотных ИАР.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходного материала в работе использованы данные регистрации магнитного поля на среднеширотной Геофизической обс. Борок ИФЗ РАН (исправленные геомагнитные координаты $\Phi = 53.6^\circ$; $\Lambda = 114.4^\circ$, $L = 2.8$) за два периода наблюдений: первый с 1984–1993 гг. и второй с 1997–2016 гг. Анализ первого периода наблюдений проводился по записям ультранизкочастотных (УНЧ) излучений на аналоговый магнитофон с индукционного магнитометра (данные архива ГО Борок ИФЗ РАН). Предварительно аналоговые записи представлялись в цифровом виде, затем проводился их спектрально-временной анализ, в результате которого получали динамические спектры УНЧ-пульсаций. Материалы второго периода наблюдений взяты из базы данных информационного измерительного комплекса ГО Борок ИФЗ РАН (geodata.borok.ru). В этой базе в открытом доступе (сайт: www.brk.adm.yar.ru) до 2017 г. были представлены динамические спектры УНЧ-пульсаций, полученные по непрерывной цифровой регистрации геомагнитного поля, которые позволяли идентифицировать наблюдаемые ИАР.

Визуально анализируя динамические спектры УНЧ-излучений, мы сформировали выборку случаев наблюдения среднеширотных ИАР для их дальнейшего исследования. За первый интервал (1984–1993 гг.) было отобрано 1314 дней наблюдения ИАР, за второй период (1997–2016 гг.) – 1470 дней. Таким образом, всего было проанализировано 2784 дня, во время которых идентифицировались резонансные спектральные структуры.

Дополнительно была составлена выборка случаев наблюдений жемчужин. Для этого анализи-

ровались динамические спектры УНЧ-пульсаций за те же интервалы наблюдений, что и ИАР. Кроме того, использовались магнитограммы с высокой чувствительностью 0.01 нТл/мм и разверткой 30 мм/мин (данные архива геофизической обсерватории Борок ИФЗ РАН). Всего за период 1984–2016 гг. было отобрано 1800 дней регистрации жемчужин.

Для анализа межпланетных условий использованы 27-дневные средние значения чисел Вольфа, параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП), представленные в базе данных OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>). По этим данным мы получили среднегодовые значения чисел Вольфа, основных межпланетных параметров для двух анализируемых интервалов (1984–1993 гг. и 1997–2016 гг.). Поскольку в динамических спектрах имели место пропуски с 1994 по 1996 г., на некоторых этапах исследования мы рассматривали отдельно динамику ИАР в 21–22 циклах (1984–1993 гг.) и в 23–24 циклах (1997–2016 гг.) солнечной активности.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Морфологические особенности анализируемых излучений ИАР

В результате анализа динамических спектров УНЧ-пульсаций было обнаружено, что излучения ИАР в 30% случаев наблюдались синхронно с возбуждением структурированных геомагнитных пульсаций $Pc1$, называемых “жемчужинами”. Здесь заметим, что в диапазоне частот $Pc1$ выделяются два типа пульсаций – структурированные и неструктурированные, каждый из которых обладает специфическими закономерностями [Kerttula et al., 2001; Пархомов и др., 2013]. В 70% случаев ИАР наблюдались без сопровождения жемчужин. Далее для краткости мы будем использовать аббревиатуру “ $Pc1$ ”, имея в виду, именно жемчужины – структурированные пульсации $Pc1$.

Исходные данные мы условно разбили на две группы: 1) ИАР (1951 день наблюдений); 2) ИАР, сопровождаемые жемчужинами (833 дня наблюдений). На рисунке 1 приведены типичные примеры динамических спектров ИАР (а) и ИАР, сопровождаемых возбуждением $Pc1$ (б, в) по данным обс. Борок. В нижней части рис. 1б, в даны в развернутом виде наблюдаемые волновые пакеты жемчужин. Видно, что частота дискретных спектральных полос начинает постепенно возрастать в послеполуденное или вечернее время, достигая максимума вблизи полуночи, и затем плавно уменьшается к послеполуночному и утренним часам (рис. 1а). Подобное поведение частоты полос излучения ИАР в течение суток отмечалось многими авторами, например, [Довбня и др., 2013;

Бару и др., 2013; Полюшкина и др., 2015]. Аналогичным образом ведет себя частота полос ионосферных альвеновских резонансов, которые сопровождаются возбуждением пульсаций $Pc1$ (рис. 1б, в). Но в отличие от событий первой группы на спектральных полосах ИАР могут быть видны последовательности отдельных волновых пакетов жемчужин. Жемчужины могут появляться иногда на частоте второй, третьей и других спектральных полос (рис. 1б), но в доминирующем числе случаев на частоте первой спектральной полосы (рис. 1в). Причем частота этих пакетов изменяется синхронно с динамикой частоты первой гармоники ИАР (рис. 1в). Такая тенденция постепенного нарастания частоты первой спектральной полосы ИАР и частоты жемчужин отмечается примерно в 80% из 833 проанализированных случаев.

На рисунке 2 представлены распределения продолжительности ИАР (t) двух групп, полученные по данным наблюдений за период (1984–1993 гг.). Динамические спектры УНЧ-пульсаций за этот промежуток времени имели относительно высокое разрешение по сравнению с интервалом (1997–2016 гг.) и позволяли лучше идентифицировать временные промежутки, в течение которых наблюдались спектральные полосы. Видно, что форма полученных распределений существенно различается. Так, длительность ИАР первой группы изменяется в диапазоне 2–16 ч при среднем и медианном значении 9 ч (рис. 2а). Излучения ИАР, сопровождаемые жемчужинами, могут продолжаться от 2 до 25 и более часов (рис. 2б). Среднее и медианное значение продолжительности излучений ИАР второй группы составляет 16 ч. Видно, что распределение продолжительности спектральных полос, относящихся ко второй группе, имеет длинный хвост в отличие от распределения t первой группы. В доминирующем числе случаев продолжительность излучений первой и второй группы ИАР составляет $t \sim 6–8$ ч и $t \sim 14–18$ ч, соответственно. Таким образом, продолжительность наблюдений ИАР, сопровождаемых возбуждением жемчужин, существенно больше, чем ИАР без жемчужин.

3.2. Суточная вариация числа случаев наблюдений ИАР двух групп

Суточная вариация вероятности наблюдения ИАР двух групп была построена по данным наблюдений за период (1984–1993 гг.), исходя из тех же соображений, что упомянуты в разделе 3.1. Поскольку резонансные спектральные полосы наблюдались непрерывно в течение длительных промежутков времени, для построения зависимости вероятности наблюдения ИАР от локального времени, мы в каждой группе ИАР время их регистрации разбивали на часовые интервалы. Для удобства сопоставления суточных вариаций излу-

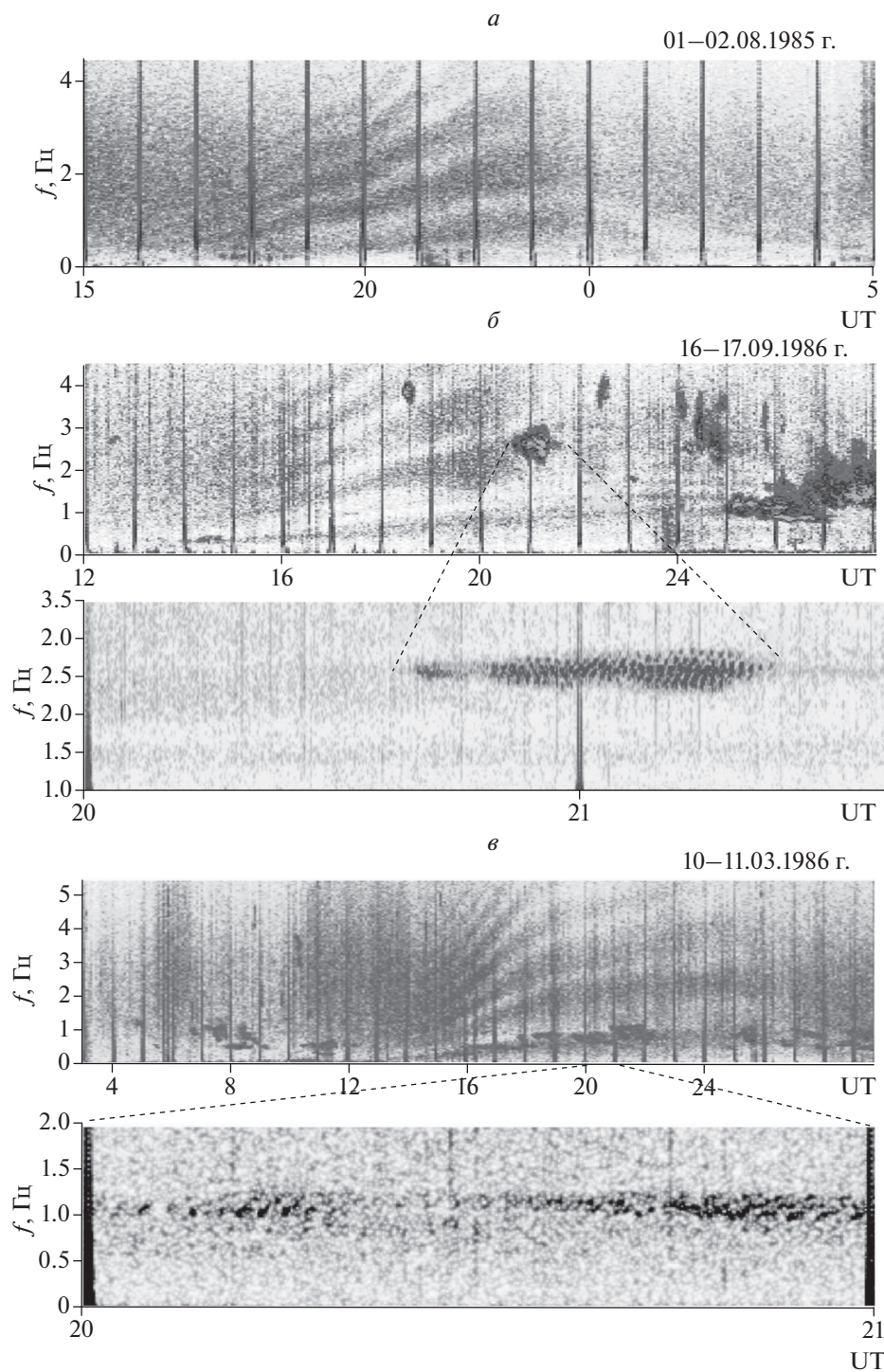


Рис. 1. Типичные примеры наблюдения ИАР 1–2 августа 1985 г. (а) и ИАР, сопровождаемых жемчужинами 16–17 сентября 1986 г. (б) и 10–11 марта 1986 г. (в) на среднеширотной обсерватории Борок. В нижней части рисунков (б) и (в) представлены в развернутом виде жемчужины.

чений ИАР двух групп число случаев в каждом часовом интервале нормировалось на их максимальное число. На рисунке 3 показана суточная вариация нормированного числа случаев (N/N_{\max}) наблюдения излучения ИАР (а) и ИАР, сопро-

вождаемых жемчужинами (б). Видно, что максимум вероятности наблюдения ИАР, относящихся как к первой, так и второй группе, приходится на предполуночные часы (20:00–22:00) MLT. Однако форма полученных распределений имеет не-

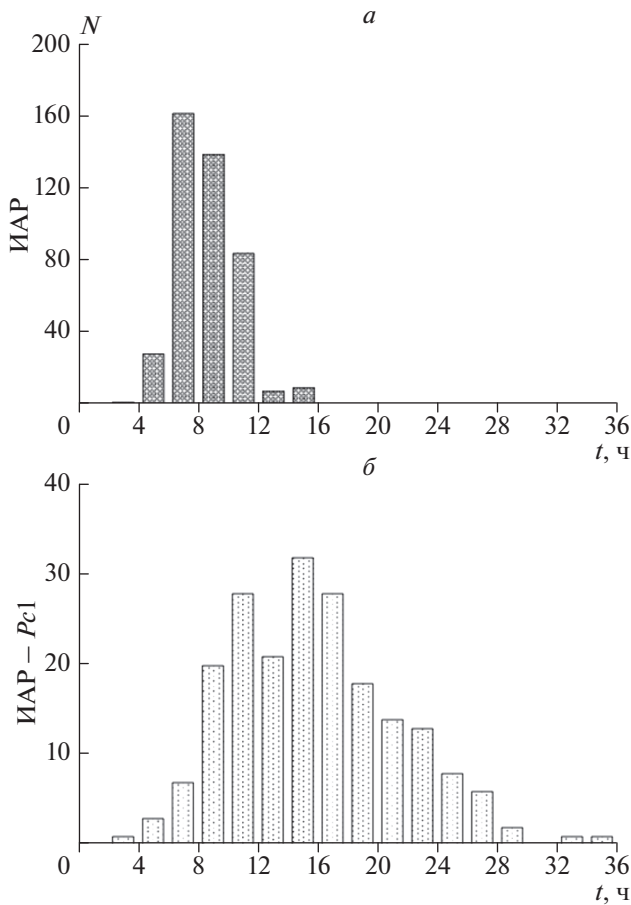


Рис. 2 Гистограммы распределений длительности (t) излучений ИАР (a) и ИАР, сопровождаемых возбуждением пульсаций $Pc1$ (b).

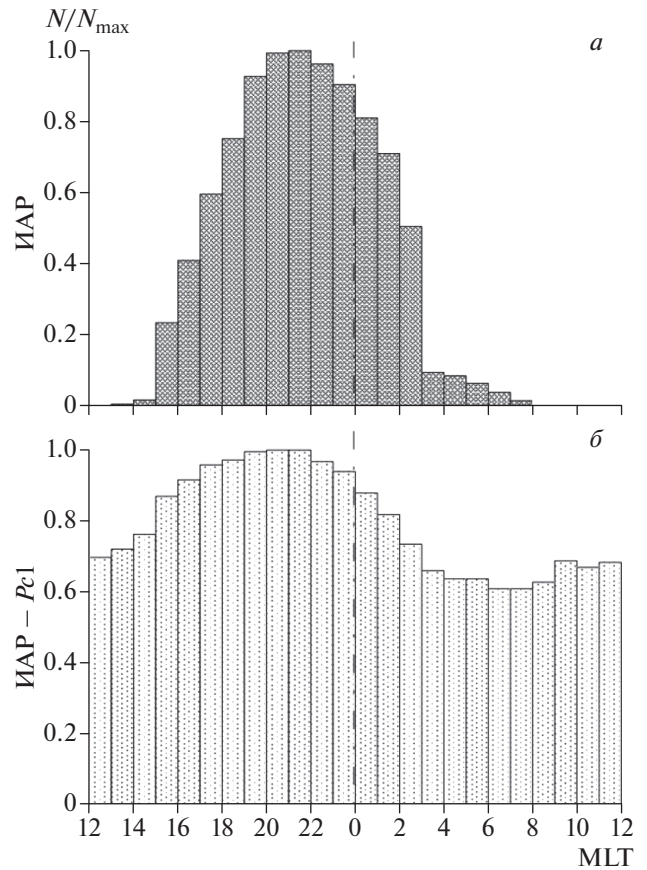


Рис. 3 Суточные вариации нормированного числа случаев (N/N_{max}) ИАР (a) и ИАР, сопровождаемых возбуждением пульсаций $Pc1$ (b).

которые различия. Так, в суточном ходе излучения ИАР спектральные полосы вблизи полуденного меридиана отсутствуют, тогда как в суточной вариации ИАР, сопровождаемой жемчужинами, спектральные полосы наблюдаются в течение всех суток. Кроме того, в суточном распределении ИАР второй группы виден небольшой максимум вероятности наблюдения вблизи полудня (рис. 3б).

3.3. Сезонная вариация числа случаев наблюдений ИАР двух групп

При построении сезонной вариации излучений ИАР их основной характеристикой служило количество дней наблюдений (N) в каждом месяце. На рисунке 4 представлена сезонная вариация числа случаев ИАР (a) и ИАР, сопровождаемых возбуждением пульсаций $Pc1$ (b). Видно, что сезонные вариации излучений ИАР двух групп имеют подобный вид. Максимум вероятности наблюдений ИАР двух групп приходится на сезон весеннего (март) и осеннего (сентябрь) равноденствий. Здесь необходимо отметить, что полу-

ченная нами сезонная вариация вероятности наблюдения ИАР принципиально отличается от сезонной вариации, полученной ранее другими исследователями. Так, в работе [Бару и др., 2013] сделан вывод о том, что резонансные структуры спектра преимущественно наблюдаются зимой. По данным [Полушкина и др., 2015] появление резонансных структур не зависит от сезона.

3.4. Циклическая вариация числа случаев наблюдений ИАР двух групп и ее связь с параметрами межпланетной среды

Столь большой массив данных позволил рассмотреть не только сезонную, но и циклическую динамику появления ИАР практически в течение трех 11-летних циклов солнечной активности (с конца 21 по 24 цикл) и сопоставить ее с вариацией параметров солнечного ветра и ММП. Такой длительный ряд регистрации ИАР (около 30 лет наблюдений) исследуется впервые. Заметим, что в предыдущих исследованиях [Belyaev et al., 2000; Бару и др., 2014] проводился анализ ИАР только в

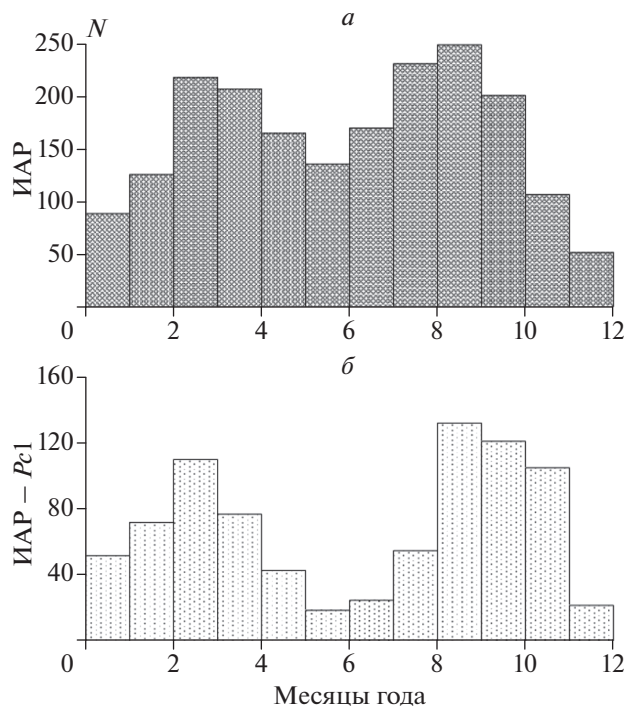


Рис. 4. Сезонные вариации числа случаев (N) ИАР (a) и ИАР, сопровождаемых возбуждением пульсаций $Pc1$ (b).

течение одного цикла солнечной активности (~ 10 – 11 лет).

В качестве основных характеристик межпланетной среды мы анализировали параметры плазмы солнечного ветра и ММП, которые получены в результате комбинации нескольких параметров, таких как плотность, скорость, температура и других. С нашей точки зрения, именно комбинации параметров наилучшим образом характеризуют состояние магнитосферы и процессы, происходящие в ней. В качестве таких параметров мы рассмотрели отношение плотности протонов к плотности ионов гелия (α -частиц) Np/Na , динамическое давление солнечного ветра $P_{dyn} = \rho V^2$ (ρ – плотность плазмы, V – скорость) и параметр β , характеризующий отношение теплового давления к магнитному $\beta = NpkT/(B^2/8\pi)$, где Np – плотность протонов, T – температура протонов, B – величина магнитного поля. В базе данных OMNI представлено соотношение плотности α -частиц к плотности протонов Na/Np . Для удобства сопоставлений мы использовали параметр Np/Na , равный $1/(Na/Np)$.

На рисунке 5 приведены: (a) среднегодовые значения чисел Вольфа, годовое число случаев ИАР (N) первой (b) и второй ($в$) группы, среднегодовые значения соотношения Np/Na ($г$), динамического давления солнечного ветра P_{dyn} ($д$) и параметра β ($е$) для двух интервалов наблюдений с

1984 по 1993 годы и с 1997 по 2016 г. Из рис. 5б видно, что наибольшая вероятность наблюдения ИАР первой группы в обоих временных интервалах приходится на годы минимума солнечной активности (1985–1987 и 2008–2009 гг., соответственно). В годы максимума солнечной активности (22–24 циклы) вероятность наблюдения ИАР значительно ниже, т.е. существует явная обратная зависимость между частотой наблюдения ИАР и солнечной активностью. Обнаруженная закономерность поведения ИАР в цикле солнечной активности согласуется с вариацией ИАР, полученной по данным среднеширотных [Belyaev et al., 2000] и высокоширотных наблюдений ИАР [Бару и др., 2014]. Следует заметить, что форма распределений ИАР в первом и втором интервале наблюдений существенно различается. Так, в интервале (1984–1993 гг.) наблюдается резкое нарастание числа случаев ИАР и затем последующее их резкое спадение. Иными словами распределение ИАР имеет остроконечную форму. В интервале (1997–2016 гг.) для формы распределения ИАР характерно плавное нарастание числа случаев до достижения максимума и затем постепенное их уменьшение. Присутствие различных форм распределений числа ИАР на разных временных интервалах может свидетельствовать не только об их 11-летней цикличности, но и о 22-летней цикличности.

Циклическая вариация ИАР, относящихся ко второй группе (сопровождаясь появлением жемчужин), в интервале (1984–1993 гг.) подобна вариации ИАР первой группы (рис. 5в). Максимум их частоты появления также отмечается в годы минимальной солнечной активности. В другом временном интервале (1997–2016 гг.) динамика ИАР двух групп принципиально отличается. Так, максимум частоты наблюдения ИАР, сопровождаемых появлением пульсаций $Pc1$, приходится на фазу спада 23 цикла солнечной активности (рис. 5в), а не на его минимум. Обратим внимание, что отклонение от закономерности (наибольшая и наименьшая вероятность наблюдения ИАР наблюдается в минимум и максимум солнечной активности, соответственно) возникает только в случае, когда ИАР сопровождаются наблюдением жемчужин. Согласно работе [Матвеева, 1987] известная обратная зависимость активности пульсаций $Pc1$ от числа солнечных пятен нарушается в нечетных циклах солнечной активности. Например, для нечетного 19 солнечного цикла характерен максимум активности $Pc1$ на фазе его спада [Матвеева, 1987]. По-видимому, и особенность динамики ИАР, сопровождаемых жемчужинами, может быть связана с особенностями четных и нечетных циклов, также как и вариация пульсаций $Pc1$ в цикле солнечной активности.

Сопоставление динамики числа случаев наблюдения ИАР первой группы с вариацией пара-

метра Np/Na показало, что максимум ИАР совпадает с максимальной величиной отношения плотности протонов к плотности ионов гелия в солнечном ветре, как в 21, так и в 23 цикле солнечной активности. Уменьшение параметра Np/Na солнечного ветра приводит к уменьшению, а его рост к увеличению вероятности наблюдения ИАР (рис. 5з). При величине $Np/Na \sim 10-20$ вероятность наблюдения ИАР значительно меньше, чем при $Np/Na \sim 50-60$. Это в свою очередь означает, что максимум плотности протонов по сравнению с плотностью ионов гелия в годы минимума солнечной активности является значимым фактором в возбуждении ИАР. Другим фактором, оказывающим влияние на появление резонансных полос спектра, может быть динамическое давление солнечного ветра. Между динамикой излучения ИАР и вариациями P_{dyn} в цикле солнечной активности отмечается противофазное поведение. Максимум частоты наблюдения излучения ИАР отмечается при пониженном динамическом давлении солнечного ветра (рис. 5д). Поскольку от динамического давления зависит степень сжатия магнитосферы солнечным ветром, то можно отметить, что вероятность наблюдения излучения ИАР максимальна, когда магнитосфера не сжата. Кроме того, вероятность наблюдения ИАР велика, когда параметр β достигает максимальных значений (рис. 5е), т.е. тепловое давление плазмы существенно (в 4–5 раз) доминирует над магнитным давлением.

Динамика ИАР, сопровождаемых возбуждением пульсаций $Pc1$, в 21 цикле совпадает с вариацией соотношения Np/Na и параметра β , но противофазна с вариацией P_{dyn} аналогично событиям первой группы (рис. 5в–е). Однако в 23 цикле соответствие между вероятностью наблюдения ИАР второй группы и параметрами Np/Na , P_{dyn} и β нарушается. Максимум вероятности появления ИАР приходится на фазу роста соотношения Np/Na и уменьшения P_{dyn} в цикле солнечной активности, а не на их максимум и минимум, соответственно. Аналогичные закономерности обнаруживаются при сопоставлении излучений ИАР, относящихся ко второй группе, с поведением параметра β в течение интервала (1997–2016 гг.). Максимум числа случаев ИАР, сопровождаемых жемчужинами, не совпадает с пиком параметра β . Таким образом, ИАР, синхронно наблюдаемые с жемчужинами, имеют некоторые особенности в 23 цикле солнечной активности.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного исследования выделены две группы излучений ИАР, одна из которых имеет тесную связь с возбуждением жемчужин. Обнаружено, что некоторые особенности пульсаций $Pc1$ проявляются в поведении ИАР.

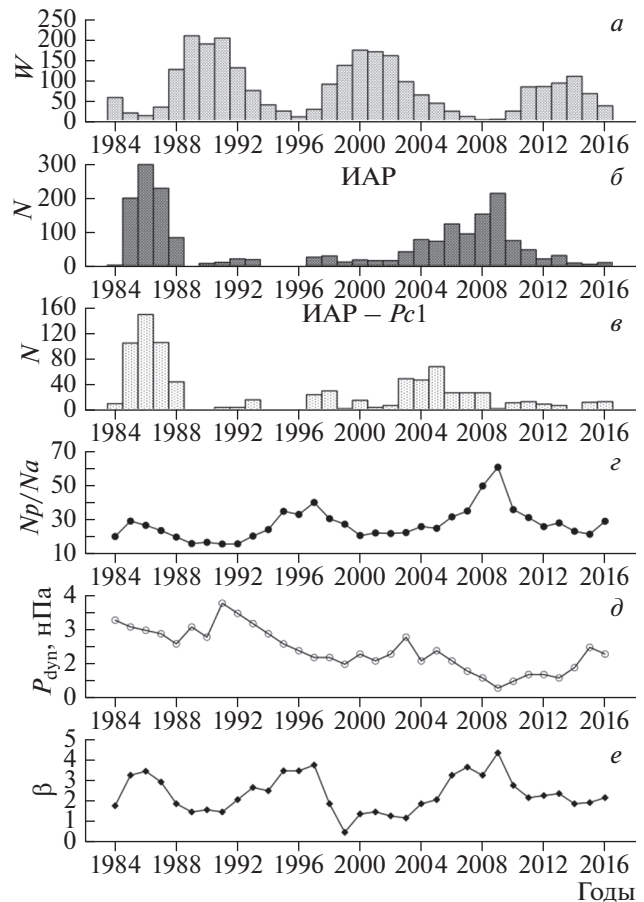


Рис. 5. Циклические вариации (а) солнечной активности (числа Вольфа, W), числа случаев наблюдения ИАР (N) первой (б) и второй (в) группы, (г) соотношения числа протонов к ионам гелия (Np/Na), (д) динамического давления солнечного ветра (P_{dyn}), (е) параметра β в конце 21–24 циклах солнечной активности.

Это находит отражение в динамике частоты резонансных полос, в распределении длительности наблюдений ИАР, в их суточной, сезонной и циклической вариации. Например, продолжительность наблюдений ИАР, сопровождаемых возбуждением жемчужин, значительно больше, чем длительность ИАР без жемчужин (рис. 2). С нашей точки зрения, большие временные интервалы наблюдений ИАР, относящихся ко второй группе, обусловлены процессами, сопровождающими генерацию жемчужин.

Полученные нами закономерности суточной и циклической вариации вероятности наблюдения ИАР во многом качественно совпадают с результатами других авторов. Вместе с тем зависимость вероятности наблюдения ИАР двух групп от сезона (рис. 4) принципиально отличается от сезонной вариации других авторов, например, [Бару и др., 2013; Полюшкина и др., 2015]. Расхождения в выводах о сезонной вариации ИАР могут быть

связаны с тем, что зависимости вероятности наблюдений как среднеширотных, так и высокоширотных ИАР от сезона в работах [Бару и др., 2013; Полюшкина и др., 2015] построены на основе либо эпизодических данных, либо ограниченного числа данных наблюдений. Сезонная вариация числа случаев наблюдений (ИАР и ИАР, сопровождаемых возбуждением жемчужин), получена нами на гораздо большем статистическом материале (около 3000 дней наблюдений ИАР), чем в других исследованиях. Это позволяет нам утверждать, что вероятность наблюдения ИАР имеет сезонный ход с максимумом в сезон равноденствий (рис. 4), а не в зимний период. Характерно, что форма зависимости наблюдения числа случаев ИАР двух групп от сезона совпадает с полугодовой вариацией геомагнитной активности, которая имеет максимумы в равноденственные периоды [Данилов и др., 2013]. В связи с этим можно предположить, что сезонная вариация ИАР обусловлена не влиянием локального состояния ионосферы на вероятность наблюдения ИАР, как это отмечается в работе [Бару и др., 2013], а другими факторами. К таким факторам можно отнести влияние угла наклона геомагнитного диполя Земли к линии Солнце–Земля, изменение гелиошироты Земли, либо процессы в хвосте магнитосферы [Данилов и др., 2013]. Здесь необходимо отметить, что для сезонного распределения частоты появления пульсаций $Pc1$ также характерен максимум во время равноденствий [Пудовкин и др., 1976]. Совпадение сезонной вариации ИАР и пульсаций $Pc1$ может косвенно свидетельствовать о связи этих УНЧ-пульсаций.

Во многих публикациях подчеркивается, что локальные ионосферные условия являются решающим фактором в формировании резонансных структур спектра и определяют их свойства. Результаты нашего исследования и работы [Гульельми и Потапов, 2017] показали, что на активность появления излучения ИАР влияет также состояние межпланетной среды. Как упоминалось выше, наибольшая вероятность регистрации ИАР двух групп приходится на годы пониженных значений динамического давления солнечного ветра (рис. 5д). Понижение динамического давления, как известно, приводит к удалению плазмплаузы и радиационных поясов от Земли. Именно эти области магнитосферы определяют генерацию ионно-циклотронных волн. Кроме того, существует достаточно хорошая корреляция вариации наблюдений ИАР с соотношением плотности протонов к плотности ионов гелия (Np/Na) и параметром β в цикле солнечной активности (рис. 5г, е). Чем больше плотность протонов солнечного ветра доминирует над плотностью ионов гелия, тем больше вероятность возбуждения ИАР. В годы, когда солнечная активность максимальна, плотность протонов в меньшей степени

преобладает над плотностью α -частиц и статистика ИАР существенно уменьшается. Ранее на подобную зависимость циклической вариации активности геомагнитных пульсаций $Pc1$ от величины Np/Na было обращено внимание в работе [Матвеева и Щепетнов, 2006]. Таким образом, поступление протонов солнечного ветра контролирует циклическую вариацию как излучения ИАР, так и жемчужин, для которых также характерна обратная зависимость активности от чисел Вольфа [Матвеева и др., 1972]. Сезонный ход вероятности наблюдения ИАР двух групп с равноденственными максимумами, а также корреляция вариации наблюдений ИАР с соотношением плотности протонов к плотности ионов гелия (Np/Na) в цикле солнечной активности не позволяют сделать однозначный вывод о том, что резонансные структуры определяются только свойствами ионосферной плазмы.

Ранее в работе [Trakhtengerts et al., 2000] обратная связь вероятности наблюдения ИАР и пульсаций $Pc1$ с солнечной активностью интерпретировалась на основе роли ионосферного альвеновского резонатора в формировании обоих режимов электромагнитных колебаний. Однако еще в работе [Dovbnya et al., 2012] и в данном исследовании обнаружена особенность поведения ИАР и $Pc1$, заключающаяся в том, что динамика изменения характерной частоты, на которой наблюдаются жемчужины, в подавляющем числе случаев совпадает с динамикой первой гармоники излучения ИАР. Согласно работе [Поляков и Рапопорт, 1981], частота основной моды ИАР пропорциональна электронной концентрации (N_e), индикатором которой является критическая частота ионосферного слоя F_2 . Этот вывод находит подтверждение в ряде работ, например, [Бару и др., 2014; Полюшкина и др., 2015]. С другой стороны, $Pc1$ возникают во внешнем радиационном поясе Земли вследствие развития ионно-циклотронной неустойчивости и распространяются в магнитосфере вдоль геомагнитных силовых линий [Гульельми и Троицкая, 1973]. Частота пульсаций $Pc1$ близка к гирочастоте протонов в экваториальной плоскости магнитосферы. Поскольку $Pc1$ связывают с циклотронной неустойчивостью, то несущая частота, на которой происходит генерация жемчужин, пропорциональна магнитному полю в экваториальной окрестности магнитосферы. В связи с этим формирование частотного состава жемчужин в значительной степени контролируется динамикой магнитосферы, а не ионосферы. Поскольку динамика частоты спектральных полос тесно связана с динамикой частоты $Pc1$, то можно предположить, что и генерация ИАР также может быть связана с протонами радиационных поясов.

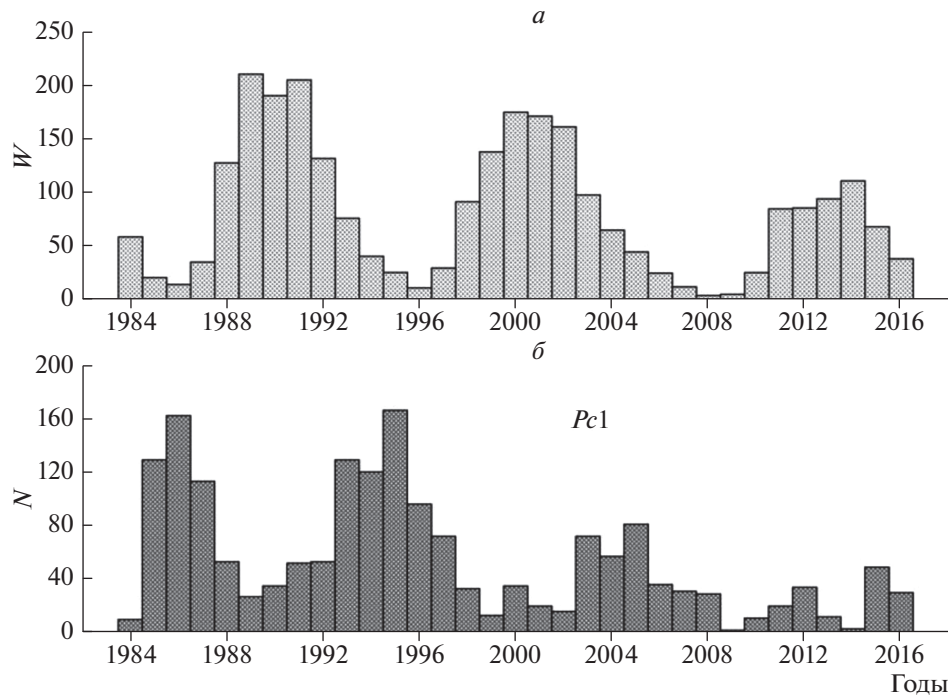


Рис. 6. Циклическая вариация (а) чисел Вольфа (W) и (б) числа случаев наблюдения жемчужин (N) на среднеширотной обсерватории Борок.

Главным фактором, влияющим на процесс возбуждения и распространения пульсаций $Pc1$, является плотность протонов солнечного ветра [Матвеева и др., 1972; Матвеева и Щепетнов, 2006]. Связь возбуждения пульсаций $Pc1$ с высыпаниями протонов экспериментально показана во многих работах, например [Yahnina et al., 2000]. Нами обнаружено, что в 30% случаев эмиссии с резонансной структурой спектра и серии жемчужин наблюдаются синхронно. При этом жемчужины регистрируются на частоте первой гармоники ИАР. Более того, в 80% случаев поведение частот ИАР и $Pc1$ совпадает. Этот экспериментальный факт свидетельствует о том, что связь этих двух явлений не случайна. Здесь необходимо отметить работу [Fedorov et al., 2016], в которой разработана теоретическая модель взаимодействия магнитосферных альвеновских волн с ионосферой. Согласно численному моделированию [Fedorov et al., 2016], в ночное время коэффициент пропускания ионосферы имеет максимум на фундаментальной частоте ИАР и первых гармоник, что может быть позволит понять обнаруженную нами тесную связь динамики частот ИАР и $Pc1$.

Поскольку теоретически обоснована и экспериментально показана роль протонов солнечного ветра в генерации пульсаций $Pc1$, и частота первой резонансной полосы ИАР совпадает с частотой $Pc1$, то, видимо, влияние протонов солнечного ветра на генерацию ИАР нельзя исключить.

Другим указанием на возможную роль протонов в возбуждении ИАР является следующее. В ходе проведения исследования нами было установлено, что в доминирующем числе случаев (75%) жемчужины наблюдаются совместно с ИАР и только 25% жемчужин регистрируются на земной поверхности без ИАР. Сопоставление циклических вариаций ИАР второй группы и жемчужин выявило следующие закономерности. Так, максимум вероятности появления ИАР, сопровождаемых жемчужинами, наблюдается в 2005 г. (рис. 5в). На рис. 6 представлена циклическая вариация солнечной активности (среднегодовые значения чисел Вольфа — W) и динамика числа случаев (N) жемчужин (неструктурированные пульсации $Pc1$ были вне нашего рассмотрения), полученная с использованием динамических спектров УНЧ-пульсаций и аналоговых записей регистрации магнитного поля за период 1984–2016 гг. Видно, что в 23 цикле солнечной активности максимум вероятности жемчужин приходится на фазу спада солнечной активности, а именно 2005 г. (рис. 6б). Таким образом, динамика ИАР, сопровождаемых жемчужинами, и вариация серий жемчужин в 23 цикле солнечной активности совпадают. В тоже время максимум наблюдения ИАР, не сопровождаемых жемчужинами, в отличие от событий первой группы, соответствует минимуму (2009 г.) солнечной активности (рис. 5в). Совпадение статистики наблюдений ИАР и жемчужин в 21 и 23 цикле солнеч-

ной активности также косвенно свидетельствует о связи этих колебательных процессов.

В рамках данной работы, несколько не отрицая роли ионосферного альвеновского резонатора в образовании резонансных полос, мы хотели обратить внимание на факт тесной связи ИАР и пульсаций $Pc1$, а также на параметры межпланетной среды, которые могут оказывать влияние на возбуждение этих двух волновых процессов. Даже, если ИАР и $Pc1$ генетически не связаны между собой, их совместное возбуждение определяется динамикой структурных образований магнитосферы, которая в свою очередь контролируется параметрами межпланетной среды. В частности, роль таких параметров может играть соотношение плотности протонов к плотности ионов гелия (Np/Na), динамическое давление солнечного ветра и параметр β . Вместе с тем обнаруженные особенности поведения ИАР и $Pc1$ не позволяют сделать однозначного выбора относительно того, в какой структурной области магнитосферы может происходить генерация излучения ИАР.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования показали, что в 30% случаев ИАР сопровождаются одновременным наблюдением структурированных геомагнитных пульсаций $Pc1$ и в 70% случаев ИАР наблюдаются без возбуждения жемчужин. Характерной особенностью жемчужин является то, что они регистрируются преимущественно на частоте первой резонансной полосы ИАР. Обнаружено качественное совпадение динамики частот ИАР и волновых пакетов $Pc1$ в 80% случаев. Максимум вероятности наблюдения ИАР приходится на предполуденные часы (20:00–22:00) MLT. Сезонная вариация ИАР характеризуется наличием двух равноденственных максимумов. Показано, что 11-летняя вариация излучения ИАР контролируется динамикой некоторых параметров солнечного ветра и ММП. Вероятность наблюдения ИАР максимальна (в годы минимума солнечной активности), когда соотношение плотности протонов к плотности ионов гелия (α -частиц) – Np/Na и параметр β (характеризующий отношение теплового давления к магнитному давлению) достигают максимальных значений, а динамическое давление солнечного ветра – P_{dyn} (контролирующее сжатие магнитосферы) понижено. Обнаружено влияние свойств жемчужин на закономерности поведения ИАР. Совпадение динамики частот первой резонансной полосы ИАР и жемчужин, а также их сезонной и циклической вариации может свидетельствовать о взаимосвязи этих колебательных процессов и возможном общем механизме их генерации.

Работа выполнена по теме “Влияние космических факторов на развитие экстремальных про-

цессов в магнитосфере Земли” Госзадание № 0144-2014-00116.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бару Н.А., Колосков А.В., Рахматулин Р.А. Зависимость характеристик ионосферного альвеновского резонанса от состояния геокосмоса по данным синхронных наблюдений в Антарктике и Евразии // Украинский Антарктический Журнал. № 12. С. 177–185. 2013.
- Бару Н.А., Колосков А.В., Ямпольский Ю.М., Рахматулин Р.А., Пашинин А.Ю. Наблюдаемость ионосферных альвеновских резонансов в Антарктике в полном цикле солнечной активности и “эффект расщепления” // Украинский Антарктический Журнал. № 13. С. 124–132. 2014.
- Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Обнаружение резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций // Докл. АН СССР. Т. 297. С. 840–843. 1987.
- Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Экспериментальные исследования резонансной структуры атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 32. № 6. С. 663–671. 1989а.
- Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю. Теория формирования резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 32. № 7. С. 802–810. 1989б.
- Гутьельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 208 с. 1973.
- Гутьельми А.В., Потапов А.С. Влияние межпланетного магнитного поля на УНЧ-колебания ионосферного резонатора // Космич. исслед. Т. 55. № 4. С. 263–267. 2017.
- Данилов А.А., Крымский Г.Ф., Макаров Г.А. Геомагнитная активность как отражение процессов в магнитосферном хвосте. 1. Источник суточной и полугодовой вариаций геомагнитной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 4. С. 469–475. 2013.
- Довбня Б.В., Гутьельми А.В., Потапов А.С., Клайн Б.И. О существовании надионосферного резонатора Альвена // Солнечно-земная физика. Вып. 22. С. 12–15. 2013.
- Довбня Б.В., Потапов А.С., Гутьельми А.В., Рахматулин Р.А. О воздействии МГД-резонаторов на геомагнитные пульсации // Геофизический журнал Т. 36. № 6. С. 143–152. 2014.
- Матвеева Э.Т., Калишер А.Л., Довбня Б.В. Физические условия в магнитосфере и в межпланетном пространстве при возбуждении геомагнитных пульсаций типа $Pc1$ // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 12. № 6. С. 1125–1127. 1972.
- Матвеева Э.Т. Циклическая вариация активности геомагнитных пульсаций $Pc1$ // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 27. № 3. С. 455–458. 1987.

- Матвеева Э.Т., Щенетнов Р.В. Связь активности ионно-циклотронных волн в магнитосфере Земли с параметрами солнечного ветра // Космич. исслед. Т. 44. С. 569–572. 2006.
- Пархомов В.А., Цзэмэд Б., Дмитриев А.В. О природе источников всплеска неструктурированных пульсаций Pc1 по одновременным наблюдениям на Земле и на геостационарной орбите // Солнечно-земная физика. Вып. 23. С. 75–83. 2013.
- Полюшкина Т.Н., Довбня Б.В., Потапов А.С., Цзэмэд Б., Рахматулин Р.А. Частотная структура спектральных полос ионосферного Альвеновского резонатора и параметры ионосферы // Геофизические исследования. Т. 16. № 2. С. 39–57. 2015.
- Поляков С.В., Рапопорт В.О. Ионосферный альвеновский резонатор // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 21. С. 816–822. 1981.
- Потапов А.С., Полюшкина Т.Н., Ойнац А.В., Пашинин А.Ю., Райта Т., Цзэмэд Б. Первый опыт оценки ионного состава над ионосферой по данным о частотной структуре излучения ИАР // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 13. № 2. С. 192–202. 2016.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Часть II. Короткопериодические колебания геомагнитного поля. Л.: Изд-во ЛГУ, 271 с. 1976.
- Belyaev P.P., Bosinger T., Isaev S.V., Kangas J. First evidence at high latitudes for the ionospheric Alfvén resonator // J. Geophys. Res. – Space. V. 104. № A3. P. 4305–4317. 1999.
- Belyaev P.P., Polyakov S.V., Ermakova E.N., Isaev S.V. Solar cycle variations in the ionospheric Alfvén resonator 1985–1995 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 62. P. 239–248. 2000.
- Bosinger T., Haldoupis C., Belyaev P.P., Yakunin M.N., Semenova N.V., Demekhov A.G., Angelopoulos V. Spectral properties of the ionospheric Alfvén resonator observed at a low-latitude station ($L = 1.3$) // J. Geophys. Res. Space. V. 107. № A10. P. SIA 4-1–SIA 4-9. 2002.
- Dovbnya B.V., Zotov O.D., Klain B.I., Kurazhkovskaya N.A., Potapov A.S., Rakhmatulin R.A. Spectral properties of the Pc1 waves and noise-like pulsations with resonance structure / Book of Abstracts 9th International conference “Problems of Geocosmos”, St. Petersburg, 8–12 October 2012. P. 164. 2012.
- Dudkin D., Pilipenko V., Korepanov V., Klimov S., Holzworth R. Electric field signatures of the IAR and Schumann resonance in the upper ionosphere detected by Chibis-M microsatellite // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 117. P. 81–87. 2014.
- Fedorov E., Mazur N., Pilipenko V., Engebretson M. Interaction of magnetospheric Alfvén waves with the ionosphere in the Pc1 frequency band // J. Geophys. Res. – Space. V. 121. P. 321–337. 2016. doi 10.1002/2015JA021020
- Kerttula R., Mursula K., Pikkarainen T., Kangas J. Storm-time Pc1 activity at high and middle latitudes // J. Geophys. Res. V. 106. № A4. P. 6213–6227. 2001.
- Lysak R.L. Feedback instability of the ionospheric resonance cavity // J. Geophys. Res. V. 96. P. 1553–1568. 1991.
- Pokhotelov O.A., Khrushev V., Parrot M., Senchenkov S., Pavlenko V.P. Ionospheric Alfvén resonator revisited: Feedback instability // J. Geophys. Res. V. 106. P. 813. 2001.
- Surkov V.V., Pokhotelov O.A., Parrot M., Fedorov E.N., Hayakawa M. Excitation of the ionospheric resonance cavity by neutral winds at middle latitudes // Ann. Geophysicae. V. 22. № 8. P. 2877–2889. 2004.
- Surkov V., Hayakawa M. Ionospheric Alfvén Resonator (IAR) / Ultra and extremely low frequency electromagnetic fields. Tokyo. Springer Geophysics. Springer. P. 145–207. doi.org/. 2014. doi 10.1007/978-4-431-54367-1_5
- Trakhtengerts V.Y., Demekhov A.G., Belyaev P.P., Polyakov S.V., Ermakova E.N., Isaev S.V. A mechanism of anticorrelation in the occurrence of ULF electromagnetic noise resonance structure and Pc1 magnetic pulsations through the solar activity cycle // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 62. P. 253–256. 2000.
- Yahnin A.G., Semenova N.V., Ostapenko A.A., Kangas J., Manninen J., Turunen T. Morphology of the spectral resonance structure of the electromagnetic background noise in the range of 0.1–4 Hz at $L = 5.2$ // Ann. Geophysicae. V. 21. № 3. P. 779–786. 2003.
- Yahnina T.A., Yahnin A.G., Kangas J., Manninen J. Proton precipitation related to Pc1 pulsations // Geophys. Res. Lett. V. 27 (21). P. 3575–3578. 2000.