

УДК 550.338.2

ПРОЯВЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ С ПЕРИОДАМИ ПЛАНЕТАРНЫХ ВОЛН В ВАРИАЦИЯХ КРИТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ СЛОЯ F_2 ИОНОСФЕРЫ В АЗИАТСКОМ РЕГИОНЕ

© 2011 г. Г. В. Вергасова¹, Э. С. Казимировский¹, Н. М. Полех¹, Дж. Хионг², Л. Лю²

¹Учреждение РАН Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

²Институт геологии и геофизики, Китайская Академия наук

e-mail: Galina Vergasova vega@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 20.04.2010 г.

После доработки 01.03.2011 г.

Представлены результаты исследования волновой структуры критических частот слоя F_2 ионосферы с периодами планетарных волн для двух азиатских станций — Иркутск и Ухань (Китай). Получены оценки частоты появления, амплитуд и времени жизни колебаний с периодами, характерными для планетарных волн (2–25 сут), и показано, что эти характеристики зависят от сезона и места наблюдения. Отмечается появление общих периодичностей в критических частотах обеих станций, а также планетарного индекса геомагнитной активности A_p .

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение изменчивости ионосферы и причин, ее вызывающих, имеет очевидный научный и практический интерес. Изменчивость ионосферных параметров в первую очередь обусловлена внешними источниками, к которым можно отнести вариации волнового и корпускулярного излучения, солнечного ветра и процессы ионосферно-магнитосферного взаимодействия. Кроме того, большой вклад в изменчивость ионосферы вносят внутренние источники, к которым относятся процессы взаимодействия между атмосферой и ионосферой, и также процессы, происходящие в нижней и средней атмосфере (области мезосфера–нижняя термосфера). Воздействие “снизу” осуществляется через генерацию, распространение и диссипацию внутренних атмосферных волн — планетарных, приливных и акустико-гравитационных. Эти волны вместе с электрическими полями могут влиять на аэрономические процессы в термосфере и электродинамические дрейфы, а в итоге — на распределение электронной концентрации, вызывая изменение параметров ионосферы ото дня ко дню даже в спокойных геомагнитных условиях. В последние десятилетия активно исследуется проблема влияния и активного взаимодействия ионосферных процессов с процессами (прежде всего с динамикой) в нижележащей атмосфере [Kazimirovsky, 2002; Kazimirovsky et al., 2003; Laštovička, 2006 и др.]. Оценки, приведенные Forbes et al., [2000] на основе анализа данных глобальной сети ионосферных станций, показали, что изменчивость максимального значения электрон-

ной концентрации в F -области (NmF_2) в спокойных геомагнитных условиях может составлять в среднем ± 25 –30% для временных интервалов от нескольких часов до 1–2 сут и $\sim \pm 15$ –20% в течение 2–30 дней. При этом отмечено, что вариации потока солнечного излучения вносят гораздо меньший вклад в эту изменчивость.

Известно, что особенности температурного и ветрового режима тропосферы и стратосферы препятствуют непосредственному проникновению планетарных волн (ПВ) на высоты ионосферы. Тем не менее изучению волновых процессов с периодами ПВ 2–30 сут в вариациях ионосферных параметров и характеристиках поглощения радиоволн посвящено большое количество обзоров и оригинальных исследований [Pancheva et al., 1991; Laštovička et al., 1994; Pancheva et al., 2002; Laštovička, 2006; Borries et al., 2007 и др.]. По данным европейских станций в вариациях foF_2 были обнаружены статистически значимые квазипериодические колебания с периодами от 30 часов до 40 суток с четко выраженными максимумами в спектрах, близкими к 6 (4–7), 9 (7–11), 14 (11–16) и 29 (21–35) сут [Apostolov et al., 1998; Laštovička et al., 2003]. Отмечены сезонные особенности проявления волновой структуры в параметрах области F , заключающиеся в том, что максимум волновой активности приходился на летний период, а наибольшие амплитуды колебаний — на сезоны равноденствия [Altadill, 2000]. Амплитуды колебаний могут достигать 1 МГц и более, особенно в годы роста и максимума солнечной активности [Laštovička and Mlch, 1996].

Исследования, проведенные в последние годы, обнаружили, что в вариациях геомагнитных индексов также присутствуют общие колебания с периодами ПВ и, следовательно, проявление волновой структуры в параметрах ионосферы может быть обусловлено геомагнитной активностью [Altadill and Apostolov, 2003; Xiong et al., 2006; Gordienko et al., 2007; Вегасова и др., 2009; Mukhtarov et al., 2010]. Результаты анализа, проведенного [Altadill and Apostolov, 2003], показали, что геомагнитная активность может в большинстве случаев вызывать колебания с периодами 13.5 сут и для ~20–30% случаев быть источником колебаний с периодами 2–3, 5–6, 10 сут. Планетарная активность ветров в мезосфере и нижней термосферы также связана с колебаниями в $foF2$ с периодами 2–3, 5–6, 10 и 16 сут в 20–30% случаев. Кроме того, значительная часть колебаний не связана однозначно с этими источниками. В качестве такого “неизвестного” источника может служить нелинейное взаимодействие различных колебаний или модуляция их амплитуд в различных слоях атмосферы [Pogoreltsev and Sukhanova, 1993; Хантадзе и др., 2003; Khantadze et al., 2009]

Колебания $foF2$ с периодами ПВ присутствуют также в приэкваториальных [Abdu et al., 2006] и в высоких [Lawrence et al., 2001] широтах.

В Китае в последние годы активно развиваются исследования средней и верхней атмосферы. Особое внимание уделяется изучению внутренних атмосферных волн и их динамических эффектов, а также взаимодействию между нижней и верхней атмосферой [Chen and Chen, 2004]. На основе ветровых измерений, ионосферных и геомагнитных данных, полученных в течение 2002–2003 гг., исследовались колебания с периодами ПВ в ионосфере и их связь с динамическими параметрами мезосферы и нижней термосферы и с геомагнитной активностью [Xiong et al., 2006]. Авторы пришли к выводу, что главную роль в генерации квазидвухсуточных колебаний в $foF2$ играют ПВ в ветрах нижней и средней термосферы. В колебаниях с преобладающими периодами 5, 10 и 13.5 сут, по мнению авторов, важную роль играют и геомагнитные вариации с соответствующими периодами. Наибольшая частота появления колебаний $foF2$ с периодами 2 и 5 сут приходится на май, июль и сентябрь. Используя данные, полученные с помощью метеорного радара в obs. Ухань, Jiang et al., [2008] исследовали вертикально/сезонную структуру и вариации периода и амплитуды 6.5 суточной волны в нижней термосфере. Было найдено, что наиболее интенсивные волны наблюдаются в диапазоне высот 84–98 км и, в среднем, зональная составляющая немного меньше меридиональной компоненты. Основные периоды этих волн близки к 6–7 сут в зимние и весенние се-

зоны, а в осенние месяцы они иногда достигают 8 сут.

Не менее актуальным остается вопрос о пространственных характеристиках когерентных вариаций в $foF2$, связанных с проявлением ПВ. По данным исследований, выполненных Altadill and Apostolov [2003], было показано, что колебания с периодами 2–3 и 5–6 сут, проявляются в долготном секторе ~80°, а колебания с периодами 10 и 13.5 сут – в долготном секторе ~100°. По оценкам других авторов вариации, связанные с воздействием метеорологических факторов, когерентны на расстоянии менее 2500 км [Mendillo et al., 2002].

Таким образом, исследование морфологии колебаний ионосферных параметров с периодами планетарных волн в разных регионах, их статистические характеристики, пространственно-временная структура остается важной и актуальной задачей, что определило цель данной работы.

2. МЕТОДИКА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для анализа использовались часовые значения $foF2$, полученные на станциях вертикального зондирования Иркутск (52.5° N, 104° E) и Ухань (30.06° N, 114.5° E) на нарастающей ветви солнечной активности (1978–1979гг). Из имеющихся рядов $foF2$ выбирались 4 значения в сутки, относящиеся к 00, 06, 12 и 18 LT и для полученных рядов проводилась фильтрация суточного хода. В случае отсутствия данных для данного часа, выбирались ближайшие к ним значения. С помощью множественного корреляционного периодограммного анализа [Витинский и др., 1986] были выявлены периоды со значимостью 0.95, которые представлены в табл. 1. Как следует из табл. 1, на обеих станциях в вариациях $foF2$ присутствуют наиболее типичные осцилляции с периодами 5–6, 10–11, 14, 15–16, 20, 27 сут. Отмеченное сходство периодических структур в вариациях $foF2$ подтверждается положительными коэффициентами корреляции между соответствующими периодограммами. Они равны 0.72 и 0.69 для данных, относящихся к 1978 и 1979 гг. соответственно.

Такие же периоды колебаний, или близкие к ним, отмечены и на периодограммах планетарного индекса геомагнитной активности Ap (табл. 1). Это также подтверждается значимыми коэффициентами корреляции между периодограммами Ap и критических частот. Для данных, относящихся к 1978 г., они равны 0.52 (Иркутск) и 0.58 (Ухань).

Для изучения сезонных особенностей появления колебаний с периодами ПВ исследовались ряды периодограмм, полученных с помощью “вре-

Таблица 1. Результаты периодограммального анализа критических частот слоя F_2 ионосферы станций Иркутск, Ухань и планетарного индекса геомагнитной активности A_p .

Иркутск		Ухань		A_p	
Периоды, сут		Периоды, сут		Периоды, сут	
1978 г.	1979 г.	1978 г.	1979 г.	1978 г.	1979 г.
4.8		4		3.5, 4.5	2, 3
	6, 6.75		6, 7	5, 6.2, 7	5.8, 6.2
7.8	7.2			7.8	7.2
8.8		8.5			8.8
		9.2	9.2	9.2, 9.8	9.2
11		10.8		10.8, 11.5	10.2, 11.2
12.5	12.2			12.2	11.8
14	14.5	14.8		13, 14	13, 13.5
15	15.5	15.5		15	15.5
16.8	17	16.2, 17		16.2	17.2
17.8	17.8		18.5		18.2
19.5	19.8	19.8	20	19, 20.5	
			23		21
	24.2	24	24.8	24	23.5
27	27.2	26.8	27	26.5	28.3
29.5	30.8		29.5	29.5	

Таблица 2. Статистические характеристики колебаний с периодами планетарных волн на станциях Иркутск и Ухань.

Станция	Интервал усреднения периодов, сут.	Среднее значение периода T , сут.	Медианное значение периода T , сут.
Иркутск	2–3.25	2.95 ± 0.52	3
	3.5–7.5	5.2 ± 1.2	4.75
	7.75–12.5	9.8 ± 1.4	10
	12.75–14.5	13.6 ± 0.6	14
	15–24	18 ± 2.5	18
Ухань	2–3.25	2.5 ± 0.46	2.5
	3.5–7.5	5.03 ± 1.2	4.75
	7.75–12.5	9.5 ± 1.28	9.5
	12.75–14.5	13.8 ± 0.64	13.5
	15–24	17.2 ± 2.25	17

менного” окна из 120-ти значений с последующим шагом скольжения, равным 6 ч. Всего было получено более 1330-ти периодограмм для каждой станции за год. Все выделенные периоды колебаний бы-

ли объединены в 5 групп. Интервалы усреднения периодов колебаний, средние и медианные значения усредненных периодов для каждой группы приведены в табл. 2. Видно, что усредненные и медиан-

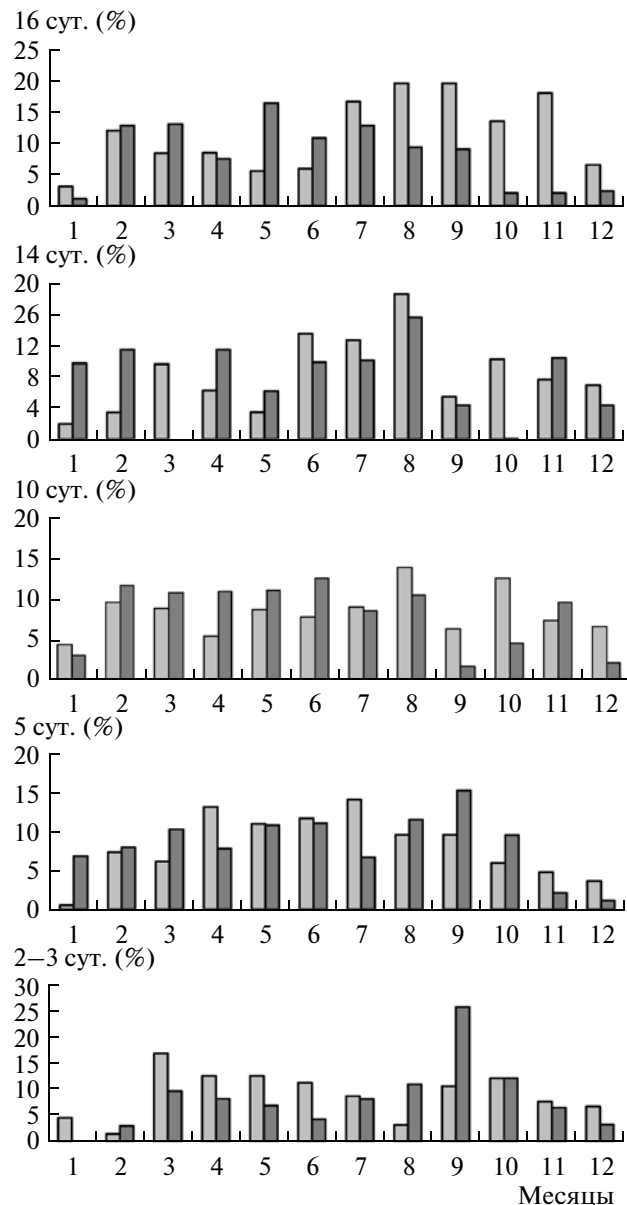


Рис. 1. Гистограмма сезонного распределения колебаний с периодами планетарных волн (в %): светлые колонки относятся к данным, полученным в Иркутске, темные — на ст. Ухань.

ные значения периодов планетарных волн в вариациях f_oF2 в Иркутске и в Ухане имеют довольно близкие значения.

Сезонное распределение колебаний с усредненными периодами ПВ приведено на рис. 1. Видно, что волновая активность в зимние месяцы выражена гораздо слабее по сравнению с другими сезонами для всех периодов колебаний. Колебания с периодами 2–3 сут наиболее часто присутствуют в равноденствия: в Иркутске их наибольшая активность наблюдается в марте, а в Ухане — в сентябре. Распределение колебаний с 5 сут примерно одинаково на обеих станциях. Для колебаний с более длитель-

ными периодами (10 сут и более) характерна сезонная асимметрия: в Иркутске они чаще наблюдаются во второй половине года, а в Ухане преимущественно в первой. Более детально сезонные особенности колебаний с периодами ПВ, динамика периодограмм ото дня ко дню и их региональные отличия представлены на рис. 2. Видно, как в течение месяца колебания одного периода постепенно нарастают, исчезают и замещаются колебаниями с другим периодом. Осцилляции с периодами более 10 сут наиболее часто присутствуют в вариациях f_oF2 в Иркутске в равноденствия (рис. 2а). В Ухане по-

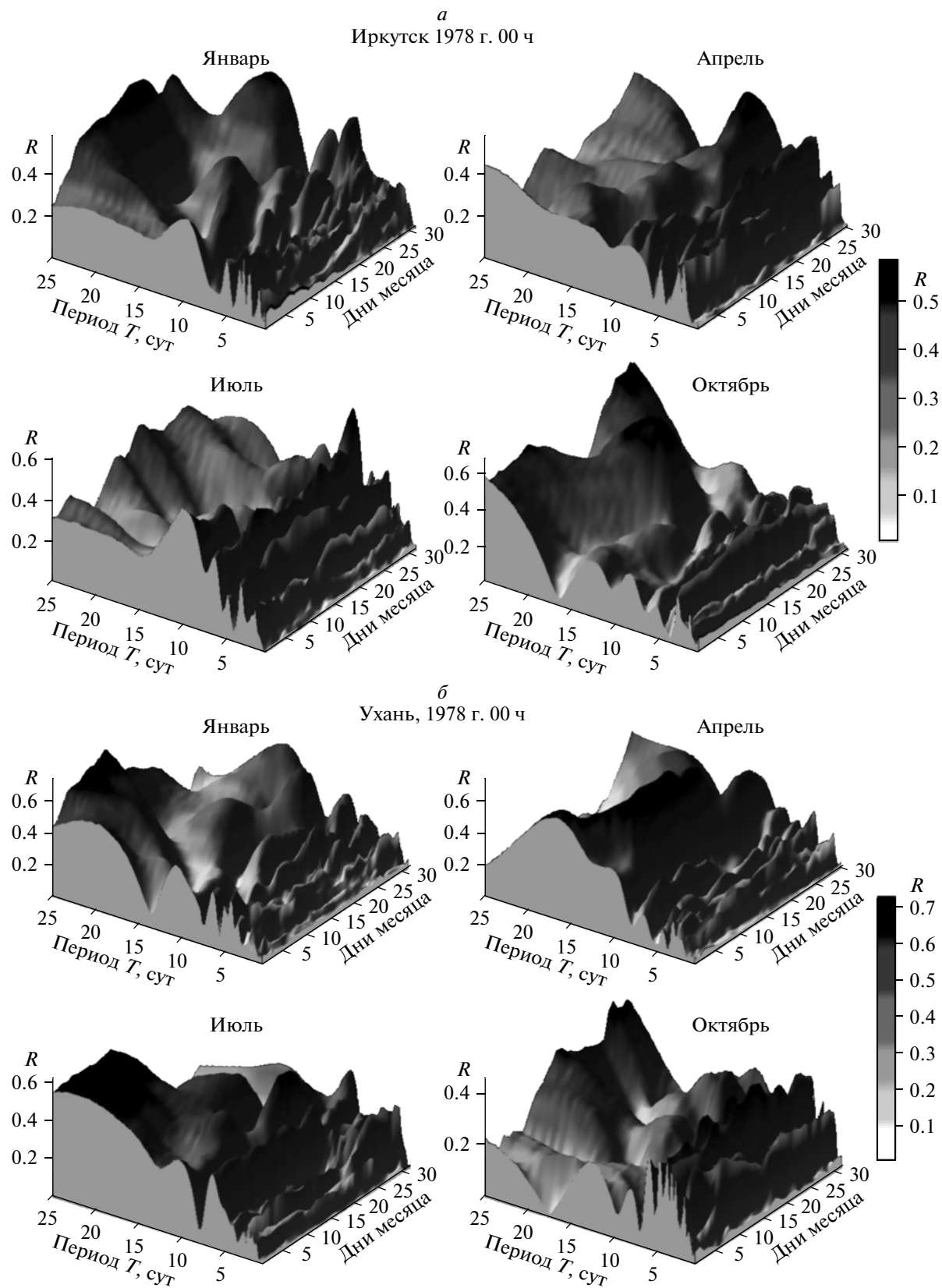


Рис. 2. Вероятность появления колебаний с периодами планетарных волн и динамика изменения их периодограмм ото дня ко дню в 00 LT в зимних (январь), весенних (апрель), летних (июль) и осенних (октябрь) условиях в 1978 г. на станциях Иркутск (*a*) и Ухань (*b*).

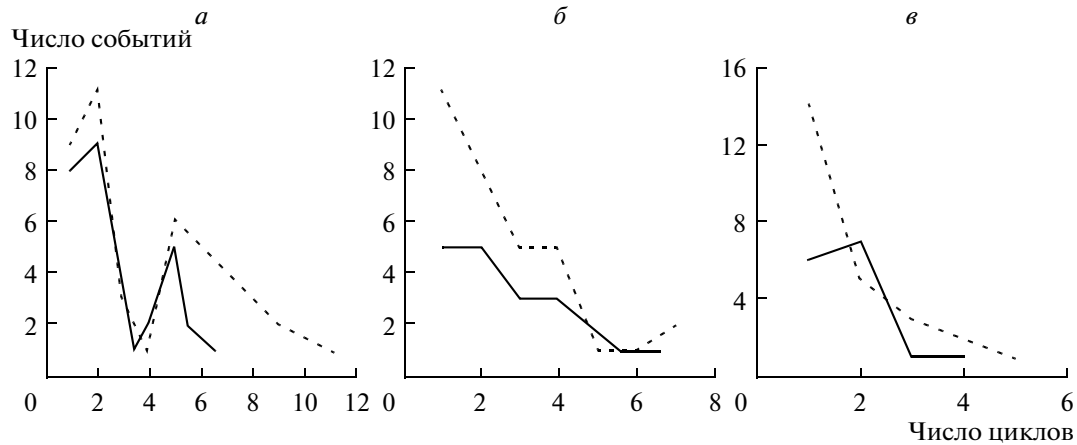


Рис. 3. Время непрерывного существования колебаний с периодами 3 сут (а), 4 сут (б) и 5 сут (в). Сплошная линия относится к данным Иркутска, штриховая – ст. Ухань.

добные колебания чаще всего наблюдаются летом и зимой.

Важным параметром волновой активности в критических частотах является максимальное время непрерывного существования колебаний. В среднем продолжительность колебаний с периодами ПВ составляет несколько суток. На рисунке 3 приведены оценки максимального времени существования, выраженного в циклах колебаний. Можно отметить, длительность существования трехсуточных колебаний включает несколько циклов, наиболее часто подобные колебания существуют в течение 2-х и 5-и циклов. С увеличением периода колебаний время их непрерывного существования (в циклах) уменьшается, в среднем оно составляет 1–1.5 цикла. Следует отметить, волновая активность в вариациях $foF2$ на ст. Ухань выражена сильнее. Это определяется большим числом событий возникновения колебаний и более длительным временем их непрерывного существования. Кроме того, это подтверждается суммарным временем существования колебаний в течение всего рассматриваемого периода (рис. 4). Если сопоставить общую продолжительность существования и максимальное непрерывное время жизни колебаний с периодами большими, чем 10 сут (долгопериодные), и меньшими, чем 10 сут (короткопериодные), то можно отметить следующее. В течение года короткопериодные волны в критических частотах на обеих станциях появляются гораздо чаще, чем долгопериодные и имеют большую продолжительность существования. Для некоторых периодов колебаний она превышает 15–20 сут, т.е. в 2–3 раза выше максимальной длительности колебаний с периодами больше 10 сут. Даже минимальное время существования некоторых короткопериодных колебаний в несколько раз превышает это время для долгопери-

одных осцилляций. Обнаружена сезонная особенность появления короткопериодных колебаний в вариациях $foF2$: их появление на обеих станциях наблюдается преимущественно летом и в периоды равноденствия, и исключительно редкое зимой (не более 10–12% случаев).

Особый интерес вызывает вариации амплитуды выделенных колебаний. На рисунке 5 представлены ежесуточные вариации амплитуд наиболее часто встречающихся колебаний с периодами 2.5, 4.5, 7.5, 10, 12.5 и 20 сут. Присутствующие многочисленные пики амплитуд свидетельствуют о том, что амплитуды выбранных колебаний меняются не только ото дня ко дню, но и от месяца к месяцу, и от сезона к сезону. Изменение амплитуд имеет квазипериодический характер, при этом присутствует сразу несколько типов накладывающихся друг на друга колебаний от нескольких суток до месяца и более. Можно отметить, что величины амплитуд, определенные по данным $foF2$ 1979 г., на обеих станциях выше по сравнению с амплитудами колебаний в 1978 г. Результаты периодограммного анализа вариаций амплитуд колебаний $foF2$ с периодами ПВ, обнаружили периоды, близкие 26–29 сут, что свидетельствует о связи вариаций амплитуд с солнечной активностью. Кроме того, были выявлены вариации амплитуд с периодами в ~70–91 сут, которые особенно четко выражены в Иркутске, указывающие на сезонные вариации амплитуд колебаний. Для их исследования выбранные амплитуды колебаний усреднялись по сезонам для каждого периода в отдельности. Их изменчивость в зависимости от периода и от сезона представлена на рис. 6. В целом можно отметить двухступенчатое возрастание амплитуд с ростом периода колебаний. В некоторых случаях для периодов, превышающих 15 сут, наблюдается незначительное уменьшение амплитуды.

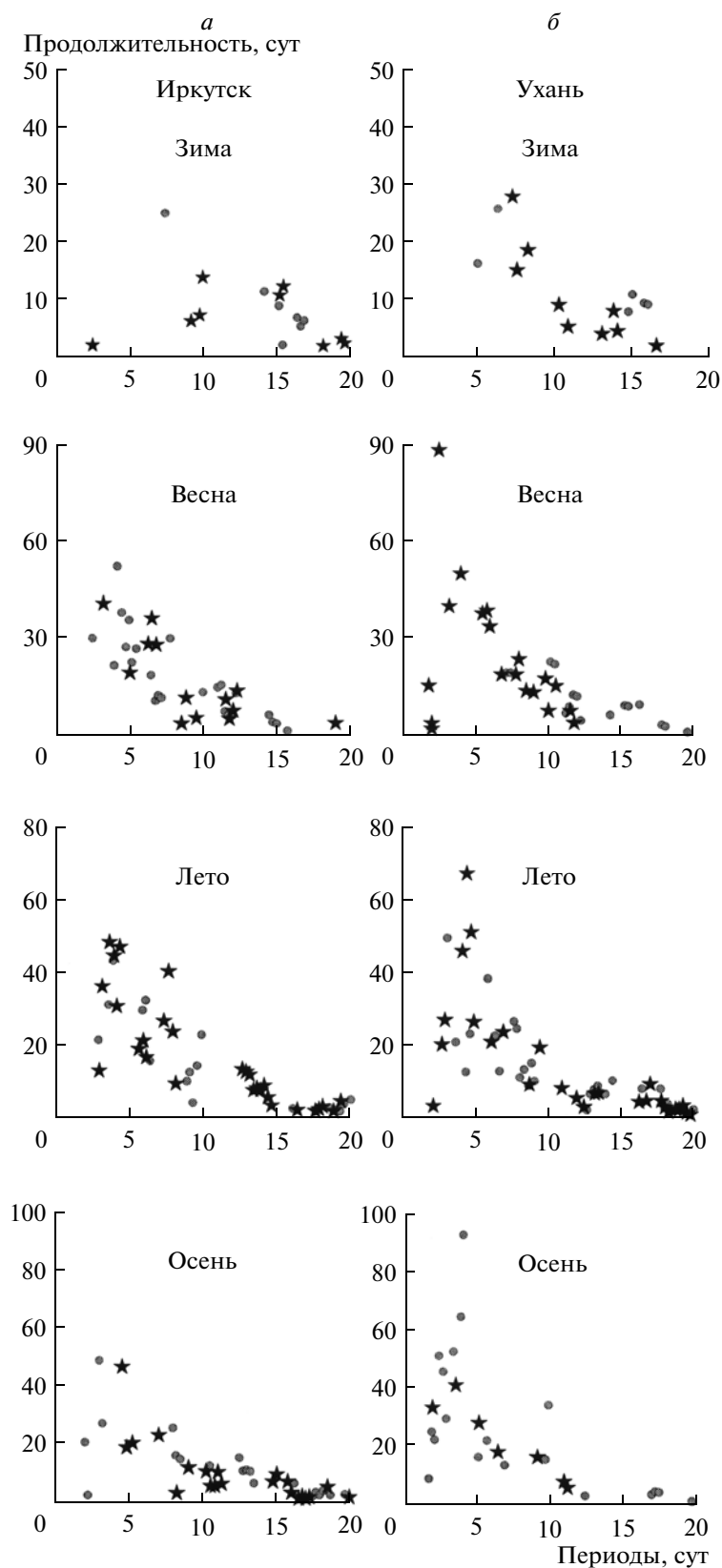


Рис. 4. Общее время продолжительности колебаний с периодами планетарных волн 2–20 сут в f_oF2 на станциях Иркутск, Ухань и преимущественный сезон их появления: затемненные кружки относятся к 1978 г., звездочки – 1979 г.

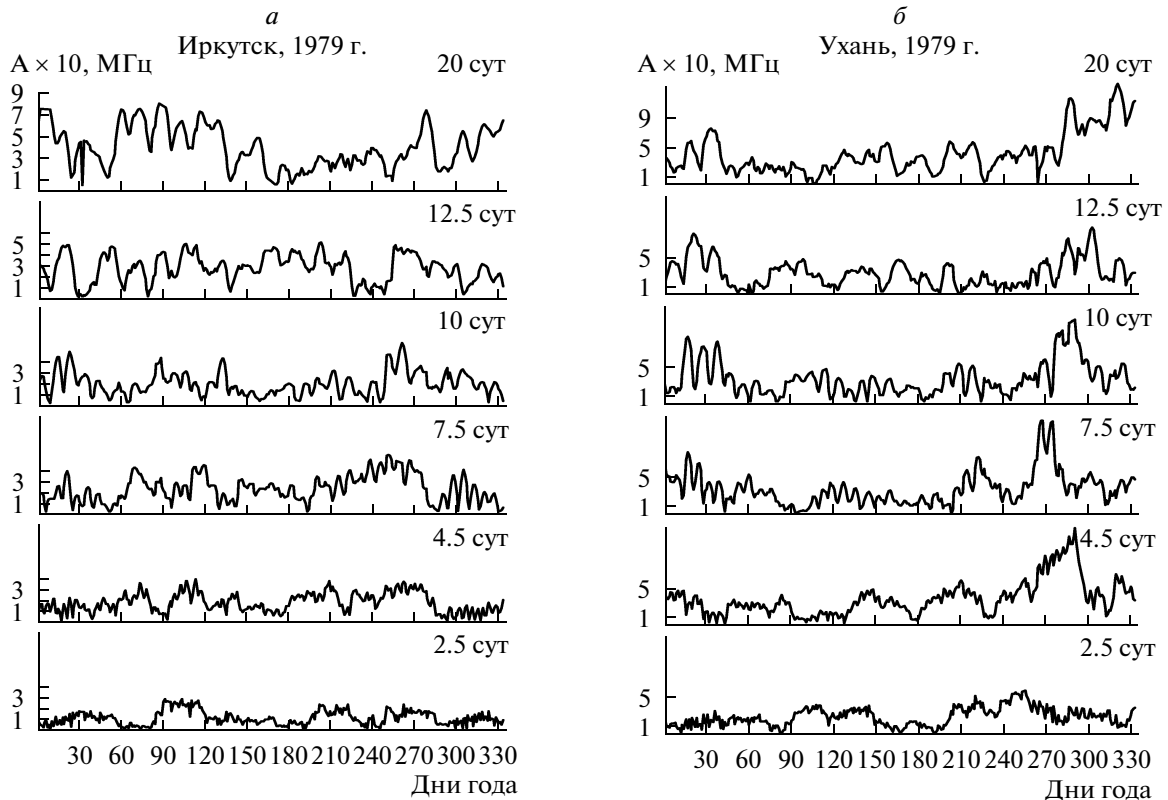


Рис. 5. Вариации амплитуд наиболее часто встречающихся колебаний с периодами ПВ в критических частотах $foF2$ в 1979 г. на станциях: *a* – Иркутск, *б* – Ухань.

Следует отметить, что по вариациям $foF2$, полученным в 1979 г. в Ухане, подобная зависимость в большей степени проявляется осенью и зимой, а весной и летом выражена очень слабо (рис. 6г). Сезонные особенности изменчивости амплитуд колебаний с различными периодами для обеих станций в большей степени выражены в 1978 г (рис. 6а, б): Значительное возрастание амплитуд колебаний наблюдается в периоды равноденствия, особенно для Иркутска (рис. 6а). По данным Иркутска 1979 г. эта сезонная особенность справедлива только для колебаний с периодами до 10 суток (рис. 6в). Для колебаний с периодами, большими, чем 10 сут, самые низкие значения амплитуд характерны для летнего периода. В Ухане наибольшие значения амплитуд наблюдаются осенью для колебаний с периодами ≤ 10 сут в 1978 г. (рис. 6б) и практически для всех колебаний в 1979 г. (рис. 6г).

Были рассчитаны коэффициенты корреляции между амплитудами колебаний с периодами 2.5, 7.5, 15.5, 18 и 20 сут по данным станций Иркутск и Ухань. Корреляция рассчитывалась между годовыми суточными значениями амплитуд (длительность рассматриваемых рядов $N = 322$ значения), между полугодовыми значениями для весенне-летнего периода ($N = 184$) и отдельно между весенними значе-

ниями амплитуд ($N = 92$). На рисунке 7 представлено изменение коэффициентов корреляции между амплитудами колебаний с периодами 2.5, 7.5, 15.5 и 20 сут для двух лет. Видно, что коэффициенты корреляции, рассчитанные по данным 1979 г., положительные и значительно выше соответствующих коэффициентов, рассчитанных по данным 1978 г. Почти все коэффициенты корреляционных функций выше уровня значимости 0.95 в области временных сдвигов ± 10 сут. Поскольку максимумы коэффициентов корреляции между амплитудами колебаний с периодом 2.5 сут (рис. 7а) приходятся, в основном, на область отрицательных сдвигов, то можно сказать, что в данном случае изменение амплитуд (возрастание или уменьшение) в Ухане следует за соответствующими изменениями амплитуд колебаний в Иркутске. На рисунке 7б максимальные значения значимых положительных коэффициентов корреляции между амплитудами колебаний с периодом 7.5 сут приходятся главным образом на нулевой сдвиг, т.е. изменения амплитуд колебаний с этим периодом происходят одновременно на обеих станциях. Следует отметить, что для выбранных двух лет сохраняется вид корреляционных функций, а наиболее высокая корреляция отмечается весной 1978 г. Положительная корреляция между амплитудами

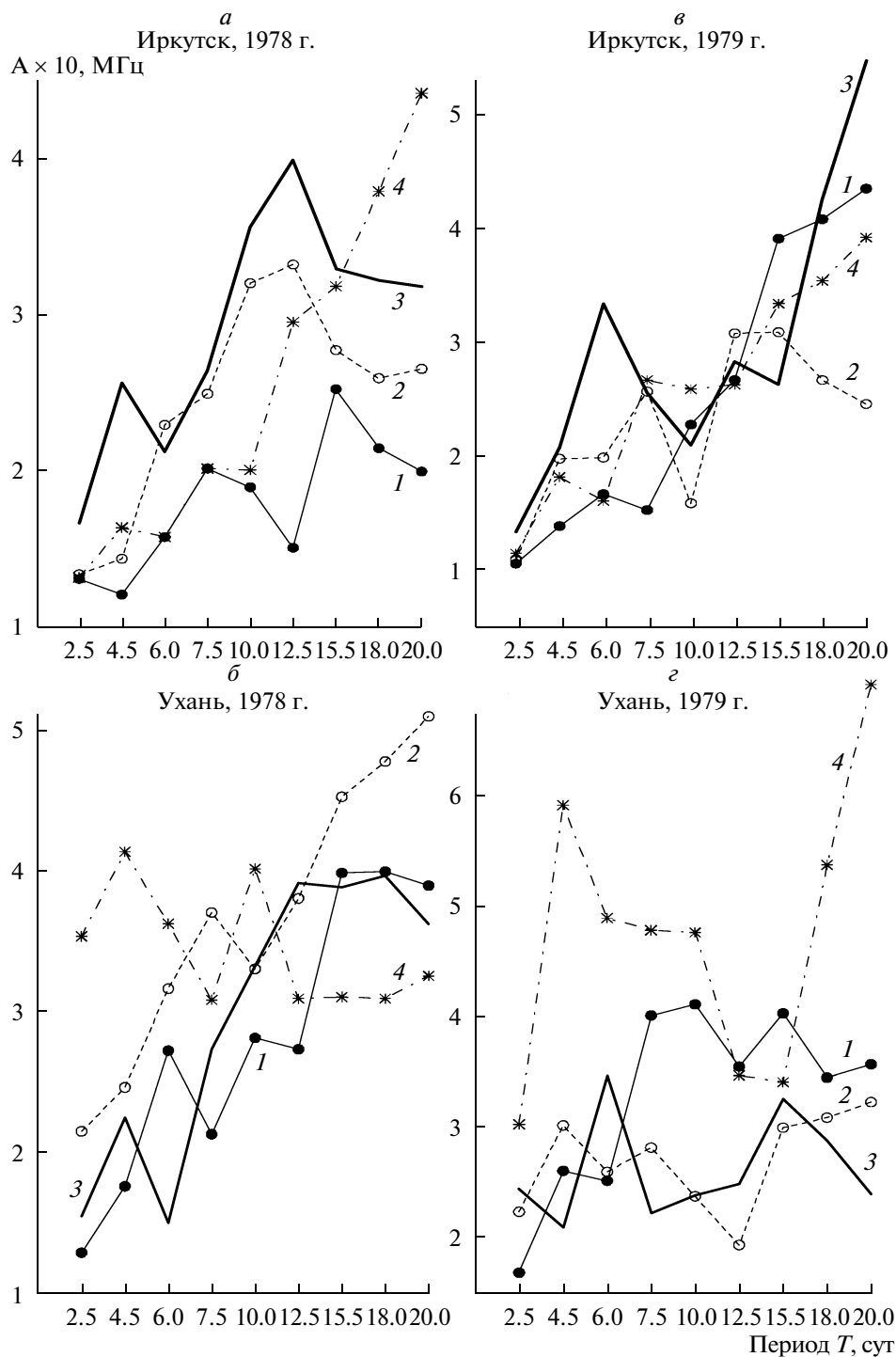


Рис. 6. Изменчивость амплитуд колебаний в зависимости от периода и от сезона для Иркутска и Ухани: 1 – зима, 2 – лето, 3 – весна; 4 – осень.

колебаний с периодом 15.5 сут на двух станциях (рис. 7в) максимальна в 1979 г, особенно между годовыми значениями. При этом изменения амплитуд колебаний с этим периодом происходят на обеих станциях, либо одновременно, либо с небольшим

(~2 сут) запаздыванием в Иркутске относительно соответствующих вариаций амплитуд в Ухане. Следует отметить, что для данных 1979 г. отмечалась отрицательная корреляция между амплитудами колебаний с периодом 20 сут, в то время как в 1978 г. на-

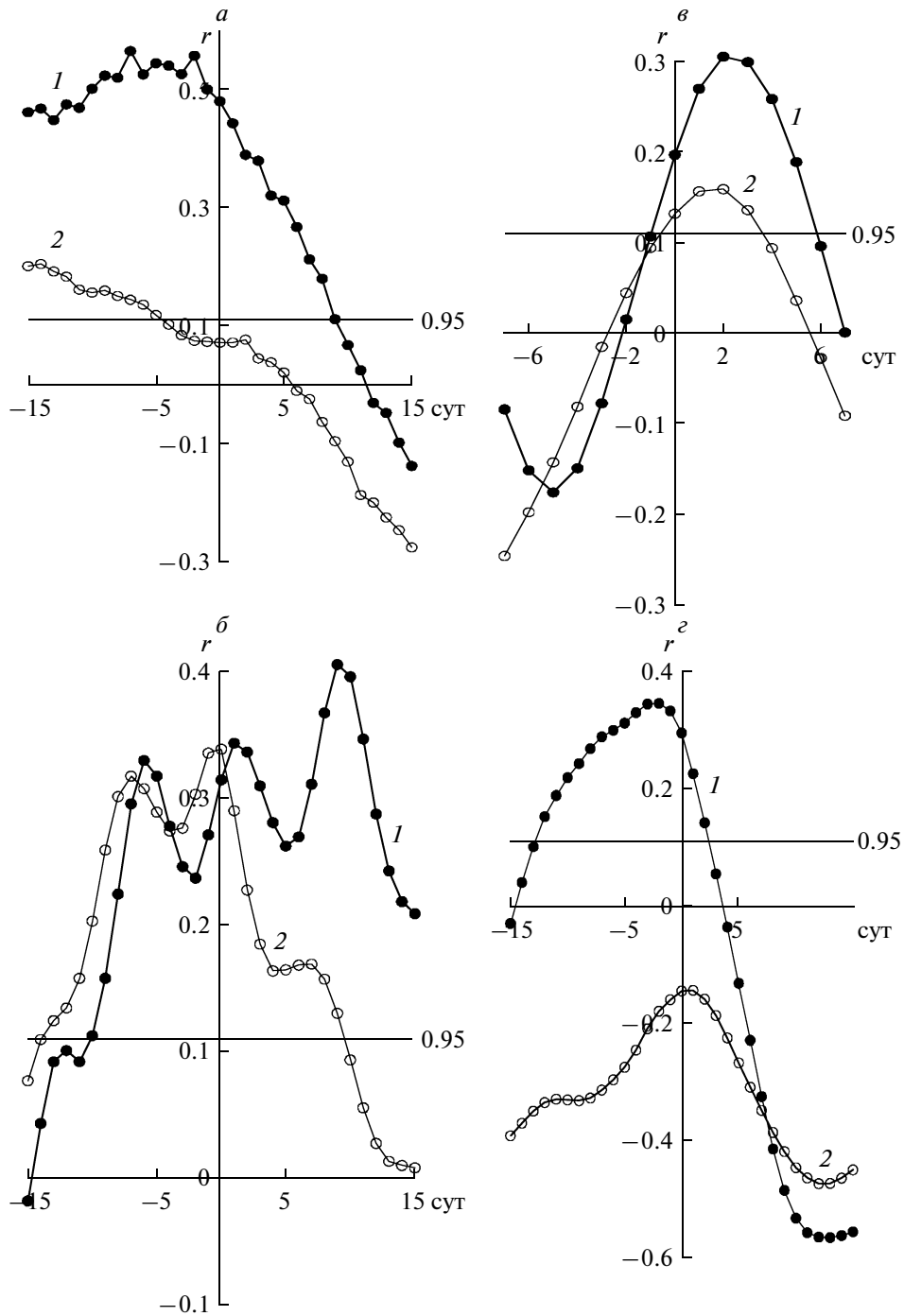


Рис. 7. Изменение коэффициентов корреляции между полугодовыми вариациями амплитуд колебаний с периодами: *a* – 2.5 сут; *б* – 7.5 сут; *в* – 15.5 сут; *г* – 20 сут: *1* – для данных 1979 г., *2* – 1978 г. Горизонтальной линией показан уровень значимости 0.9 по критерию Фишера.

блюдалась значимая положительная корреляция между годовыми, полугодовыми и особенно весенними значениями амплитуд с хорошо выраженным пиком корреляции при отрицательном временном сдвиге, равном 2 сут (рис. 7г).

Таким образом, между вариациями амплитуд колебаний с различными периодами на двух станциях существует, в основном, значимая положительная корреляция с изменениями либо день в день, либо с незначительными временными сдвигами (± 2 сут).

3. ВЫВОДЫ

Проведенный анализ волновой структуры вариаций критических частот слоя $F2$ ионосферы в Иркутске и Ухане для двух лет позволил сделать следующие основные выводы:

– Обнаружены колебания со значимостью по критерию Фишера 0.95 с периодами планетарных волн в интервале 2–25 сут.

– Сезонные особенности этих колебаний заключаются в сравнительно редком появлении зимой и наиболее частом проявлении их летом и в периоды равноденствий.

– Выявлены различия в проявлении короткопериодных (<10 сут) и долгопериодных (>10 сут) колебаний на обеих станциях в течение года. Короткопериодные колебания появляются в 2 раза чаще, чем долгопериодные, и время их существования гораздо больше. Значительно выше и максимальная длительность короткопериодных колебаний: для некоторых периодов она превышает 15–20 сут, что гораздо больше, чем время жизни долгопериодных колебаний.

– Отмечена весенне-осенняя асимметрия в проявлении осцилляций на рассматриваемых станциях с периодами больше 10-ти сут.

– Амплитуды колебаний с периодами ПВ меняются не только ото дня ко дню, но и от месяца к месяцу, и от сезона к сезону, и возрастают с ростом периода колебаний. Изменение амплитуд имеет квазипериодический характер, обнаруженные при этом общие интервалы периодов 26–30 сут близки к ~27-суточному периоду вращения Солнца, что свидетельствует о связи этих колебаний с солнечной активностью;

– Выявлены сезонные вариации амплитуд колебаний: значительное возрастание их в периоды равноденствия (особенно для Иркутска) по сравнению с зимними значениями амплитуд;

– Синхронность в изменении амплитуд колебаний с различными периодами на станциях Иркутск и Ухань подтверждается наличием довольно высокой значимой положительной корреляции изменений амплитуд на обеих станциях либо день в день, либо с небольшими сдвигами в пределах ± 2 сут.

Обнаружены региональные особенности проявления колебаний с периодами ПВ на двух станциях: некоторые из долгоживущих основных колебаний характерны только для одного из выбранных регионов. Следует отметить и наблюдаемую сезонную асимметрию в проявлении колебаний с периодами более 10 сут. Эти региональные различия могут быть связаны с разным температурным режимом рассматриваемых регионов.

Таким образом, проведенные исследования волновой структуры в вариациях критических частот на выбранных станциях подтверждают вывод о различных источниках колебаний с периодами планетарных волн на высотах $F2$ ионосферы. Для более детального анализа в дальнейшем интересно было бы рассмотреть периодическую структуру параметров нижней и средней атмосферы. Полученные нами результаты согласуются с результатами других исследователей и дают дополнительные сведения относительно проявления колебаний с периодами планетарных волн в вариациях критических частот слоя $F2$ ионосферы над территорией Восточной Сибири и Китая. Эти данные могут быть полезны для более детального анализа основных механизмов возникновения подобных осцилляций на ионосферных высотах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Вергасова Г.В., Казимировский Э.С., Полех Н.М.* Зависимость долгопериодных колебаний критической частоты слоя F ионосферы от магнитной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. С. 63–69. 2009.
- *Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В.* Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М.: Наука. 296 с. 1986.
- *Хантадзе А.Г., Абурджания Г.Д., Гвелесиани А.И.* Физика возникновения новых ветвей планетарных электромагнитных волн в ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 43. № 2. С.193–203. 2003.
- *Abdu M.A., Ramkumar T.K., Batista I.S., Brum C.G.M., Takuhashi M., Reinisch B.W., Sobral J.H.A.* Planetary wave signatures in the equatorial atmosphere – ionosphere system, and mesosphere – E - and F -region coupling // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 68. P. 509–522. 2006.
- *Altadill D.* Planetary wave type oscillations in the ionospheric F -region // Adv. Space Res. V. 26. P. 1287–1296. 2000.
- *Altadill D., Apostolov E.M.* Time and scale size of planetary wave signatures in the ionospheric F region: Role of the geomagnetic activity and mesosphere/lower thermosphere wind // J. Geophys. Res. 108. A11, 1403. doi:10.29/203/A010015, 2003.
- *Apostolov E.M., Altadill D., Hanbaba R.* Spectral energy contributions of quasi-periodic oscillations (2–35 days) to the variability of $foF2$ // Ann. Geophysicae. V. 16. P. 168–188. 1998.
- *Borries C., Jakowski N., Jacobi Ch., Hoffmann P., Pogoreltsev A.* Spectral analysis of planetary waves seen in ionospheric total electron content (TEC): First results using GPS differential TEC and stratospheric re-analyses // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 69. P. 2442–2451. 2007.
- *Chen Leyu, Chen Hongbin.* Advances in the study of the middle and upper atmosphere. // Chin. J. Space Sci. V. 24. P. 128–133. 2004.

- Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X.* Variability of ionosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 62. P. 685–693. 2000.
- Gordienko G.I., Fedulina I.N., Altadill D., Shepherd M.G.* Upper ionosphere variability over Alma-Ata and Observatorio Del Ebro using the Δf_oF2 data obtained during the winter/spring period of 2003–2004 // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 69. P. 2081–2522. 2007.
- Jiang G., Xiong J., Wan W., Ning B., Liu L.* Observation of 6.5-day waves in the MLT region over Wuhan // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 70. № 1. P. 41–48. 2008.
- Kazimirovsky E.S.* Coupling from below as a source of ionospheric variability: A review. // *Ann. Geophysicae* V. 45. P. 1–29. 2002.
- Kazimirovsky E.S., Herraiz M., de la Morena A.B.* Effects on the ionosphere due to phenomena occurring below it: A review // *Surv. Geophys.* V. 24. P. 139–184. 2003.
- Khantadze A.G., Jandieri G.V., Ishimaru A., Jandieri V.G.* Planetary waves and vortex structures in the ionosphere // *Ann. Geophysicae*. V. 27. P. 3489–3495. 2009.
- Laštovička J., Fišer V., Pancheva D.* Long-term trends in planetary wave activity (2–15) days at 80–100 km inferred from radio wave absorption. // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 56. P. 893–899. 1994.
- Laštovička J., Mlch P.* Solar cycle effects on oscillations in the period of 2–20 days in the *F* region of the ionosphere // *Annali di geofisica*. V. 39. P. 783–790. 1996.
- Laštovička J., Križan P., Šauli P., Novotná D.* Persistence of planetary wave type oscillations in f_oF2 over Europe // *Ann. Geophysicae*. V. 21. P. 1543–1552. 2003.
- Laštovička J.* Forcing of the ionosphere by waves from below // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 68. P. 479–497. 2006.
- Lawrence A.R., Jarvis M.J.* Initial comparisons of planetary waves in the stratosphere, mesosphere and ionosphere over Antarctica // *Geophys. Res. Lett.* V. 28. № 2. P. 203–206. 2001.
- Mendillo M., Rishberth H., Roble R.G., Wroten J.* Modelling *F2*-layer seasonal trends and day-to-day variability driven by coupling with the lower atmosphere 2006 // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 64. № 18. P. 1911–1931. 2002.
- Mukhtarov P., Andonov B., Borries C., Pancheva D., Jakowski N.* Forcing of the ionosphere from above and below during the Arctic winter of 2005/2006 // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 72. P. 193–205. 2010.
- Pancheva D., Laštovička J., de la Morena B.A.* Quasi-periodic fluctuations in ionospheric absorption in relation to planetary activity in the stratosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 53. P. 1151–1155. 1991.
- Pancheva D., Mitchell N., Clark R.R., Drojbeva J., Laštovička J.* Variability in the maximum height of the ionospheric *F2*-layer over Millstone Hill (September 1998–March 2000): influence from below and above // *Ann. Geophysicae*. V. 20. № 11. 1807–1819. 2002.
- Pogoreltsev A.I., Sukhanova S.A.* Simulation of the global structure of stationary planetary waves in the mesosphere and lower thermosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 55. № 1. P. 33–40. 1993.
- Xiong J., Wan W., Ning B., Liu L., Gao J.* Planetary wave-type oscillations in the ionosphere and their relationship to mesosphere/lower thermosphere and geomagnetic disturbances at Wuhan (30.6° N, 114.5° E) // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 68. P. 498–508. 2006.