

УДК 550.388.2

## ОТРАЖЕНИЕ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ В МАКСИМАЛЬНЫХ НАБЛЮДАЕМЫХ ЧАСТОТАХ НА РАЗЛИЧНЫХ ТРАССАХ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

*О. М. Бархатова*

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород, Россия

Выполнено исследование связи вариаций солнечно-геофизических параметров с вариациями максимальных наблюдаемых частот на ряде коротковолновых трасс наклонного зондирования ионосферы. Установлены основные параметры межпланетной среды, вариации которых оказывают наибольшее влияние на вариации максимальных наблюдаемых частот на указанных трассах. Изменения в компонентах  $B_x$  и  $B_z$  межпланетного магнитного поля проявляются в максимальных наблюдаемых частотах на субавроральной трассе Норильск—Ростов-на-Дону. На средних широтах для трасс Инскип—Ростов-на-Дону и Иркутск—Ростов-на-Дону отмечено влияние компонент  $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$ . Для низкоширотной трассы Кипр—Ростов-на-Дону наиболее выражено влияние модуля межпланетного магнитного поля. Концентрация и скорость солнечного ветра проявляются в вариациях максимальных наблюдаемых частот на всех трассах. Разработана методика нейросетевого восстановления максимальных наблюдаемых частот на трассах Кипр—Ростов-на-Дону и Иркутск—Ростов-на-Дону по данным максимальных наблюдаемых частот трассы Инскип—Ростов-на-Дону с учётом влияния параметров межпланетной среды. Эффективность восстановления по предложенной методике составляет не менее 80 %.

### ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на развитие альтернативных коммуникационных средств, коротковолновая радиосвязь в ионосферном радиоканале не утрачивает своей значимости и до настоящего времени используется в научно-исследовательских и прикладных целях. Она обладает высокой степенью независимости от спутниковых группировок и содержит в себе возможности шифрования передаваемой информации. Научно-исследовательские цели использования связи в ионосферном радиоканале заключаются в диагностике состояния земной атмосферы, которая в значительной степени подвержена гелиогеофизическому влиянию.

Однако главным недостатком коротковолновой связи является сильная зависимость от состояния ионосферы, которое в первую очередь определяется уровнем солнечной активности [1]. Например, имеет место зависимость от цикла солнечной активности, что выражается в практически линейном возрастании электронной концентрации ионосферы средних и низких широт от минимума к максимуму одиннадцатилетнего цикла [2]. Кроме долгопериодных вариаций ионосферной концентрации, отмечают также более динамичные вариации ионосферы, непосредственно связанные с изменениями параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. В частности, при повороте компоненты  $B_z$  в южном направлении отмечается смещение аврорального овала к более низким широтам и развитие конвекционных процессов в авроральной области [3]. Обнаружена зависимость критической частоты ионосферного слоя  $F_2$  от количества солнечных пятен, вариации радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см и ультрафиолетового излучения [4–6]. Например, в работе [7] отмечено, что концентрация плазмы в верхней части ионосферы практически линейно зависит от дневного радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см, и имеет чёткую нелинейную зависимость от ультрафиолетового излучения. Темп изменения концентрации в ионосфере возрастает с усилением ультрафиолетового излучения.

*О. М. Бархатова*

161

Изменение параметров межпланетной среды требует коррекции рабочих частот, на которых осуществляется радиосвязь. Таким образом, для поддержания устойчивого радиосигнала в изменяющихся ионосферных условиях необходимо установить основные гелиогеофизические параметры, которые оказывают наибольшее влияние на ионосферу субавроральных, средних и низких широт.

В настоящей работе состояние среднеширотной и субавроральной ионосферы определялось по вариациям максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) наклонного зондирования ионосферы. Наклонное зондирование сигналом с линейной частотной модуляцией позволяет получить информацию о состоянии среды, в которой распространяется коротковолновый сигнал, даже при приёме сигнала из одной пространственной точки [8]. В этом случае изменения условий прохождения сигнала проявляются как флуктуации МНЧ. Анализ связи МНЧ с параметрами межпланетной среды позволит выявить основные параметры, оказывающие влияние на состояние ионосферы.

Актуальной прикладной задачей до настоящего времени остаётся разработка методик заполнения пропущенных данных в МНЧ и прогнозирования значений МНЧ [9]. В настоящей работе предлагается оригинальная методика, основанная на использовании технологии искусственных нейронных сетей. В её рамках разработан алгоритм восстановления МНЧ на трассах Кипр—Ростов-на-Дону и Иркутск—Ростов-на-Дону по данным МНЧ трассы Инскип—Ростов-на-Дону. При этом учитывались обнаруженные связи МНЧ на каждой из трасс с параметрами межпланетной среды. Эффективность восстановления по предложенной методике составляет не менее 80 %.

## 1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Исследование влияния вариаций параметров межпланетной среды на вариации МНЧ было проведено на основе данных, полученных на трассах наклонного зондирования ионосферы Инскип—Ростов-на-Дону и Кипр—Ростов-на-Дону в декабре 2006 года и на трассах Инскип—Ростов-на-Дону, Норильск—Ростов-на-Дону и Иркутск—Ростов-на-Дону в марте 2007 года. На рис. 1 представлена геометрия расположения исследуемых трасс и усреднённые границы овала полярных сияний для случая слабой геомагнитной возмущённости ( $AL \sim -200$  нТл,  $D_{st} \sim -20$  нТл) [10].

Для изучения вариаций МНЧ, связанных только с ионосферной активностью, на каждой из рассматриваемых трасс наклонного зондирования было проведено вычитание суточного хода МНЧ из оригинальных данных. Подробный метод очистки МНЧ от суточного хода приведён в работе [11]. В результате были получены новые значения частот, которые содержат только возмущения МНЧ.

В качестве параметров межпланетной среды, вариации которых оказывают наибольшее влияние на возмущения МНЧ, были выбраны параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, а также интенсивность рентгеновского излучения. Параметры солнечного ветра и межпланетное магнитное поле были взяты со спутника ACE, данные о рентгеновском излучении — со спутников GOES для излучения в диапазоне длин волн  $1 \div 8$  Å и в диапазоне  $0,5 \div 3$  Å. Все использованные данные были приведены к пятиминутному разрешению в соответствии с данными об МНЧ.

Следует отметить, что в рассматриваемые временные интервалы (2–7 декабря 2006 года и 16–31 марта 2007 года) с 6 по 7 декабря 2006 года и 23–25 марта 2007 года имели место умеренные геомагнитные возмущения:  $K_p \sim 4 \div 5$ ,  $SYM \sim -90$  нТл, параметр  $AL$  до  $-1000$  нТл.

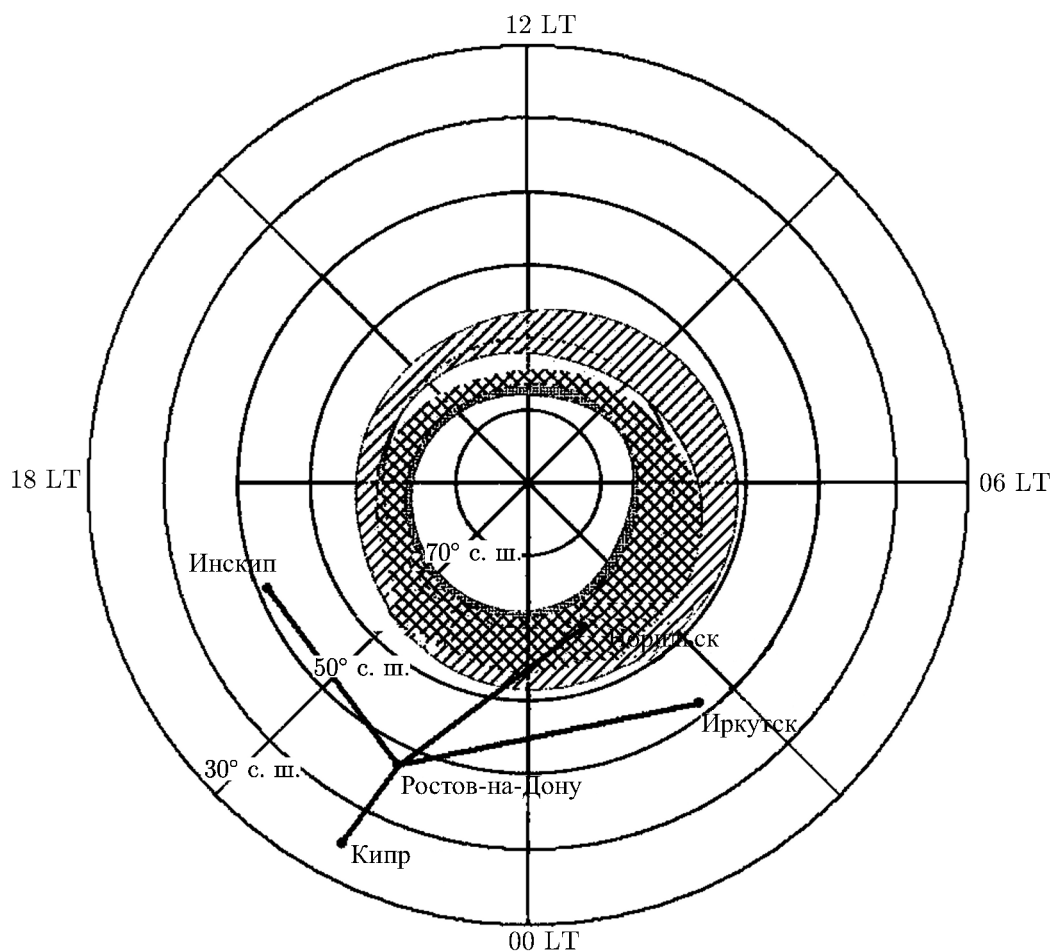


Рис. 1. Расположение трасс наклонного зондирования ионосферы, использованных для анализа влияния вариаций параметров межпланетной среды на вариации максимальных наблюдаемых частот. Одинарной штриховкой представлена диффузная авроральная область, двойной штриховкой — авроральный овал для случая слабой геомагнитной возмущённости ( $AL \sim -200$  нТл,  $D_{st} \sim -20$  нТл) [10]

## 2. ПОИСК ЛИНЕЙНЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ И ИХ ОЦЕНКА

Установление связи вариаций выбранных параметров межпланетной среды с возмущениями МНЧ на каждой из исследуемых трасс наклонного зондирования было проведено вычислением линейных корреляций указанных возмущений с вариациями параметров солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и уровнем рентгеновского излучения. Коэффициенты линейной корреляции вычислялись для каждого дня в пределах рассматриваемых интервалов. Учёт времени реакции ионосферы на изменение параметров межпланетной среды был выполнен путём введения временной задержки возмущений МНЧ относительно вариаций этих параметров в диапазоне  $0 \div 300$  мин. Указанная временная задержка включает в себя время переноса солнечного ветра от спутника ACE до границы магнитосферы. Согласно выполненным оценкам, это время составляет порядка 50 мин. Характерные времена задержки возмущений в МНЧ для различных трасс относительно исследуемых параметров далее указываются без учёта времени переноса, т. е. они будут отражать только время реакции ионосферы на изменения конкретных параметров.

Для количественной оценки полученных коэффициентов линейной корреляции был вычислен

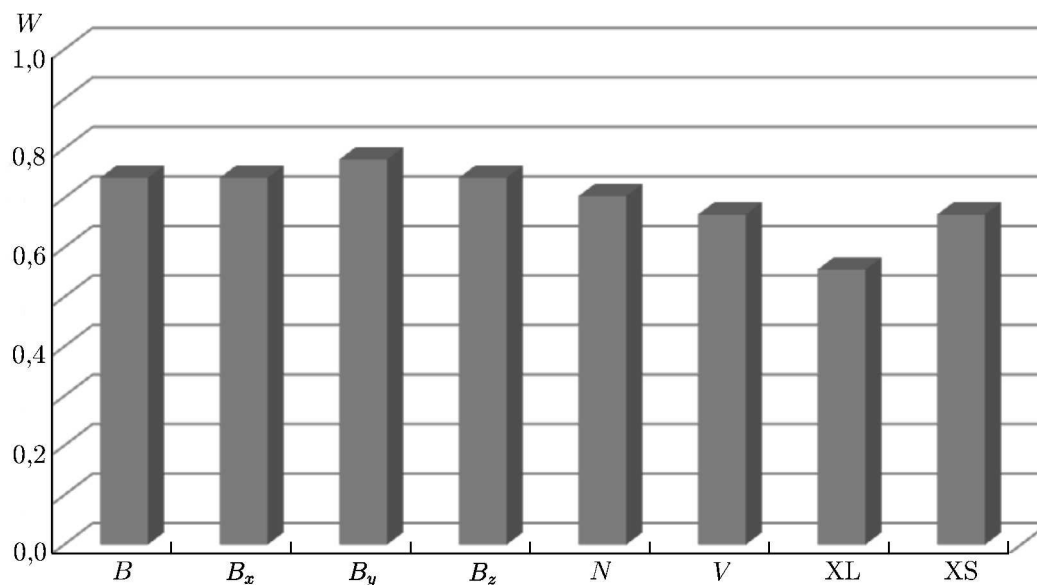


Рис. 2. Гистограмма параметра  $W$  для трассы Инскип—Ростов-на-Дону. Здесь и далее XS обозначает интенсивность рентгеновского излучения в диапазоне  $1 \div 8 \text{ \AA}$ , XL —  $0,5 \div 3 \text{ \AA}$

параметр  $W$ . Он представляет собой отношение количества дней, в которые отмечалась высокая корреляция (больше 0,5) между возмущениями МНЧ и параметрами межпланетной среды при определённой временной задержке, к общему количеству исследуемых дней для каждой трассы. Таким образом, по значению параметра  $W$  устанавливалась степень влияния конкретных параметров на возмущения МНЧ.

На рис. 2 представлена гистограмма значений параметра  $W$  для трассы Инскип—Ростов-на-Дону. На горизонтальной оси отмечены параметры межпланетной среды, для вариаций которых вычислялись корреляции с возмущениями в МНЧ на данной трассе. С учётом полученных значений параметра  $W$ , а также на основе полного корреляционного анализа для каждого из рассматриваемых дней, установлены особенности влияния конкретных параметров на возмущения МНЧ. Анализ полученных результатов с учётом геомагнитной обстановки свидетельствует о том, что:

1) Вариации концентрации плазмы солнечного ветра  $N$  коррелируют с возмущениями МНЧ на данной трассе в периоды положительных значений индекса SYM. Как известно [12], положительные значения индекса интенсивности симметричной части кольцевого тока свидетельствуют о нарастании динамического давления солнечного ветра. Этот процесс оказывает влияние на изменения возмущений на трассе, и проявляется в увеличении линейной корреляции между вариациями  $N$  и МНЧ для характерных времён задержек от 120 до 200 мин.

2) Корреляция возмущений МНЧ и скорости  $V$  солнечного ветра выражена менее отчётливо по сравнению с вариациями концентрации  $N$ . Однако замечено, что возникновение высоких значений линейной корреляции характерно для периодов геомагнитной возмущённости со значениями индекса  $K_p > 3$  и  $-100 \text{ нТл} < \text{SYM} < -50 \text{ нТл}$ . В геомагнитоспокойные дни корреляция не наблюдается. Характерные времена задержек возмущений составляют порядка  $100 \div 160$  мин.

3) Корреляция возмущений компонент межпланетного магнитного поля с возмущениями в МНЧ не однозначна — высокие значения коэффициентов корреляции могут наблюдаться как в геомагнитоспокойные, так и в возмущённые дни. Отметим, что корреляция с компонентой  $B_y$  наиболее выражена с характерными временами задержки порядка  $200 \div 240$  мин. В дни геомагнитной возмущённости отмечено возникновение корреляции с вариациями компоненты  $B_z$ . Для таких случаев время задержки возмущений МНЧ относительно вариаций этой компонен-

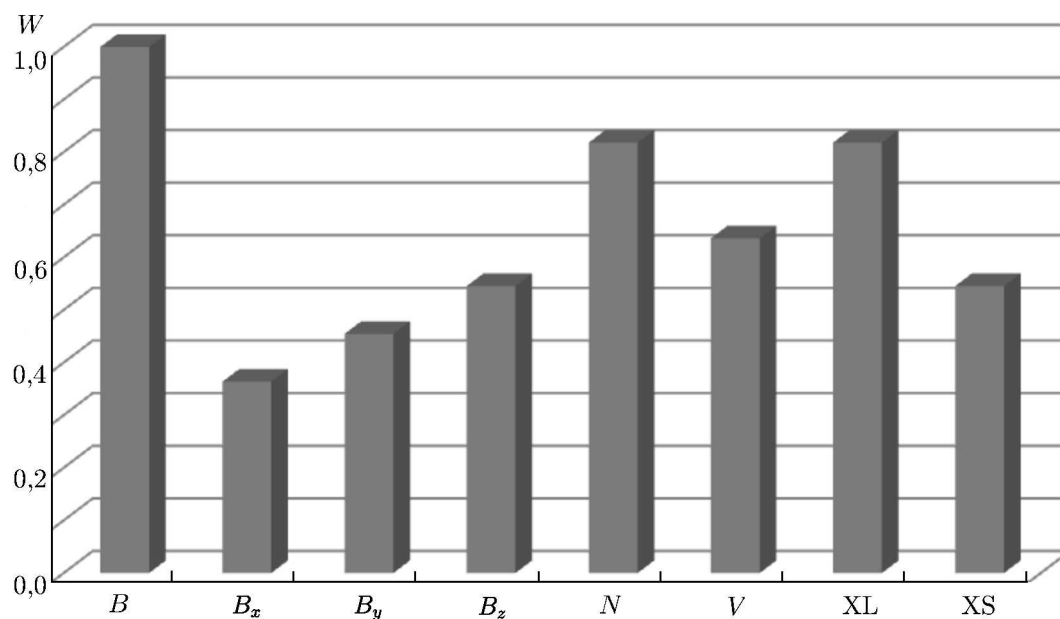


Рис. 3. Гистограмма параметра  $W$  для трассы Кипр—Ростов-на-Дону

ты составляет от 0 до 30 мин. Это означает, что возмущения МНЧ реагируют на изменения  $B_z$ -компоненты практически мгновенно.

4) При изучении линейных корреляций возмущений МНЧ и интенсивности рентгеновского излучения в диапазоне длин волн  $1 \div 8 \text{ \AA}$  и в диапазоне  $0,5 \div 3 \text{ \AA}$  обнаружено, что в марте 2007 года имело место снижение этой корреляции. Поскольку в это время наблюдалось снижение интенсивности излучения в диапазоне  $1 \div 8 \text{ \AA}$ , то такой факт свидетельствует о некоторой связи возмущений МНЧ с интенсивностью рентгеновского излучения, которое может оказывать заметное влияние на ионизацию верхней атмосферы [13]. Заметная корреляция имела место преимущественно в декабре 2006 года. Времена задержки возмущений МНЧ относительно вариаций интенсивности рентгеновского излучения в диапазоне  $1 \div 8 \text{ \AA}$  составляют интервалы  $0 \div 40$  мин. Корреляционная связь возмущений МНЧ с излучением в диапазоне  $0,5 \div 3 \text{ \AA}$  более отчетливо заметна в марте 2007 года, и менее выражена для декабря. Временные задержки возмущений относительно вариаций интенсивности рентгеновского излучения в этом диапазоне составляют интервалы  $0 \div 20$  мин.

На рис. 3 представлена гистограмма значений параметра  $W$ , вычисленные на основе полученных линейных корреляций для трассы Кипр—Ростов-на-Дону. Значения параметра и общий корреляционный анализ с учётом геомагнитной обстановки показывают, что:

1) Наибольшие значения коэффициентов корреляции возмущений МНЧ и концентрации плазмы солнечного ветра  $N$  отмечены для характерных времён задержки возмущений МНЧ от 100 до 200 мин. Наличие такой корреляции не связано с развитием геомагнитного возмущения и особенно заметно проявляется в геомагнитоспокойные периоды.

2) Отмечается более слабая связь возмущений МНЧ на данной трассе с вариациями скорости солнечного ветра  $V$  по сравнению с вариациями концентрации. Однако она имела место в периоды геомагнитной возмущённости. Характерные временные задержки составляют порядка  $100 \div 150$  мин.

3) Согласно полученным значениям параметра  $W$ , возмущения МНЧ больше всего коррелируют с вариациями модуля межпланетного магнитного поля. Временные задержки в этом случае имеют различные значения — от 80 до 220 мин. Далее по степени корреляции следуют

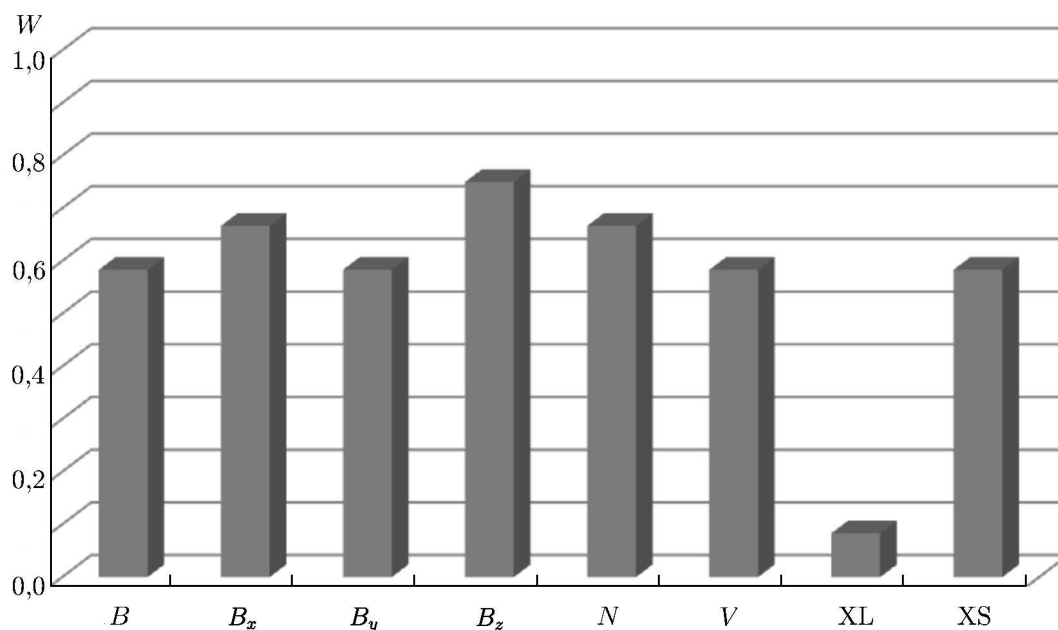


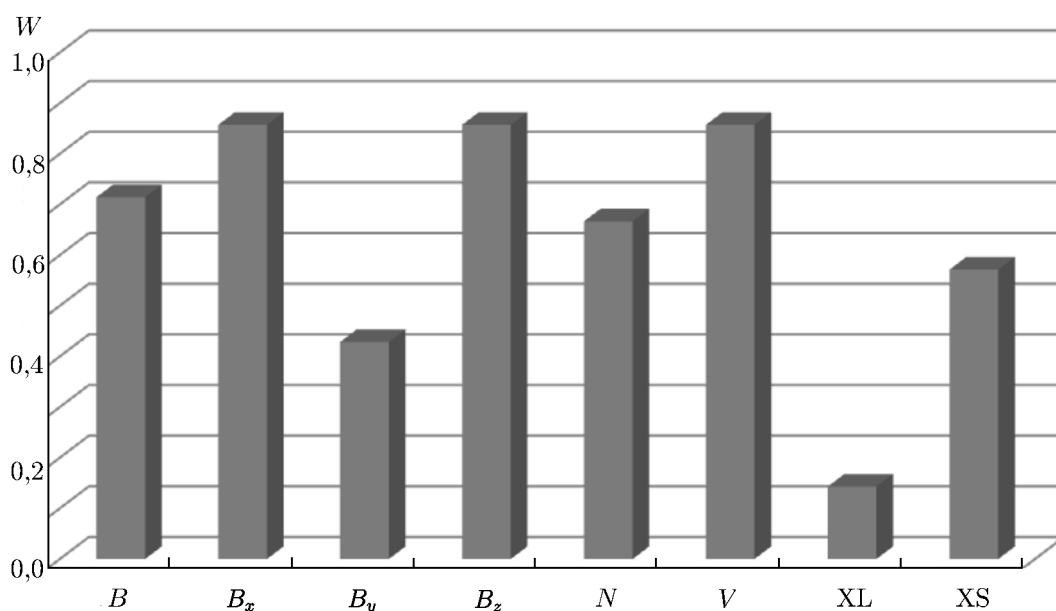
Рис. 4. Гистограмма параметра  $W$  для трассы Норильск—Ростов-на-Дону

возмущения компоненты  $B_z$ . Её проявления в возмущениях МНЧ связаны не только с буревой, но и с суббуревой активностью. Это означает, что корреляция возникает и в том случае, когда на фоне относительно спокойного периода происходит суббуря ( $AL \sim 250$  нТл). Характерные времена задержки проявления вариаций компоненты  $B_z$  в возмущениях МНЧ составляют от 100 до 200 мин. Отметим, что вариации компонент  $B_x$  и  $B_y$  практически не коррелируют с возмущениями МНЧ на трассе Кипр—Ростов-на-Дону. Это может быть связано с тем, что указанная трасса является среднеширотной. Поэтому здесь влияние магнитных полей межпланетной среды проявляется не напрямую, как в авроральной зоне, а посредством преобразования электромагнитной энергии в волновые явления.

4) Вариации интенсивности рентгеновского излучения в диапазоне  $1 \div 8 \text{ \AA}$  коррелируют с возмущениями МНЧ заметнее, чем в диапазоне  $0,5 \div 3 \text{ \AA}$ . Корреляция с излучением на больших длинах волн возникает как в магнитовозмущённые, так и в спокойные периоды, в то время как корреляция с излучением на меньших длинах волн существует в основном только в периоды магнитных возмущений.

На рис. 4 представлена гистограмма значений параметра  $W$  для трассы Норильск—Ростов-на-Дону. Установлены следующие особенности влияния параметров межпланетной среды на возмущения МНЧ с учётом геомагнитной обстановки:

1) На данной трассе качественно заметнее проявляется корреляция возмущений МНЧ с вариациями концентрации плазмы солнечного ветра  $N$ , чем с вариациями скорости  $V$ . Высокие значения коэффициентов корреляции возмущений МНЧ и  $N$  возникают для временных задержек от 90 до 190 мин, причём наличие корреляции характерно для геомагнитоспокойных и слабо возмущённых дней ( $SUM > -50$  нТл). Подобная особенность существует и для корреляции возмущений МНЧ и скорости  $V$ . Кроме того, для этой связи характерно наличие значений с отрицательной корреляцией между возмущениями МНЧ и  $V$ . Это свидетельствует о противофазном характере этих изменений — при нарастании скорости солнечного ветра происходит уменьшение возмущений МНЧ, и наоборот. Характерные временные задержки возмущений МНЧ относительно вариаций  $V$  составляют порядка  $50 \div 150$  мин.

Рис. 5. Гистограмма параметра  $W$  для трассы Иркутск—Ростов-на-Дону

2) Из параметров межпланетного магнитного поля наиболее сильно возмущения МНЧ на рассматриваемой трассе коррелируют с вариациями компонент  $B_x$  и  $B_z$ . Причём наличие высокой корреляции характерно для слабо возмущённых и возмущённых условий ( $-100 \text{ нТл} < \text{SYM} < -50 \text{ нТл}$ ). В геомагнитоспокойные периоды корреляция практически отсутствует. Характерные временные задержки возмущений МНЧ относительно вариаций компоненты  $B_x$  составляют  $100 \div 130$  мин. Временные задержки относительно вариаций компоненты  $B_z$  находятся в достаточно широком интервале значений от 0 до 200 мин. Возможно, это обусловлено близостью рассматриваемой трассы к овалу полярных сияний. Корреляция с вариациями модуля межпланетного магнитного поля и компоненты  $B_y$  выражена несколько слабее, однако она также имеет место для рассматриваемой трассы. Характерные временные задержки возмущений МНЧ относительно вариаций модуля межпланетного магнитного поля составляют  $50 \div 130$  мин, относительно вариаций компоненты  $B_y$  —  $90 \div 130$  мин.

3) За период с 16 по 31 марта 2007 года корреляция возмущений МНЧ с вариациями интенсивности рентгеновского излучения в диапазоне  $1 \div 8 \text{ \AA}$  отмечается только для одного магнитовозмущённого дня — 24 марта. Для остальных дней, как спокойных, так и возмущённых, значения коэффициентов корреляции между этими параметрами близки к нулю. Однако обнаружено, что вариации интенсивности излучения в диапазоне  $0,5 \div 3 \text{ \AA}$  коррелируют с возмущениями МНЧ в слабо возмущённых и невозмущённых условиях ( $\text{SYM} > -50 \text{ нТл}$ ). Время задержки вариаций МНЧ относительно вариаций интенсивности рентгеновского излучения в диапазоне  $0,5 \div 3 \text{ \AA}$  близко к нулю.

Гистограмма значений параметров  $W$  для трассы Иркутск—Ростов-на-Дону представлена на рис. 5. Обнаружены следующие особенности влияния параметров межпланетной среды на возмущения МНЧ на трассе Иркутск—Ростов-на-Дону с учётом геомагнитной обстановки:

1) На данной трассе сильнее проявляется корреляция возмущений МНЧ с вариациями скорости солнечного ветра  $V$ , чем с вариациями концентрации  $N$ . Высокая корреляция возмущений МНЧ и  $V$  имеет место независимо от геомагнитной возмущённости. Характерные времена задержки составляют  $0 \div 70$  мин. Корреляция с вариациями концентрации  $N$  преимущественно

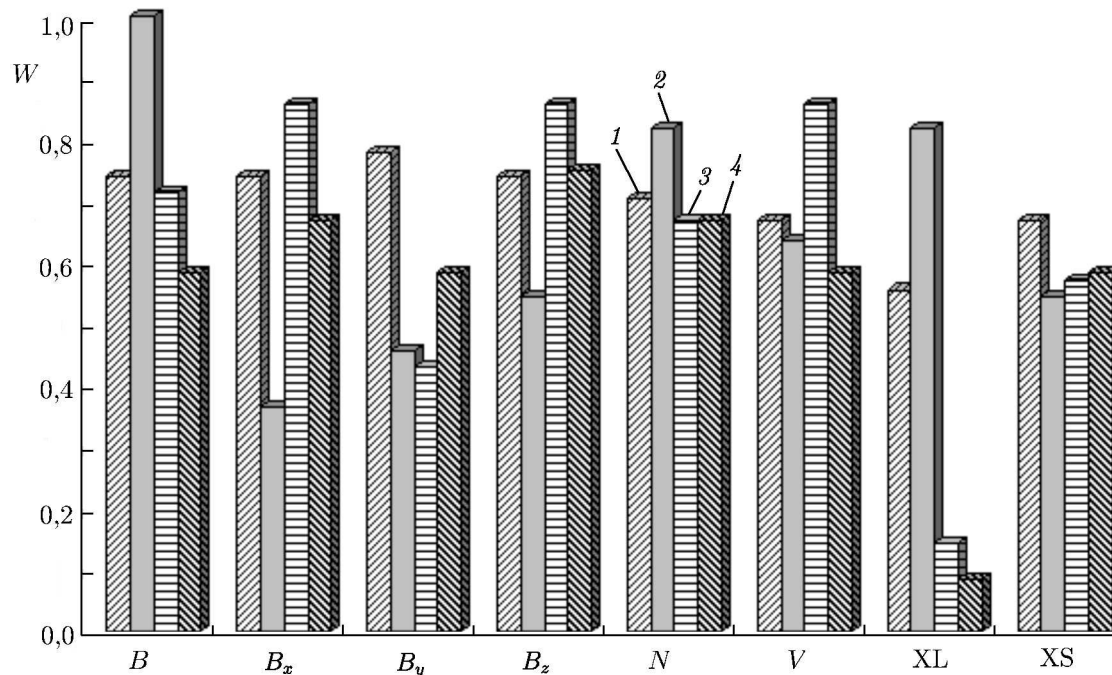


Рис. 6. Значения параметра  $W$ , вычисленные для каждого из рассматриваемых параметров для всех исследуемых трасс наклонного зондирования. Штриховка 1 соответствует трассе Инскип—Ростов-на-Дону, штриховка 2 — трассе Кипр—Ростов-на-Дону, штриховка 3 — трассе Норильск—Ростов-на-Дону, штриховка 4 — трассе Иркутск—Ростов-на-Дону

наблюдается в периоды геомагнитной возмущённости. Временные задержки составляют от 0 до 40 мин.

2) При изучении влияния межпланетного магнитного поля обнаружено, что возмущения МНЧ на данной трассе сильнее всего коррелируют с вариациями компонент  $B_x$  и  $B_z$ . Временные задержки возмущений МНЧ относительно вариаций компоненты  $B_x$  находятся в интервале от 70 до 90 мин, причём высокая корреляция в основном наблюдается в геомагнитовозмущённый период ( $-100 \text{ нТл} < \text{SYM} < -50 \text{ нТл}$ ). Наличие корреляции возмущений МНЧ с возмущениями компоненты  $B_z$  не зависит от геомагнитной возмущённости. Конкретные значения временных задержек относительно вариаций компоненты  $B_z$  не установлены. Необходимо отметить, что для данной трассы характерно практически полное отсутствие корреляции возмущений МНЧ и компоненты  $B_y$ .

3) Обнаружено, что корреляция возмущений МНЧ с вариациями интенсивности рентгеновского излучения в диапазоне  $1 \div 8 \text{ \AA}$  за интервал с 16 по 25 марта 2007 года имела место только в один геомагнитовозмущённый день — 25 марта. Для всех остальных, как возмущённых, так и спокойных дней, корреляция близка к нулю. Однако имеет место корреляция возмущений МНЧ с вариациями интенсивности рентгеновского излучения в диапазоне  $0,5 \div 3 \text{ \AA}$  независимо от геомагнитной возмущённости. Реакция возмущений МНЧ на вариации излучения в данном диапазоне практически мгновенная — временные задержки возмущений близки к нулю. Заметим, что такая особенность показывает уровень корреляции рентгеновского излучения разных диапазонов с ультрафиолетовым излучением.

Сравнение значений параметра  $W$  на субавроральной, среднеширотных и низкоширотной трассах позволяет сделать вывод о существенной зависимости степени влияния параметров межпланетной среды на возмущения МНЧ от широты трассы. На рис. 6 представлена гистограмма

значений параметра  $W$ , вычисленных для каждого исследуемого параметра и для всех рассматриваемых трасс.

Анализ полученных результатов показывает, что, по сравнению с среднеширотными и низкоширотной трассами, для субавроральной трассы Норильск—Ростов-на-Дону наиболее сильна корреляция возмущений МНЧ и вариаций компонент  $B_y$  и  $B_z$  межпланетного магнитного поля. На более низких широтах для трасс Инскип—Ростов-на-Дону и Иркутск—Ростов-на-Дону заметнее корреляция с компонентами  $B_x$  и  $B_z$ . На низкоширотной трассе Кипр—Ростов-на-Дону отмечена корреляция с модулем межпланетного магнитного поля. Корреляция с концентрацией и скоростью солнечного ветра проявляются на всех трассах. Однако на субавроральной трассе Норильск—Ростов-на-Дону корреляция слабее, чем на среднеширотных и низкоширотной трассах.

### 3. УСТАНОВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СВЯЗЕЙ ВОЗМУЩЕНИЙ МНЧ С ПАРАМЕТРАМИ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ

Дополнение и уточнение результатов, полученных на основе поиска линейных корреляций, было проведено поиском нелинейных связей между параметрами межпланетной среды и возмущениями МНЧ на каждой из рассматриваемых трасс. Для этого была использована нейронная сеть типа Элмана, обладающая внутренней памятью изучаемого физического процесса. Нейросетевые эксперименты по поиску нелинейных связей были проведены в следующей последовательности:

1) Для выявления нелинейных связей возмущения МНЧ на трассах Кипр—Ростов-на-Дону, Норильск—Ростов-на-Дону и Иркутск—Ростов-на-Дону восстанавливались по данным возмущений МНЧ, полученным на трассе Инскип—Ростов-на-Дону и их первым производным по времени без привлечения дополнительных параметров. Для оценки эффективности выполненного нейросетевого восстановления вычислялся коэффициент линейной корреляции между реальной последовательностью данных и последовательностью, восстановленной нейросетью.

2) Для установления степени влияния параметров солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и рентгеновского излучения на качество восстановления возмущений МНЧ, был проведён перебор дополнительных параметров, каждый из которых добавлялся к значениям возмущений МНЧ и их первым производным. В качестве дополнительного параметра на вход нейронной сети последовательно подавались: модуль межпланетного магнитного поля  $B$ , его компоненты  $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$ , концентрация плазмы солнечного ветра  $N$ , его скорость  $V$ , интенсивность рентгеновского излучения в диапазонах  $1\div 8$  Å и  $0,5\div 3$  Å.

3) Вычислялся коэффициент линейной корреляции между реальной и восстановленной последовательностями возмущений МНЧ при добавлении каждого из указанных дополнительных параметров. Это позволяло оценить степень влияния конкретного параметра межпланетной среды на уровень нелинейной связи между возмущениями МНЧ на различных трассах наклонного зондирования. Сравнение коэффициентов корреляции, полученных без привлечения дополнительных параметров с коэффициентами корреляции, вычисленными с учётом дополнительных параметров, позволило оценить улучшение качества восстановления для конкретного параметра межпланетной среды.

По результатам выполненных нейросетевых экспериментов установлено, что при восстановлении возмущений МНЧ на трассе Кипр—Ростов-на-Дону по данным возмущений на трассе Инскип—Ростов-на-Дону в декабре 2006 года, привлечение параметра  $B$  позволило улучшить качество восстановления на  $4\div 6$  %, параметра  $B_x$  — на  $4\div 7$  %, параметра  $B_y$  — на 8 %. Влияние остальных параметров оказалось менее заметным. Таким образом, для трасс Инскип—Ростов-

на-Дону и Кипр—Ростов-на-Дону более существенное по сравнению с параметрами солнечного ветра влияние на МНЧ оказывают модуль межпланетного магнитного поля и его компоненты  $B_x$  и  $B_y$ . Возможно, это связано с тем, что точки отражения рассматриваемых трасс находятся на средних и низких широтах, поэтому изменения в концентрации и скорости солнечного ветра не проявляются в возмущениях в МНЧ на данных трассах.

Восстановление данных на трассе Норильск—Ростов-на-Дону по данным трассы Инскип—Ростов-на-Дону оказалось технически сложным ввиду продолжительных ночных интервалов на трассе Норильск—Ростов-на-Дону. Указанная трасса, в отличие от трёх других трасс, располагается в субавроральной зоне. Это приводит к значительному отличию возмущений МНЧ в этой зоне от вариаций на средних и низких широтах. Возможно, по этой причине не удалось выявить нелинейной корреляционной связи между возмущениями для данной пары трасс. Естественно, что добавление дополнительных параметров также не влияет на уровень нелинейной корреляции.

Таблица 1. Параметры межпланетной среды с характерными временными задержками реакции МНЧ на их изменение

| Параметр межпланетной среды | Время задержки, мин |
|-----------------------------|---------------------|
| $B$                         | 50÷90               |
| $B_x$                       | 30                  |
| $B_y$                       | 90÷150              |
| $B_z$                       | 10÷30               |
| $N$                         | 170÷230             |
| $V$                         | не установлено      |
| XL                          | 0                   |
| XS                          | 0                   |

Исследование нелинейной связи между возмущениями МНЧ на трассах Инскип—Ростов-на-Дону и Иркутск—Ростов-на-Дону показало, что восстановление возмущений на трассе Иркутск—Ростов-на-Дону по данным возмущений трассы Инскип—Ростов-на-Дону не происходит. Удовлетворительное восстановление возмущений МНЧ на трассе Иркутск—Ростов-на-Дону возможно только при добавлении к входным данным дополнительных параметров межпланетной среды. Согласно результатам нейросетевых экспериментов, основное влияние оказывают модуль межпланетного магнитного поля  $B$  — качество восстановления возрастает на 40 %, компоненты  $B_y$  и  $B_z$  — качество восстановления возрастает на 30 и 40 % соответственно, концентрация плазмы

солнечного ветра — качество восстановления возрастает на 40 %.

Вычисление нелинейных корреляций между возмущениями МНЧ на разных трассах наклонного зондирования с привлечением дополнительных параметров позволило уточнить характерные времена задержки возмущений МНЧ относительно вариаций каждого из рассматриваемых параметров. В табл. 1 для используемых дополнительных параметров представлены установленные характерные временные задержки, усреднённые по всем рассматриваемым трассам.

#### 4. НЕЙРОСЕТЕВОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОРИГИНАЛЬНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ МНЧ НА РАССМАТРИВАЕМЫХ ТРАССАХ

Выполненное выше исследование позволило разработать методику нейросетевого восстановления значений МНЧ без устранения суточного хода на различных трассах наклонного зондирования с учётом установленных линейных и нелинейных корреляционных связей. Нейросетевые эксперименты по восстановлению МНЧ были проведены для трасс Кипр—Ростов-на-Дону и Иркутск—Ростов-на-Дону по данным МНЧ на трассе Инскип—Ростов-на-Дону. На вход нейронной сети подавались установленные ранее дополнительные параметры, оказывающие наибольшее влияние на уровень нелинейной связи, с оптимальными временными задержками. Кроме того, в качестве дополнительного входного параметра был использован солнечный зенитный угол, который обеспечивал восстановление суточного хода МНЧ.

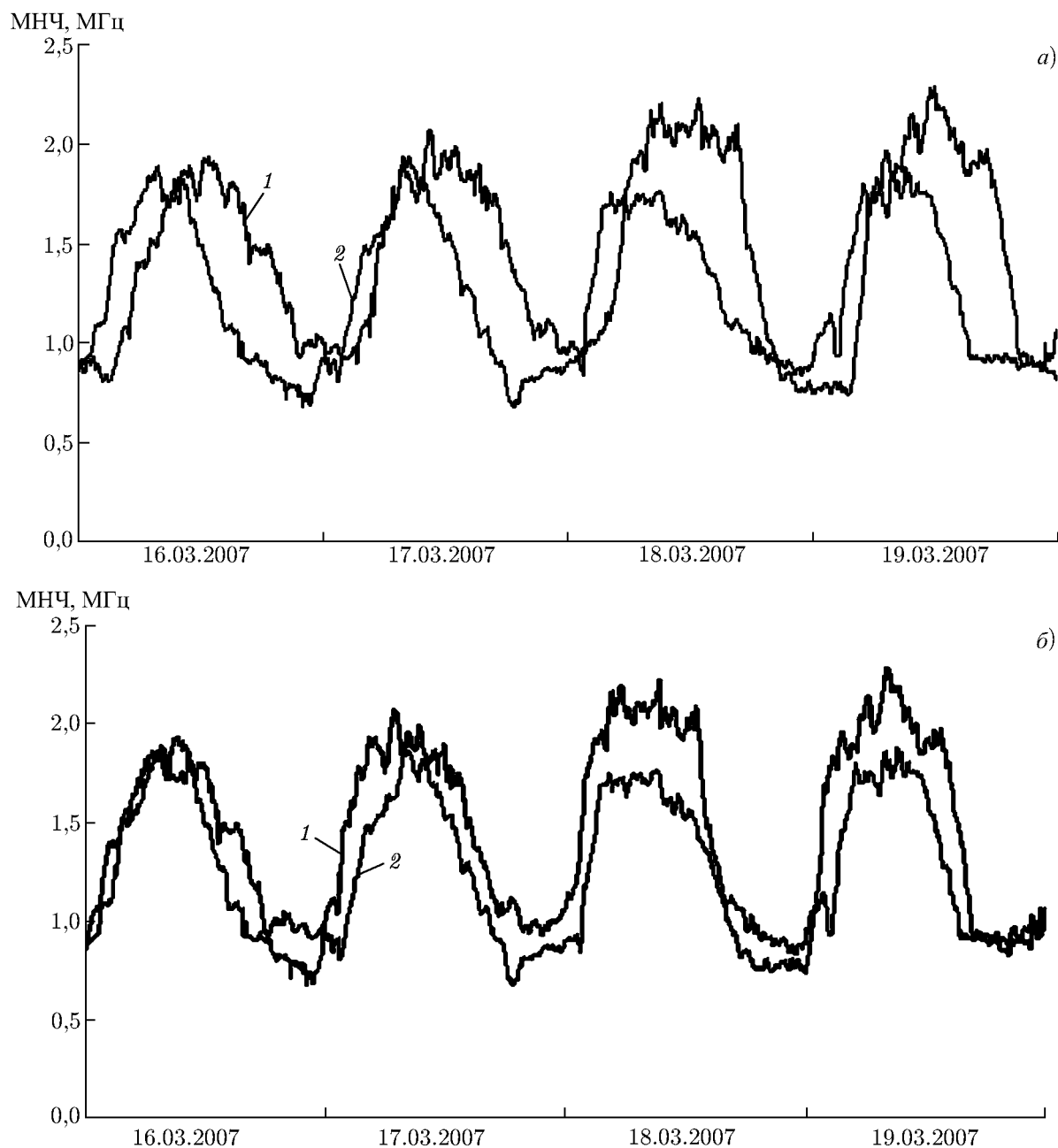


Рис. 7. (а) Временной сдвиг между МНЧ на трассах Инскип—Ростов-на-Дону (кривая 1) и Иркутск—Ростов-на-Дону (кривая 2); (б) вариации МНЧ на трассах Инскип—Ростов-на-Дону (кривая 1) и Иркутск—Ростов-на-Дону (кривая 2) с учётом установленного временного сдвига 220 мин

Рассмотрим более подробно методику проведённого нейросетевого восстановления на примере трасс Инскип—Ростов-на-Дону и Иркутск—Ростов-на-Дону. Вследствие географической удалённости точек отражения сигнала для указанных трасс между вариациями МНЧ существует заметный временной сдвиг (рис. 7а). Для его определения были вычислены коэффициенты линейной корреляции между рассматриваемыми МНЧ с временным сдвигом от 5 до 500 мин. Время сдвига, соответствующее максимальному коэффициенту корреляции между рассматриваемыми МНЧ, составляло 220 мин. Полученное значение времени позволило синхронизировать суточный

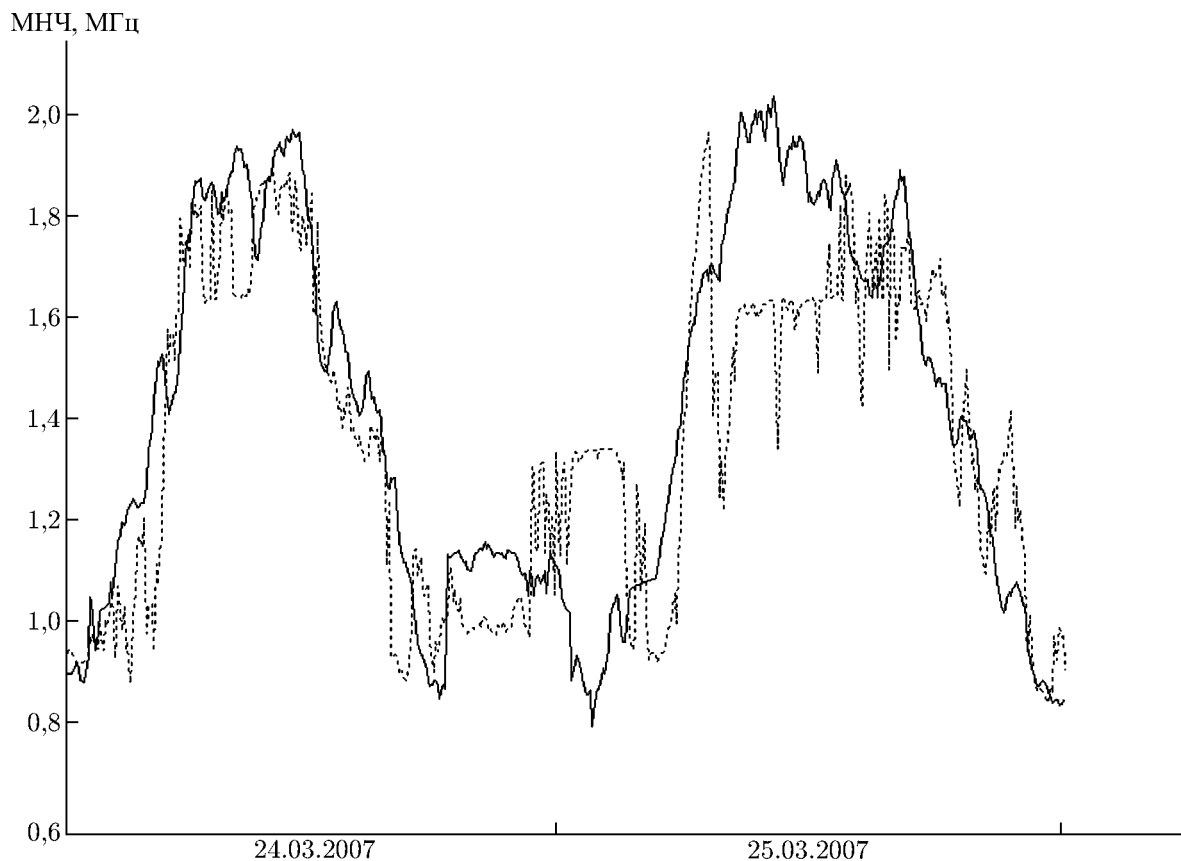


Рис. 8. Результаты нейросетевого восстановления МНЧ на трассе Иркутск—Ростов-на-Дону по данным МНЧ трассы Инскип—Ростов-на-Дону с привлечением дополнительных параметров (см. текст). Сплошной линией показаны реальные значения МНЧ на трассе Иркутск—Ростов-на-Дону, пунктирной линией — значения, восстановленные нейронной сетью

ход МНЧ на рассматриваемых трассах (рис. 7б). Это было учтено при дальнейшем выполнении нейросетевых экспериментов.

По результатам проведённого ранее (раздел 3) исследования нелинейной связи МНЧ на рассматриваемых трассах с параметрами межпланетной среды, было установлено, что наиболее сильно с возмущениями МНЧ коррелируют вариации модуля межпланетного магнитного поля  $B$  с временной задержкой 70 мин, компоненты  $B_y$  и  $B_z$  с временными задержками 70 и 10 мин соответственно, и концентрация плазмы солнечного ветра  $N$  с временной задержкой 190 мин. Таким образом, для восстановления данных МНЧ на трассе Иркутск—Ростов-на-Дону по оригинальным данным МНЧ трассы Инскип—Ростов-на-Дону на вход нейронной сети подавались следующие параметры: МНЧ на трассе Инскип—Ростов-на-Дону, указанные параметры межпланетной среды с установленными временами задержки, а также солнечный зенитный угол. На рис. 8 представлены результаты нейросетевого восстановления: сплошной линией показаны реальные значения МНЧ на трассе Иркутск—Ростов-на-Дону, пунктирной линией — значения, восстановленные нейросетью. Коэффициент линейной корреляции между реальной и восстановленной последовательностями составляет в этом случае 0,84.

Аналогично было проведено восстановление МНЧ на трассе Кипр—Ростов-на-Дону по данным МНЧ трассы Инскип—Ростов-на-Дону. На основе установленной ранее нелинейной связи (раздел 3), в качестве дополнительных параметров в этом случае были выбраны: модуль меж-

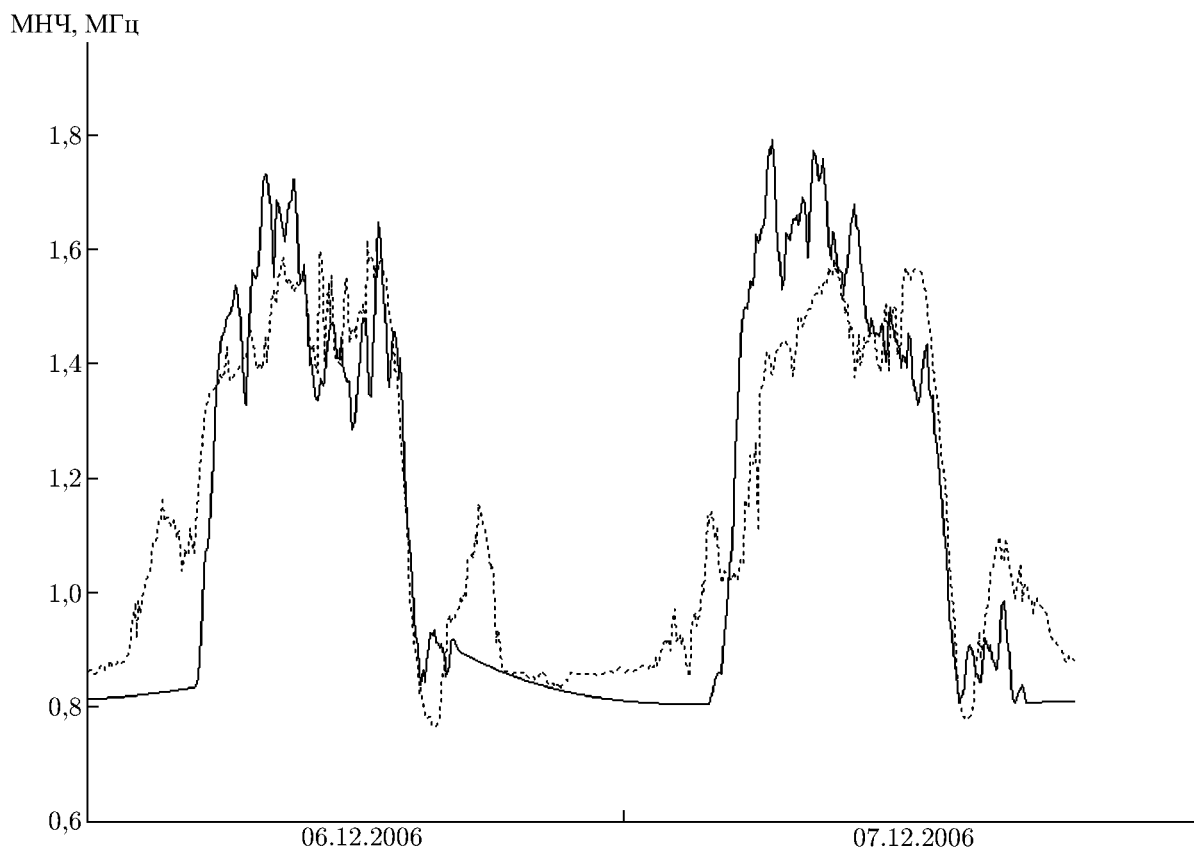


Рис. 9. Результаты нейросетевого восстановления МНЧ на трассе Кипр—Ростов-на-Дону по данным МНЧ трассы Инскип—Ростов-на-Дону с привлечением дополнительных параметров (см. текст). Сплошной линией показаны реальные значения МНЧ на трассе Кипр—Ростов-на-Дону, пунктирной линией — значения, восстановленные нейронной сетью

планетного магнитного поля  $B$  с задержкой 90 мин, и его компоненты  $B_x$  и  $B_y$  с временными задержками 30 и 110 мин соответственно. Отметим, что в этом случае на вход нейронной сети также подавался солнечный зенитный угол, который обеспечивает восстановление суточного хода МНЧ. Результаты полученного нейросетевого восстановления представлены на рис. 9. Сплошной линией показаны реальные значения МНЧ трассы Кипр—Ростов-на-Дону, пунктирной линией — данные, восстановленные нейросетью. Коэффициент линейной корреляции между реальной и восстановленной последовательностями составляет в этом случае 0,9.

Результаты проведенных нейросетевых экспериментов показывают, что возможно успешное нейросетевое восстановление МНЧ на трассах Кипр—Ростов-на-Дону и Иркутск—Ростов-на-Дону по данным МНЧ трассы Инскип—Ростов-на-Дону. Эффективность такого восстановления, которая оценивалась по значениям коэффициентов линейной корреляции между реальной и восстановленной последовательностями, составляет не менее 80 %.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе исследовано влияние вариаций параметров межпланетной среды на возмущения МНЧ субавроральной трассы Норильск—Ростов-на-Дону, среднеширотных трасс Инскип—Ростов-на-Дону и Иркутск—Ростов-на-Дону и низкоширотной трассы Кипр—Ростов-на-

Дону. На основе анализа значений параметра  $W$ , полученных при вычислении линейных корреляций возмущений МНЧ и параметров межпланетной среды, установлено:

1) На трассе Инскип—Ростов-на-Дону вариации концентрации плазмы солнечного ветра  $N$  коррелируют с возмущениями МНЧ в периоды положительных значений индекса SYM. Характерные времена задержки возмущений МНЧ относительно вариаций  $N$  составляют от 120 до 200 мин. Высокие значения линейной корреляции возмущений МНЧ и скорости солнечного ветра  $V$  характерны для периодов геомагнитной возмущённости со значениями индекса  $K_p > 3$  и  $-100 \text{ нТл} < \text{SYM} < -50 \text{ нТл}$ . Времена задержки составляют порядка  $100 \div 160$  мин. Влияние вариаций компоненты межпланетного магнитного поля  $B_y$  наиболее выражено с характерными временами задержки порядка  $200 \div 240$  мин. В дни геомагнитной возмущённости отмечено возникновение корреляции с вариациями компоненты  $B_z$  с временами от 0 до 30 мин.

2) Наибольшее влияние на возмущения МНЧ трассы Кипр—Ростов-на-Дону оказывают вариации модуля межпланетного магнитного поля. Временные задержки в этом случае имеют различные значения — от 80 до 220 мин. Далее по степени влияния следуют: вариации концентрации плазмы солнечного ветра  $N$  с характерными временами задержки от 100 до 200 мин, скорости солнечного ветра  $V$  с временными задержками порядка  $100 \div 150$  мин, и компоненты межпланетного магнитного поля  $B_z$ . Корреляция с возмущениями  $V$  и  $B_z$  имела место в периоды геомагнитной возмущённости, которая включает в себя и буревую, и суббуревую активность.

3) На трассе Норильск—Ростов-на-Дону корреляция с возмущениями параметров солнечного ветра  $N$  и  $V$  проявляется в основном в геомагнитоспокойные и слабо возмущённые дни ( $\text{SYM} > -50 \text{ нТл}$ ). Характерные временные задержки для вариаций концентрации составляют от 90 до 190 мин, скорости солнечного ветра — от 50 до 150 мин. Наличие высокой корреляции для вариаций компонент  $B_x$  и  $B_z$  межпланетного магнитного поля характерно для слабо возмущённых и возмущённых условий ( $-100 \text{ нТл} < \text{SYM} < -50 \text{ нТл}$ ), с временными задержками  $100 \div 130$  мин и  $0 \div 200$  мин соответственно.

4) На трассе Иркутск—Ростов-на-Дону отмечена высокая корреляция между возмущениями МНЧ и скорости  $V$  с задержкой  $0 \div 70$  мин. В периоды геомагнитной возмущённости преимущественно наблюдается корреляция с возмущениями концентрации  $N$  с временными задержками от 0 до 40 мин. При изучении связи с межпланетным магнитным полем обнаружено, что наибольшая корреляция наблюдается с вариациями компонент  $B_x$  и  $B_z$ . Временные задержки возмущений относительно компоненты  $B_x$  находятся в интервале от 70 до 90 мин, причём высокая корреляция в основном наблюдается в геомагнитовозмущённый период ( $-100 \text{ нТл} < \text{SYM} < -50 \text{ нТл}$ ). Степень корреляционной связи между возмущениями МНЧ и компоненты  $B_z$  не зависит от геомагнитной возмущённости.

Согласно установленным нелинейным связям, для пары трасс Инскип—Ростов-на-Дону и Кипр—Ростов-на-Дону влияние модуля и компонент  $B_x$  и  $B_y$  межпланетного магнитного поля более существенно, чем влияние параметров солнечного ветра. Отсутствие заметного проявления концентрации и скорости солнечного ветра в возмущениях в МНЧ на данных трассах возможно связано с низкой широтой расположения точек отражения трасс. Установление нелинейной связи на трассах Инскип—Ростов-на-Дону и Норильск—Ростов-на-Дону оказалось технически сложным ввиду продолжительных ночных интервалов на трассе Норильск—Ростов-на-Дону. Для пары трасс Инскип—Ростов-на-Дону и Иркутск—Ростов-на-Дону модуль  $B$  и компоненты  $B_y$  и  $B_z$  межпланетного магнитного поля, а также концентрация плазмы солнечного ветра оказали наиболее заметное влияние на возмущения МНЧ.

Вычислены характерные временные задержки возмущений МНЧ на исследуемых трассах относительно гелиогеофизических параметров. Их значения для модуля  $B$  и компоненты  $B_y$  межпланетного магнитного поля составляют  $50 \div 90$  и  $70 \div 150$  мин соответственно, для компонент  $B_x$  и

$B_z$  — от 10 до 30 мин. Установленная временная задержка для концентрации плазмы солнечного ветра  $N$  составляет  $170 \div 230$  мин.

Анализ выполненных результатов позволил разработать методику нейросетевого восстановления исходных значений МНЧ на трассах Иркутск—Ростов-на-Дону и Кипр—Ростов-на-Дону по данным МНЧ трассы Инскип—Ростов-на-Дону. При восстановлении МНЧ использовались наиболее эффективные параметры межпланетной среды с установленными задержками. Коэффициент корреляции между реальной и восстановленной последовательностями составлял при этом более 0,8. Это означает, что эффективность предлагаемой нейросетевой методики составляет не менее 80 %.

Выражаю благодарность Н. А. Бархатову за полезные обсуждения и рекомендации, В. П. Урядову, Г. Г. Вертоградову и В. Г. Вертоградову за предоставление данных по наклонному зондированию ионосферы.

Работа поддержана РФФИ (грант 09-05-00495) и программой Министерства образования и науки «Развитие научного потенциала высшей школы, 2009–2010 гг.», проект 1623.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lästovická J., Yue X., Wan W. // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. P. 593.
2. Liu H., Stolle C., Forster M., Watanabe S. // *J. Geophys. Res. A.* 2007. V. 112. P. 11 311.
3. Lu G., Holzer T. E., Lummerzheim D., et al. // *J. Geophys. Res. A.* 2002. V. 107, No. 8. P. 1 153.
4. Balan N., Bailey G. J., Jayachandran B. // *Planet. Space Sci.* 1993. V. 41. P. 141.
5. Balan N., Bailey G. J., Su Y. Z. // *Adv. Space Res.* 1996. V. 18, No. 3. P. 11.
6. Liu J. Y., Chen Y. I., Lin J. S. // *J. Geophys. Res. A.* 2003. V. 108, No. 2. P. 1 067.
7. Liu L., Wan W., Yue X., et al. // *Ann. Geophys.* 2007. V. 25. P. 1 337.
8. Ivanov V. A., Ryabova N. V., Shumaev V. V., Uryadov V. P. // *European J. Radiology.* 1997. V. 32, No. 3. P. 983.
9. Francis N. M., Brown A. G., Cannon P. S., Broomhead D. S. // *J. Geophys. Res. A.* 2001. V. 106, No. 12. P. 30 077.
10. <http://webapps.pgia.ru/apm>.
11. Бархатова О. М., Бархатов Н. А., Григорьев Г. И. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2009. Т. 52, № 10. С. 761.
12. Kamide Y., Baumjohann W., Daglis I. A., et al. // *J. Geophys. Res. A.* 1998. V. 103, No. 8. P. 17 705.
13. Дёминов М. Г. // *Плазменная гелиогеофизика.* Т. 2. М.: Физматлит, 2008. С. 92.

Поступила в редакцию 20 сентября 2010 г.; принята в печать 19 марта 2011 г.

### REFLECTION OF THE DYNAMICS OF INTERPLANETARY SPACE PARAMETERS IN THE MAXIMUM OBSERVABLE FREQUENCIES ON DIFFERENT IONOSPHERIC OBLIQUE-SOUNDING PATHS

*O. M. Barkhatova*

We study the correlation between variations in the solar–geophysical parameters and variations in the maximum observable frequencies (MOF) on several ionospheric short-wave oblique-sounding paths. The basic interplanetary space parameters, whose variations have the greatest impact on the

*О. М. Бархатова*

175

MOF variations on specified paths, are established. MOF variations in the  $B_x$  and  $B_z$  components of the interplanetary magnetic field (IMF) occur on the Norilsk — Rostov-on-Don subauroral path. The influence of the IMF components  $B_x$ ,  $B_y$ , and  $B_z$  is significant at mid-latitudes on the Inskip — Rostov-on-Don and Irkutsk — Rostov-on-Don paths. On the Cyprus — Rostov-on-Don low-latitude path, the modulus of the IMF has the most pronounced effect. The density and velocity of solar wind manifest themselves in MOF variations on all paths. The technique of MOF recovery by a neural network on the Cyprus — Rostov-on-Don and Irkutsk — Rostov-on-Don paths using the MOF data of the Inskip — Rostov-on-Don path is developed with allowance for the influence of the interplanetary space parameters. The recovery efficiency of this technique is no less than 80%.