



УДК 550.388.2

**Ф.И. Выборнов**, д.ф.-м.н., внс НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/12а

## ОСОБЕННОСТИ ИОНОСФЕРНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА В СЛОЖНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

*Ключевые слова: радиосвязь, ионосфера, распространение радиоволн, коротковолновый диапазон, ЛЧМ сигнал.*

*Рассматриваются особенности распространения радиоволн коротковолнового диапазона во время сильной геомагнитной бури, солнечного затмения 20 марта 2015 г. и 8 марта 2016 г., при кругосветном распространении через область терминатора и при искусственном возмущении ионосферы мощным радиоизлучением. Анализируются задержки линейно частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала сети станций наклонного зондирования ионосферы, принимаемого ионозондом в Нижнем Новгороде.*

Дальняя радиосвязь в коротковолновом (КВ) диапазоне длин волн широко используется на морском и речном флоте, авиации, железнодорожном транспорте. Как правило, выбор оптимальной частоты и мощности передатчика для уверенной двусторонней связи проводится заранее прогнозом условий прохождения для конкретных коротковолновых линий связи. Рабочая частота радиостанций выбирается ниже максимально применимой частоты в зависимости от времени суток, сезона и фазы 11-летнего цикла солнечной активности. Внезапное сильное изменение геомагнитного поля (магнитная буря), обычно вызванное солнечными вспышками, может приводить к резкому ухудшению качества КВ радиосвязи или полной ее потери в отдельных регионах. Учет влияния реальных геофизических условий на качество дальней коротковолновой связи продолжает оставаться важной радиофизической задачей.

В последние годы для экспериментальных исследований особенностей распространения радиоволн в КВ диапазоне широко используются ЛЧМ станции наклонного зондирования ионосферы. В нашей стране и мире в единой сети по синхронному графику работают десятки таких станций, что позволяет получать информацию о состоянии ионосферы на значительных расстояниях от зондирующей станции и оперативно управлять конкретными каналами КВ радиосвязи. Несколько ЛЧМ станций установлены и работают в режиме патрульных наблюдений в Нижегородской области.

Исследования особенностей ионосферного распространения КВ радиоволн в условиях сильной геомагнитной бури, солнечного затмения и прохождения терминатора проводились в г. Нижнем Новгороде в 2015 – 2016 гг. Регистрировался ЛЧМ сигнал, излучаемый передатчиками станций Горьковская, Ловозеро, Норильск, Салехард, Певек, Васильсурск, Соданкюля (Финляндия), Кипр (Греция), Лонгрич (Австралия) и Лавертон (Австралия). В экспериментах по искусственному воздействию на ионосферу мощным КВ излучением нагревного стенда СУРА использовалась передающая ЛЧМ станция, расположенная рядом с этим стендом.

Приемная ЛЧМ станция построена на базе приемника IC-R75, синхронизируется сигналом GPS и управляется персональным компьютером. Регистрация сигналов сети передающих станций осуществляется круглосуточно в режиме патрульных наблюдений по заданной программе без участия оператора. На экране дисплея в режиме реального времени отображается график задержки принимаемого сигнала от частоты (ионограмма), который характеризует состояние ионосферы в точке отражения (при односкачковом распространении в середине трассы), позволяет идентифицировать слои E, E<sub>s</sub>, F<sub>1</sub> и F<sub>2</sub>.

Ниже приводятся некоторые результаты, полученные во время сильной геомагнитной бури 17 – 22 марта 2015 года, интересные тем, что 20 марта этого года наблюдалось еще и солнечное затмение на большинстве трасс зондирования с наибольшим покрытием ионосферного распространения радиоволн лунной тенью до 0.8. Два независимых источника возмущения ионосферы оказывали влияние на структуру принимаемых ЛЧМ сигналов. На рис.1 приведен график временной зависимости K<sub>p</sub> индекса, характеризующий степень геомагнитного возмущения, с 16 по 22 марта 2015 года [1]. Сильная магнитная буря с максимальными значениями K<sub>p</sub> индекса до 7-8 единиц началась в 06:00 UT 17 марта 2015 г. Главная фаза этой бури продолжалась до 00:00 UT 18 марта 2015 г., а затем началась фаза восстановления, которая продолжалась до 26 марта 2015 г. Солнечное затмение проходило на фазе восстановления магнитной бури. На рис. 2 приведены ионограммы, полученные во время солнечного затмения 20 марта 2016 г. по трассе СУРА (Васильсурск) – Нижний Новгород. На ионограмме, полученной в момент кульминации солнечного затмения в 10:30 UT (рис.2б), максимальная наблюдаемая частота (МНЧ) F слоя ионосферы меньше на 0,3 МГц, чем на ионограммах, полученных на начальной (рис.2а) и завершающей стадиях (рис.2в). Во время солнечного затмения происходит генерация перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) (см. рис.2в).

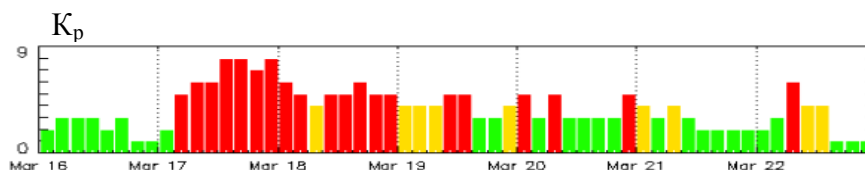


Рис.1. График временной зависимости K<sub>p</sub> индекса с 16 по 22 марта 2015 г.

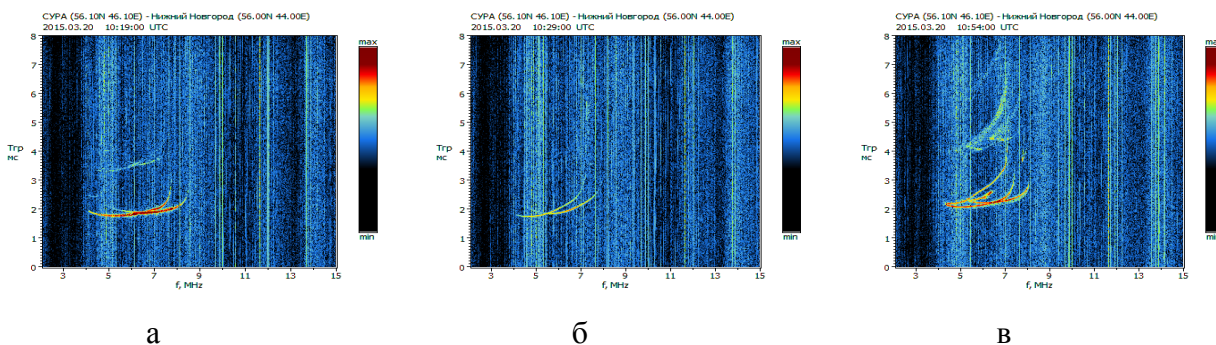


Рис. 2. Ионограммы, полученные во время солнечного затмения 20 марта 2016 г. по трассе СУРА (Васильсурск) – Нижний Новгород на начальной стадии (а), в момент кульминации (б) и завершающей стадии (в).

На ионограммах, полученных во время солнечного затмения 20 марта 2016 г. по трассе Ловозеро – Нижний Новгород (длина трассы 1378 км, интервал затмения для средней точки трассы 09:18:21÷11:29 UT, максимальная фаза 0,76) в момент кульминации в 10:24 UT МНЧ F слоя ионосферы уменьшилась на 10 ÷ 12%, а МНЧ E - на 14 ÷ 17%.

На рис.3 приведены графики зависимости МНЧ F (рис. 3а) и МНЧ E (рис. 3б) от времени. На рис. 3а сплошной линией приведен график аппроксимации данных полиномом 6-ой степени. В отличие от МНЧ F во время солнечного затмения для МНЧ E наблюдаются значительные флуктуации. Наименьшие наблюдаемые частоты (ННЧ) для F

и E слоев во время солнечного затмения увеличились, диапазон применимых для связи частот уменьшился.

Необходимо отметить, что на начальной стадии геомагнитной бури в 6:00 UT 17 марта 2015 года наблюдалось сильное поглощение ЛЧМ сигнала на всех среднеширотных трассах. На северных трассах отраженных от ионосферы сигналов не было. Сильная магнитная буря, как правило, резко ухудшает условия дальней КВ радиосвязи. Так, ионограммы, полученные 8 мая 2016 года на трассе СУРА (Васильсурск) – Нижний Новгород во время магнитной бури с  $K_p$ -индексом 5 – 7 баллов, имели слабый диффузный след отражения от F-слоя, а сам слой находился на высотах 400 – 600 км.

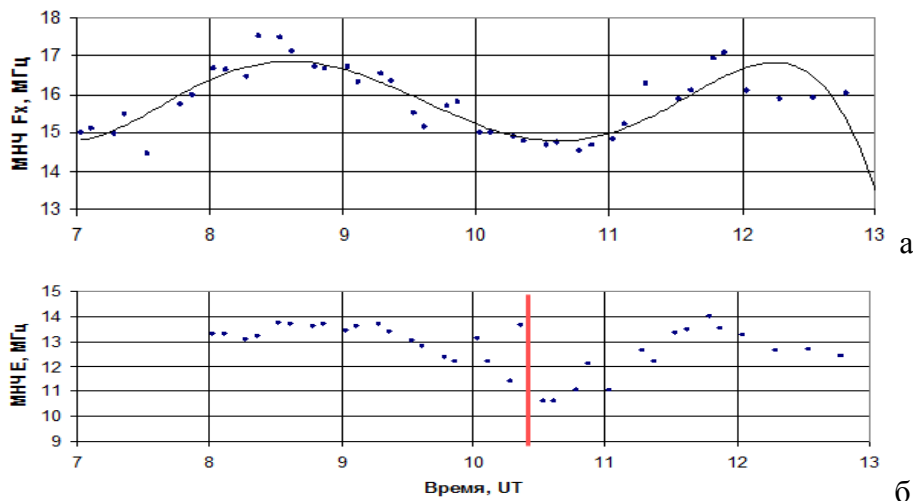


Рис.3. Графики зависимости МНЧ F (а) и МНЧ E (б) от времени для 20 марта 2015 года (вертикальной чертой отмечен момент кульминации затмения).

Восьмого марта 2016 года солнечное затмение наблюдалось в экваториальных широтах Индийского и Тихого океанов. Трасса распространения сигнала от австралийских станций Лонгрич и Лавертон проходила через область солнечного затмения. На рис. 4 приведена ионограмма, принятая в Нижнем Новгороде 8 марта 2016 года от ЛЧМ станции Лавертон до начала солнечного затмения. Сильной геомагнитной возмущенности в это время не отмечалось. Сигнал уверенно принимался в частотном интервале 5 – 12 МГц в Нижнем Новгороде до 3:00 UT 9 марта 2016 года. Прохождение области терминатора по трассе распространения радиоволн привело к рассеянию и полной потере сигнала. Пересечение областью терминатора направления распространения луча может не только приводить к прекращению связи, но при определенной геометрии линии терминатора и направления распространения радиоволны позволяет реализовать кругосветное распространение сигнала [2-4]. На рис. 5 приведена ионограмма с кругосветным эхо-сигналом (область выделена эллипсом), когда радиоволна распространялась вдоль линии терминатора от ЛЧМ станции Кипр и была принята в Нижнем Новгороде с задержкой около 146 мс. Такие сигналы наблюдаются регулярно при одновременном пересечении линии терминатора через точки расположения передающей и приемной ЛЧМ станций.

Искусственные возмущения ионосферы (мощное КВ излучение, ударные волны, химические выбросы, инжекция заряженных частиц и др.) могут приводить к эффектам, наблюдающимся при распространении электромагнитных волн в условиях геомагнитных бурь [5]. На рис. 6 приведены ионограммы, полученные на трассе СУРА (Васильсурск) – Нижний Новгород во время работы нагревного стенда СУРА. Точка отражения от ионосферы находилась в 60-ти километрах западнее центра области воздействия мощным коротковолновым излучением. Несколько минут работы нагревного стенда СУРА (эффективная мощность около 80 МВт на частоте 5,75 МГц) приводит к появлению F-рассеяния (F-spread) и многолучовости.





## FEATURES OF IONOSPHERIC RADIO WAVE PROPAGATION OF DECAMETER BAND IN COMPLEX GEOPHYSICAL CONDITIONS

Fedor Vybornov (Ivanovich)

The features of propagation of radio waves shortwaveband during a severe geomagnetic storm, the solar eclipse of March 20, 2015 and 8 March 2016, with the global propagation through the region of the terminator and artificial perturbation of the ionosphere by powerful radio emission. Analyzes the delay of the linear frequency modulated (LFM) signal network stations oblique sounding of the ionosphere received ionosonde in Nizhny Novgorod.