N E W S
OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES
ISSN 1991-346X
Volume 3, Number 307 (2016), 27 – 33

UDK 550.388.2

NEW METHOD FOR DETECTING THE DYNAMICS OF IONIZATION FLASHES IN IONOSPHERE BY A HARD- AND SOFTWARE COMPLEX OF DOPPLER MEASUREMENTS ON INCLINED TRANSMISSION PATH

N.M. Salikhov

"Institute of Ionosphere" JSC "National Center for Space Research and Technology", Almaty
un5g@rambler.ru

Key words: ionosphere, Doppler shift, ionization flash, helio-geophysical events.

Abstract. A new way for the revealing of disturbances in the ionosphere is designed on the base of modified method of Doppler measurements. A modification of Doppler measurement method allows to carry out the short- and long-term observations of the dynamics of ionization flashes in ionosphere and track disturbances in ionosphere induced by the helio-geophysical events. A specialized program package for selection of ionosphere response to these events is included into designed hardware and software complex. The efficiency of suggested method was confirmed by registration of solar flare effects on ionosphere, by connection found between seismic events and ionosphere disturbances, and by observation of the dynamic of reflected Doppler radio-splashes on the eve of and during an earthquake.

УДК 550.388.2

НОВЫЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ДИНАМИКИ ВСПЫШЕК ИОНИЗАЦИИ В ИОНОСФЕРЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫМ КОМПЛЕКСОМ ДОПЛЕРОВСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НА НАКЛОННОЙ РАДИОТРАССЕ

Н.М. Салихов

ДТОО «Институт ионосферы» АО НЦКИТ, Алматы

Ключевые слова: ионосфера, доплеровский сдвиг, вспышки ионизации, гелио-геофизические события.

Аннотация. Разработан новый способ выявления возмущений в ионосфере на основе модифицированного метода доплеровских измерений. Модификация метода доплеровских измерений позволяет проводить кратковременные и длительные наблюдения за динамикой вспышек ионизации и отслеживать возмущенность в ионосфере при гелио-геофизических событиях. В аппаратно-программный комплекс доплеровских измерений включен пакет программ, созданный специально для выявления откликов ионосферы на гелио-геофизические события. Эффективность метода подтверждена регистрацией отклика ионосферы на солнечные вспышки, выявлением взаимосвязи между уровнем сейсмичности и возмущенностью ионосферы, а также наблюдениями за динамикой количества доплеровских всплесков радиосигнала, отраженного от ионосферы, накануне и во время землетрясения.

Введение. Одним из эффективных и общепризнанных методов изучения состояния ионосферы является метод регистрации доплеровского сдвига частоты (ДСЧ) коротковолновых радиосигналов с непрерывной квазимонохроматической несущей на слабонаклонных радиотрассах [1,2,3]. Доплеровский метод позволяет эффективно регистрировать в ионосфере волновые возмущения, восходно-заходные эффекты, отклики на воздействие рентгеновского и ультрафиолетового излучения от солнечных вспышек, землетрясения, промышленные и ядерные

взрывы с временными интервалами от единиц-десятков секунд до нескольких часов [4]. В ионосфере, есть процессы более быстрые, связанные со вспышками ионизации [5], которые регистрируются как кратковременные отклонения доплеровской частоты ионосферного сигнала от нескольких герц до десятков герц. Проблема одновременной регистрации кратковременных и длительных процессов в ионосфере является наиболее сложной и актуальной. Существующие в настоящее время доплеровские методы, которые реагируют на скорость изменения электронной концентрации [6], становятся неэффективными для регистрации медленных процессов в ионосфере. Мы предположили, что проводя длительные наблюдения за динамикой вспышек ионизации, можно отслеживать состояние (возмущенность) ионосферы. В связи с этим возникла идея подсчета количества вспышек ионизации во время проведения доплеровских измерении, которая была положена в основу нового метода для исследования откликов ионосферы на гелио-геофизические события.

Метод исследования. Ранее для регистрации ионосферных возмущений в Институте ионосферы был создан аппаратно-программный комплекс (АПК) доплеровских измерений, в основу которого заложен принцип работы петли фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и реализована возможность измерения ДСЧ большего по амплитуде луча в условиях многолучевости [7,8]. Измерение ДСЧ в условиях многолучевости явилось важным преимуществом перед другими методами доплеровских измерений, позволяющим обеспечить круглосуточный режим с высоким уровнем автоматизации измерений. Дальнейшая модификация связана с внесением в функциональную схему АПК доплеровских измерений дополнительных блоков, позволяющих выделять кратковременные всплески ионизации в ионосфере. На рисунке 1 представлена функциональная схема АПК с дополнительными блоками (дополнительные блоки представлены цветными прямоугольниками).

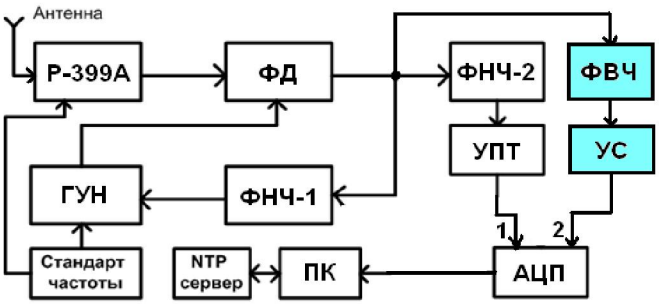


Рисунок 1 - Функциональная схема приемной установки с дополнительными блоками для измерения доплеровского сдвига частоты радиосигнала, отраженного от ионосферы, и кратковременных вспышек ионизации в ионосфере

В состав оборудования аппаратно-программного комплекса доплеровских измерений входят следующие функциональные элементы:

Р-399А - радиоприемное устройство.

ГУН – генератор, управляемый напряжением. В качестве генератора, управляемого напряжением, используется синтезатор частот Ч6-31.

Стандарт частоты - рубидиевый стандарт частоты.

ФД - фазовый детектор.

ФНЧ-1 - аналоговый пропорционально-интегрирующий фильтр нижних частот.

ФНЧ-2 - аналоговый фильтр нижних частот.

УПТ - усилитель постоянного тока с регулируемым коэффициентом усиления.

АЦП - двенадцатиразрядный восьмиканальный аналого-цифровой преобразователь фирмы L-Card типа E-154.

ПК - персональный компьютер.

NTP-сервер - сервер атомного стандарта частоты и времени.

ФВЧ - аналоговый фильтр высоких частот.

УС - усилитель с регулируемым коэффициентом усиления.

Сигнал от радиопередатчика со стабильностью не хуже 10^{-9}f, отразившись от ионосферы, принимается антенной и поступает на радиоприемное устройство Р-399А и далее на фазовый детектор (ФД). На другой вход ФД подается сигнал от генератора управляемого напряжением (ГУН). Сигнал с выхода ФД в виде напряжения постоянного тока воздействует на ГУН и подстраивает его под частоту принимаемого сигнала, причем изменение напряжения с выхода ФД пропорционально доплеровскому сдвигу частоты. Сигнал, пройдя ФНЧ-2 и усилитель постоянного тока (УПТ), оцифровывается одним из каналов аналого-цифрового преобразователя (АЦП), далее данные сохраняются в файле в памяти персонального компьютера (ПК). Синхронизация бортового времени компьютера осуществляется по сети Интернет от NTP-сервера атомного стандарта частоты и времени. Для регистрации кратковременных доплеровских выбросов в функциональную схему комплекса были введены фильтр высоких частот (ФВЧ) и усилитель (УС).

Из сигнала с выхода ФД отфильтровывается высокочастотная составляющая фильтром ФВЧ и далее после усиления этот сигнал оцифровывается с частотой 25 Гц вторым каналом АЦП, затем сохраняется в файле на диске ПК. Подсчет и построение графика вариаций доплеровских выбросов от времени производятся с помощью специально написанной для этих целей компьютерной программой.

Результаты исследования и их обсуждение. В этом разделе приводятся результаты исследований, выполненные с применением нового метода регистрации вспышек ионизации, на основе АПК доплеровских измерений на наклонной радиотрассе.

На рисунке 2 представлены записи кратковременных выбросов, зарегистрированных АПК доплеровских измерений за 300 секундный интервал времени 30 мая 2014 г.

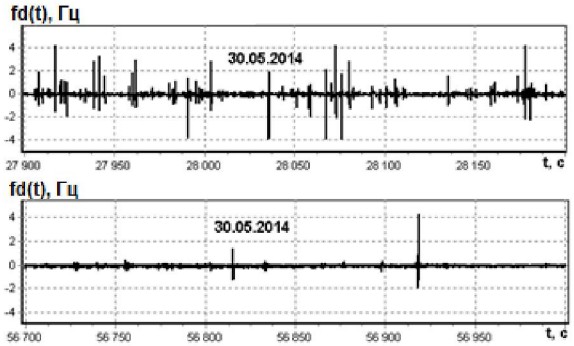


Рисунок 2 - Пример записи доплеровских выбросов в разное время суток 30 мая 2014г.
По оси X - время в секундах от начала суток по времени GMT

На верхнем графике видно, что в интервале 300 секунд зарегистрировано около 20 всплесков. На нижнем графике за такой же период времени зарегистрировано только два всплеска. Установлено, что частота появления этих всплесков (назовем их доплеровскими выбросами) меняется с течением времени. На рисунке 3 представлены результаты одновременного наблюдения текущего спектра ионосферного сигнала (рис.3а) и кратковременных доплеровских выбросов (рис.3б) радиосигнала (11885 кГц) вещательной радиостанции из г.Урумчи (КНР). Наблюдение за ионосферными всплесками провели с помощью спектроанализатора, подключенного на выход радиоприемного устройства и доплеровского комплекса.

В верхнем окне (рис.3а) представлен спектр принимаемого ионосферного сигнала в конкретный момент времени, в нижнем окне - динамика спектра, где хорошо видны два кратковременных уширения полосы спектрального пика до 20 Гц и более. В то же самое время доплеровским комплексом зарегистрированы кратковременные выбросы частоты длительностью от 0,3 до 0,6-0,8 секунд (рис.3б).

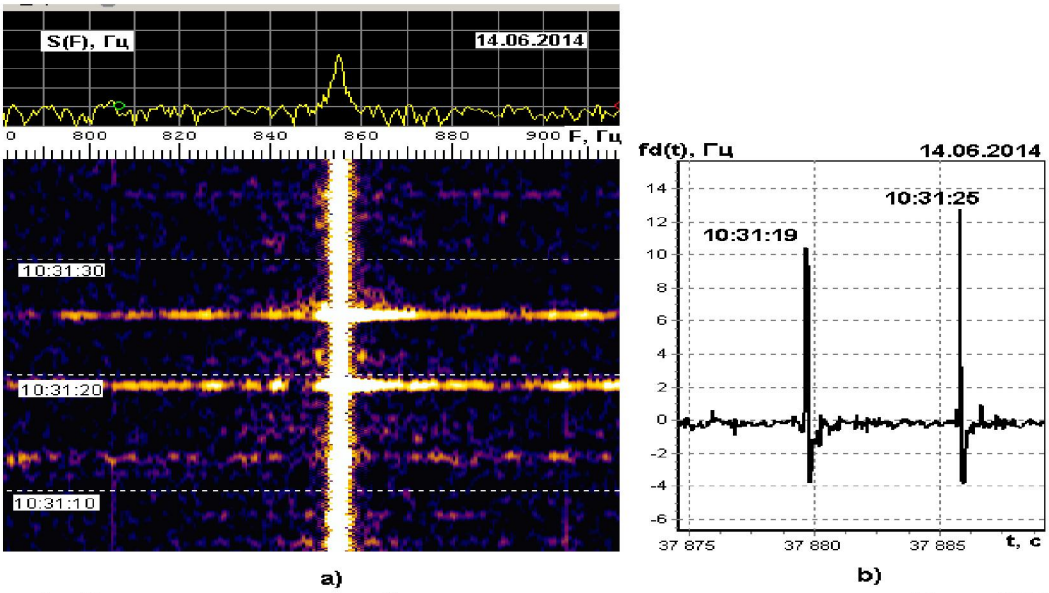


Рисунок 3 - Пример кратковременных выбросов доплеровских частот, зарегистрированных 14 июля 2014 года спектроанализатором (а) и аппаратно-программным комплексом доплеровских частот (б). По оси X - время в секундах от начала суток по времени GMT.

Проверка работоспособности нового метода регистрации вспышек ионизации АПК доплеровских измерений на наклонной радиотрассе была осуществлена также во время солнечных рентгеновских вспышек. На рисунке 4 приведены данные измерений доплеровских частот во время рентгеновской вспышки на Солнце класса C8.7, произошедшей 10 мая 2014г. Рентгеновская вспышка по данным спутника GOES-15 представлена на графике 1. В это время в ионосфере зарегистрирован отклик на рентгеновскую вспышку как значимое увеличение количества выбросов доплеровской частоты (график 2). Вариации доплеровского сдвига частоты сигнала, отраженного от ионосферы, представлены на графике 3, где желтым цветом выделен сигнал после фильтрации скользящим средним.

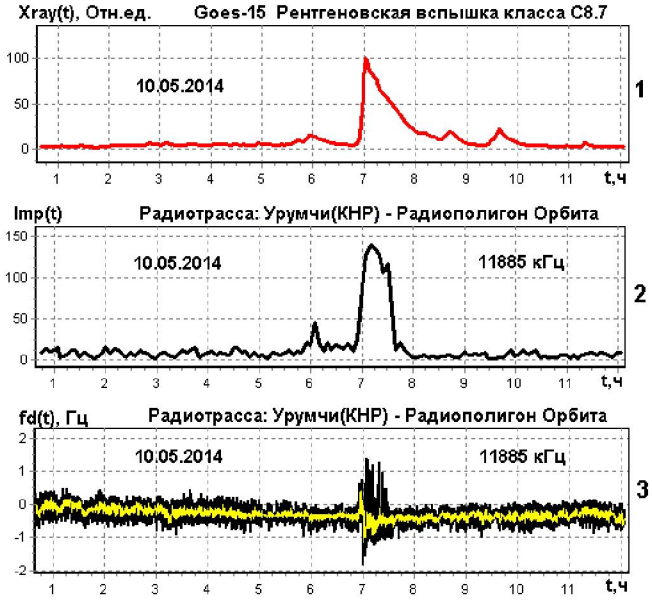
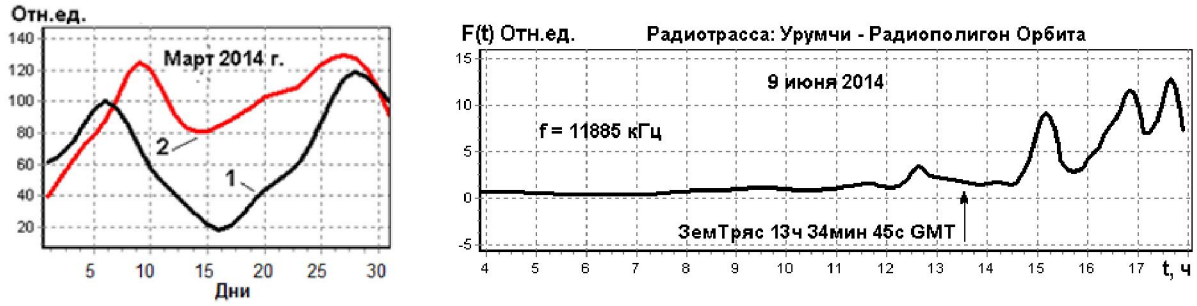


Рисунок 4 - Отклик в ионосфере на солнечную рентгеновскую вспышку класса C8.7 по измерениям доплеровского сдвига частоты на Радиополигоне Орбита 10 мая 2014г. Обозначения: 1 - всплеск рентгеновских лучей по данным спутника Goes-15, 2 -скорость изменения во времени количества импульсов (выбросов доплеровской частоты) за 5-ти минутный интервал, 3 - вариации доплеровского сдвига частоты сигнала, отраженного от ионосферы. По оси X - время в часах от начала суток по времени GMT

Таким образом, метод регистрации вспышек ионизации АПК доплеровских измерений надежно зарегистрировал отклик в ионосфере на рентгеновскую вспышку, как в вариациях доплеровских частот, так и в изменении количества доплеровских выбросов.

Опираясь на указанную методику, мы предприняли попытку выявить взаимосвязь между уровнем сейсмичности (в зоне, контролируемой сейсмической сетью наблюдений Института геофизических исследований НЯЦ РК) и вариациями доплеровских выбросов ионосферных сигналов. Отметим, что подготовка крупных землетрясений происходит в течение длительного времени месяцев-лет. Используемый нами ранее доплеровский метод измерений [7], в основе которого используется принцип работы ФАПЧ, позволяет регистрировать ионосферные возмущения с периодом от единиц-десятков секунд до нескольких часов. Однако к измерениям более длинных периодов он мало пригоден, так как, чем медленнее скорость изменения электронной концентрации в области отражения радиоволны в ионосфере, тем меньше доплеровский сдвиг. Предложенный метод подсчета количества вспышек ионизации в ионосфере существенно дополнил и расширил возможности доплеровских измерений именно в области долговременных эффектов в ионосфере с периодами порядка месяца и более. На рисунке 5а представлены данные доплеровских измерений за март 2014 года на пункте «Радиополигон Орбита» и данные количества землетрясений на сейсмоактивной территории, контролируемой сейсмической сетью наблюдений ИГИ НЯЦ РК за этот же период. Ограниченность анализа по времени одним месяцем объясняется тем, что в 2014 году непрерывные данные по доплеровским измерениям были получены только в марте месяце. Для доплеровских измерений использовали передатчик вещательной радиостанции из п. Красная речка (Киргизия), работающий на частоте 4820 кГц. Суточные данные количества землетрясений на сейсмоактивной территории взяты на сайте kndc.kz. На рисунке 5а видно, что суточные изменения количества землетрясений хорошо отслеживаются в изменении количества ионосферных доплеровских выбросов с задержкой в 2-3 дня. Для удобства сравнительного анализа данные приведены в относительных единицах.



а) б)

Рисунок 5 - Взаимосвязь между уровнем сейсмичности и количеством доплеровских всплесков радиосигнала, отраженного от ионосферы.
а) - сейсмичность территории, по данным kndc.kz (1), количество доплеровских всплесков радиосигнала (2). По оси X- время в днях от начала месяца; б) - вариации количества выбросов доплеровских частот по 5-ти минутным интервалам во время землетрясения 9 июня 2014г. Вертикальной стрелкой обозначено время землетрясения. По оси X - время в часах от начала суток по времени GMT.

На рисунке 5б представлены вариации доплеровских всплесков во время землетрясения, произошедшего 9 июня 2014 года в 13 часов 34 минуты по Гринвичу в приграничном районе Казахстана и Китая, в 335 км к северо-востоку от г.Алматы. Координаты эпицентра землетрясения: 44.86 градуса северной широты, 80.44 градуса восточной долготы, энергетический класс К=11.1, магнитуда mb=4.8, глубина h=3 км (kndc.kz). Землетрясение произошло в 138 км от проекции на землю точки отражения радиоволны радиотрассы Урумчи (КНР) — Радиополигон Орбита на частоте 11885 кГц.

На рисунке видно, что примерно за 1 час 40 минут до землетрясения произошло увеличение количества выбросов доплеровских частот с последующим нарастающим трендом и значительным ростом вслед за основным сейсмическим толчком. Необходимо отметить, что доплеровский

эффект от землетрясения мог быть скрыт ростом ионосферных возмущений, связанных с заходом Солнца. Поэтому, не умаляя значимости повышения количества выбросов до землетрясения - как возможного предвестника землетрясения, считаем преждевременным обсуждать особенности отсроченного эффекта, зарегистрированного после сейсмического события. Появление возмущений в ионосфере до и во время землетрясений связывают с возникновением сейсмогенной ионосферной перемещающейся неоднородности, характеризующейся положительным отклонением электронной концентрации [9,10]. Выявление таких сейсмогенных ионосферных перемещающихся неоднородностей авторы рассматривают как предвестники землетрясений.

Методика регистрации динамики ионосферных вспышек при доплеровских измерениях может быть рекомендована для мониторинга возмущенности ионосферы при различных гелио-геофизических событиях и для поиска ионосферных аномалий перед готовящимися землетрясениями.

Выводы.

1. Разработан новый способ выявления возмущений в ионосфере на основе модифицированного метода доплеровских измерений.

2. Модификация метода доплеровских измерений позволяет проводить кратковременные и длительные наблюдения за динамикой вспышек ионизации и отслеживать возмущенность в ионосфере при гелио-геофизических событиях:

- зарегистрирован отклик ионосферы на солнечные вспышки;
- выявлена взаимосвязь между уровнем сейсмичности и возмущенностью ионосферы на протяжении марта 2014 г;
- зарегистрировано повышение количества доплеровских всплесков радиосигнала, отраженного от ионосферы, накануне землетрясения 09.06.2014г., магнитудой mb=4.8.

3. Методика регистрации динамики ионосферных вспышек при доплеровских измерениях может быть рекомендована для мониторинга возмущенности ионосферы при различных гелио-геофизических событиях и для поиска ионосферных аномалий перед готовящимися землетрясениями.

Работа выполнена в рамках проекта: «Изучить структуру и динамику потока космических лучей, геомагнитного поля, ионосферы и атмосферы с целью диагностики и прогноза состояния ближнего космоса», ДТОО «Институт ионосферы» АО НЦКИТ АГКИ МИР Республика Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Watts J.M., Davis K. Rapid frequency analisis of fading radio signals. *Journal of Geophysical Research,* **1960**, V.65, pp.2295-2299.

[2] Davis K., Watts J.M. and Zacharisen. A study of F2 layer effects as observed with a doppler technique. *Journal of Geophysical Research,* **1962,** V.67, №2, pp. 601-609.

[3] Намазов С.А., Новиков В.Д., Хмельницкий И.А. Допплеровское смещение частоты при ионосферном распространении декаметровых волн. Препринт №2 (87), *ИЗМИРАН СССР*, **1974**, 28 с.

[4] Краснов В.М., Салихов Н.М., Жумабаев Б.Т. История и перспективы доплеровского метода исследования ионосферы в Казахстане. *Геодинамика и солнечно-земные связи*, Алматы, **2013**, с. 214 – 222.

[5] Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Изд-во «Мир», **1973**, 501 с.

[6] Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн в ионосфере. Изд-2, переработанное и дополненное. М.: Изд-во «Наука», **1972**, 564 с.

[7] Салихов Н.М., Сомсиков В.М. Аппаратно- программный комплекс для регистрации доплеровского сдвига частоты ионосферных радиосигналов над очагами землетрясений. *Известия НАН РК серия физико-математическая*, **2014**, №4, с. 116-121.

[8] Салихов Н.М. Отклик ионосферы на акустические источники возмущений естественного и искусственного происхождения. *Канд. дисс.* Алма-Ата, **1984,** 165 с.

[9] Калинин Ю. К., Сергеенко Н. П. Макромасштабные движущиеся неоднородности, возникающие в ионосфере за несколько часов до сильных землетрясений. *Доклады РАН*, **2002,** Т.387, №1, с.105.

[10] Kalinin Y. K., Sergeenko N. P., Sergeenko N.P., Shubin V.N. The large-scale isolated disturbances dynamics in the main peak of electronic concentration of ionosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **2003,** v.65, Issue 11-13, pp.1175-1177.

REFERENCES

[1] Watts J.M., Davis K. Rapid frequency analisis of fading radio signals. Journal of Geophysical Research, 1960, V.65, pp.2295-2299 (in Eng.).

[2] Davis K., Watts J.M. and Zacharisen. A study of F2 layer effects as observed with a doppler technique. Journal of Geophysical Research, 1962, V.67, №2, pp. 601-609 (in Eng.).

[3] Namazov S.A., Novikov V.D., Hmel'nickij I.A. Dopplerovskoe smeshhenie chastoty pri ionosfernom rasprostranenii dekametrovyh voln. Preprint №2 (87), IZMIRAN SSSR, 1974, 28 s (in Russ.).

[4] Krasnov V.M., Salikhov N.M., Zhumabaev B.T. Istorija i perspektivy doplerovskogo metoda issledovanija ionosfery v Kazahstane. Geodinamika i solnechno-zemnye svjazi, Almaty, 2013, s. 214-222 (in Russ.).

[5] Djevis K. Radiovolny v ionosfere. M.: Izd-vo «Mir», 1973, 501 s (in Russ.).

[6] Alpert Ja.L. Rasprostranenie jelektromagnitnyh voln v ionosfere. Izd-2, pererabotannoe i dopolnennoe. M.: Izd-vo «Nauka», 1972, 564 s (in Russ.).

[7] Salikhov N.M., Somsikov V.M. Apparatno- programmnyj kompleks dlja registracii doplerovskogo sdviga chastoty ionosfernyh radiosignalov nad ochagami zemletrjasenij. Izvestija NAN RK serija fiziko-matematicheskaja, 2014, №4, s. 116-121 (in Russ.).

[8] Salikhov N.M. Otklik ionosfery na akusticheskie istochniki vozmushhenij estestvennogo i iskusstvennogo proishozhdenija. Kand. diss. Alma-Ata, 1984, 165 s (in Russ.).

[9] Kalinin Ju. K., Sergeenko N. P. Makromasshtabnye dvizhushhiesja neodnorodnosti, voznikajushhie v ionosfere za neskol'ko chasov do sil'nyh zemletrjasenij. Doklady RAN, 2002, T.387, №1, s.105 (in Russ.).

[10] Kalinin Y. K., Sergeenko N. P., Sergeenko N.P., Shubin V.N. The large-scale isolated disturbances dynamics in the main peak of electronic concentration of ionosphere. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2003, v.65, Issue 11-13, pp.1175-1177 (in Eng.).

КӨЛБЕУ РАДИОЖОЛЫНДА ИОНОСФЕРА ОШАҚТАРЫН АППАРАТТЫҚ-БАҒДАРЛАМАЛЫҚ КЕШЕНІНІҢ ДОПЛЕРЛІК ӨЛШЕУ ИОНДАЛУЫНЫҢ ДИНАМИКАСЫН АНЫҚТАУДЫҢ ЖАҢА ӘДІСІ

Н.М. Салихов

«Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы» АҚ, Алматы

Түйін сөздер: ионосфера, доплерлік ауысу, ионизациялық жарқыл, гелио-геофизикалық оқиға.

Аннотация. Ионосферада модификациялық әдіспен доплерлік өлшеу арқылы наразылықты анықтаудың жаңа түрі құрылды. Доплерлік өлшеу әдісі гелио-геофизикалық шараларда ионосфера иондалуының соққылары мен трек тәртіпсіздіктің динамикасын қысқа мерзімді және ұзақ мерзімді бақылау өзгертуге мүмкіндік береді. Аппараттық-бағдарламалық кешенде доплерлік өлшеудің арнайы гелио-геофизикалық ортада ионосфералық жауапты анықтау үшін жаңа бағдарламалық қамтамасыз ету пакеті енгізілген. Әдістің тиімділігі күннің жарқылының ионосферада тіркелуі, сейсмикалық литосфера мен ионосфералық наразылықтың қарым-қатынасы және де жер сілкінісің жақындауынды және жер сілкінісі уақытында ионосферада шағылған радиосигналдардың доплерлік жарқылдың динамикалық санын бақылауда расталған

Поступила 17.06.2016 г.