

УДК 550.388.1:621.396.969

Я. Н. ЧЕПУРНЫЙ, Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, Д. А. ИСКРА**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПОМЕХ ОТ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ОЦЕНКА ИХ ВЛИЯНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ**

Проведен анализ помех, создаваемых отражениями от летательных аппаратов на расстоянии до 400 км и принимаемых боковыми лепестками диаграммы направленности антенны радара некогерентного рассеяния. Определены условия, при которых могут возникать помехи от летательных аппаратов, находящихся на высоте около 10 км над поверхностью земли. Приведены экспериментальные данные, иллюстрирующие влияние указанных помех на результаты ионосферных измерений.

Ключевые слова: радар некогерентного рассеяния, измерение ионосферных параметров, отражения от летательных аппаратов.

Введение. Радар некогерентного рассеяния (НР) Института ионосферы (г. Харьков) оснащен неподвижной антенной зенитной ориентации диаметром 100 м (НДА-100). При проведении измерений параметров ионосферной плазмы методом НР уровень рассеянного ионосферой сигнала, как правило, соизмерим с уровнем собственных шумов системы. Отражения от объектов, попадающих в диаграмму направленности (ДН) антенны на удалении от 100 до 3000 км являются помехами, оказывающими влияние на достоверность ионосферных измерений. К таким объектам относятся техногенные космические объекты (в том числе, космический мусор), а также, при некоторых условиях, летательные аппараты.

Помехи от космических объектов, имеющих, как правило, небольшие габариты возникают в результате приёма отражений главным и первыми боковыми лепестками ДН. Из-за космической скорости объектов помехи имеют продолжительность в единицы секунд.

Пример такого отражения на дальности около 1700 км приведен на рис. 1. Здесь, на левом графике, по оси абсцисс – время (номера дискретных отсчетов, следующих через 41 мс, длительность сеанса измерений в 1 мин соответствует 1464 отсчетам), по оси ординат – амплитуда сигнала. На правом графике по оси абсцисс – мощность принимаемого сигнала, по оси ординат – дальность в километрах. Легко определить, что время наблюдения отражения составило около восьми секунд.

Сигналы отражений от летательных аппаратов могут приниматься только боковыми лепестками ДН антенны (вследствие её зенитной ориентации). Небольшие значения усиления антенны по боковым лепесткам компенсируются большой площадью отражения, а из-за значительно меньшей скорости летательных аппаратов, помехи имеют существенно большую продолжительность – до нескольких минут. Пример наблюдения такого отражения на дальности около 320 км приведен на рис. 2.

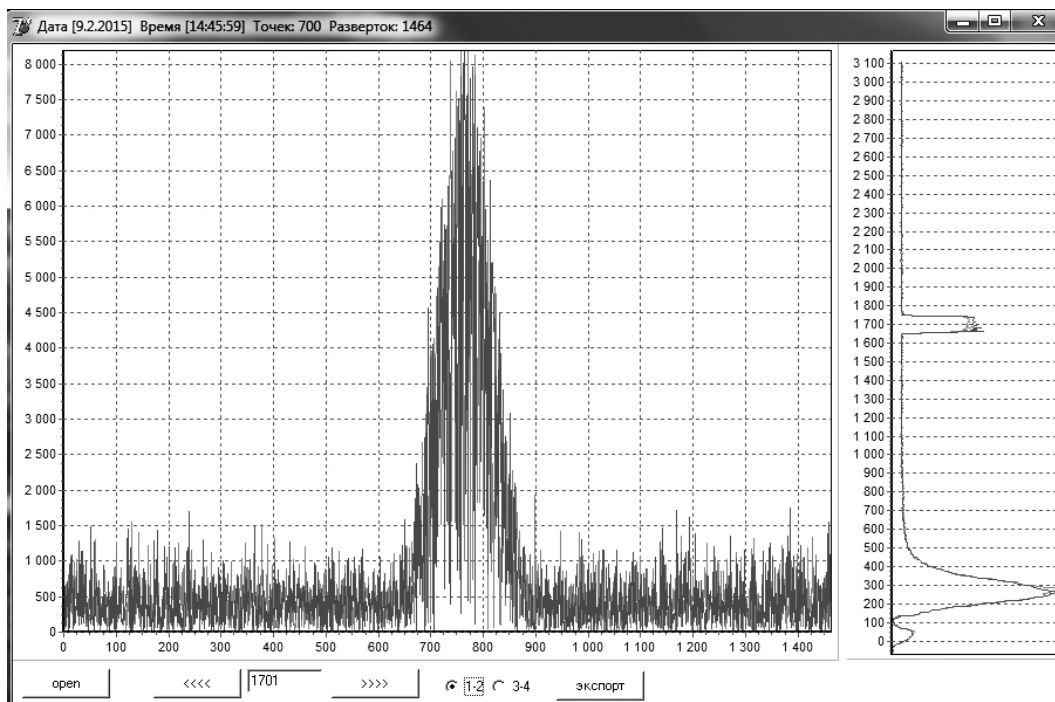


Рис. 1 – Пример наблюдения отражения от техногенного космического объекта

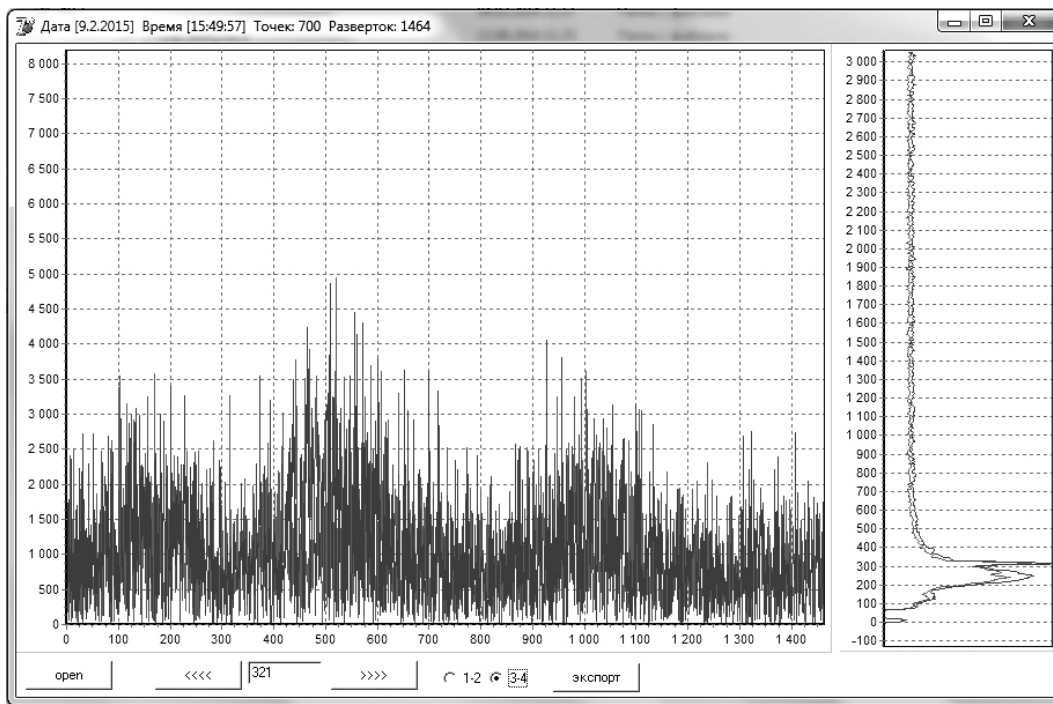


Рис. 2 – Пример наблюдения отражения от летательного аппарата

Цель статьи – определить условия возникновения и возможные источники помех от летательных аппаратов, оценить их влияние на результаты измерения ионосферных параметров.

Анализ условий возникновения помех от летательных аппаратов. Оценим мощность отражений на входе приёмника радара НР при условии их приёма боковыми лепестками ДН антенны. Уровень боковых лепестков (УБЛ) можно оценить по сечению ДН антенны, приведенном на рис. 3. Видно, что в направлении близком к горизонту (т. е. к 90°) УБЛ составляет -37.5 дБ. Это соответствует значениям коэффициента усиления $G_a = 3.6$ дБ (или 2.3 раз) и эффективной площади антенны $A_{эфф} = 0.66$ м².

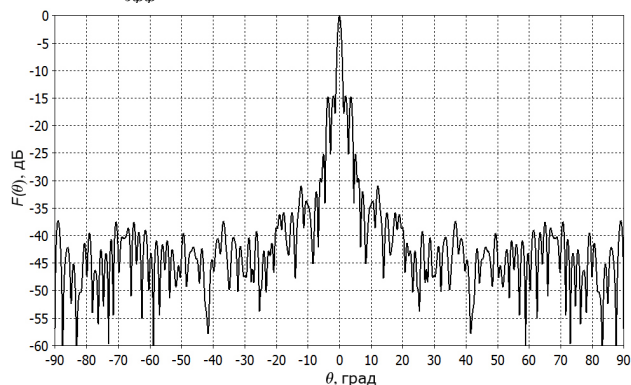


Рис. 3 – Сечение ДН антенны НДА-100 в вертикальной плоскости

Мощность отраженного сигнала на входе приёмника радара НР равна [1]

$$P_{отр} = \frac{P_u G_a A_{эфф} S_{эфф}}{16\pi^2 r^4}, \quad (1)$$

где P_u – выходная мощность передатчика радара НР, G_a – коэффициент усиления антенны в направлении отражающего объекта, $A_{эфф}$ – эффективная площадь антенны в том же направлении, $S_{эфф}$ – эффективная площадь рассеяния объекта в направлении радара НР, r – расстояние до отражающего объекта.

Эффективная площадь рассеяния современных широкофюзеляжных самолетов может достигать очень больших значений, особенно при их ориентации по нормали к направлению на радар НР. В качестве оценки можно использовать соотношение для эффективной площади рассеяния объекта в виде прямоугольной площадки со сторонами a и b [1]

$$S_{эфф} = \frac{4\pi}{\lambda^2} (ab)^2, \quad (2)$$

где $\lambda = 1.9$ м – рабочая длина волны радара НР.

В таблице 1 приведены габаритные размеры некоторых широкофюзеляжных авиалайнеров [2].

Таблица 1 – Габаритные размеры некоторых авиалайнеров

	Boeing 747-400	Boeing 777-300ER	Airbus A330-343	Airbus A380-800
Длина, м	70.6	73.9	63.69	73.0
Размах крыла, м	64.4	64.8	60.3	79.75
Высота киля, м	19.4	18.6	16.9	24.09
Ширина фюзеляжа, м	6.5	6.2	5.64	7.14

Поскольку практический интерес представляет вариант расположения летательного аппарата вблизи линии горизонта, то очевидно, что существенное значение имеют длина и ширина фюзеляжа (вид

сбоку). Подставив в (2) эти значения для Airbus A380-800 получим $S_{эфф} = 59.7$ дБкв.м (дБ относительно 1 кв. м).

Другая оценка $S_{эфф}$, а также диаграмма обратного рассеяния (ДОР) были получены авторами для цилиндра из алюминия (металл с потерями), соответствующего размерам фюзеляжа Airbus A380-800, при компьютерном моделировании. Полученная ДОР приведена на рис. 4. Из неё следует, что при положении оси цилиндра по нормали относительно направления на радар НР эффективная площадь рассеяния имеет максимальное значение $S_{эфф} = 44.9$ дБкв.м, что соответствует 30900 м^2 . ДОР имеет изрезанный характер с узкими главным и боковыми лепестками. $S_{эфф}$ уменьшается до 1000 м^2 при отклонении цилиндра от нормали на $\pm 2.5^\circ$ и до 100 м^2 при отклонении на $\pm 8.4^\circ$.

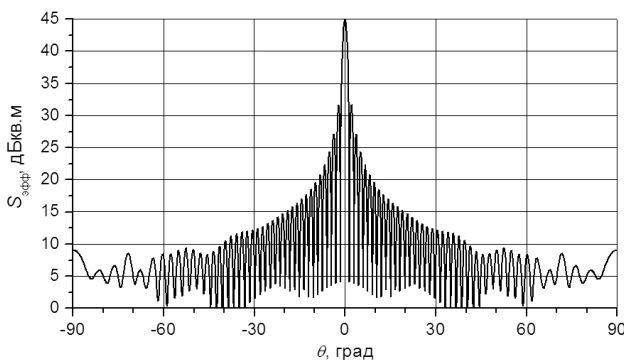


Рис. 4 – Диаграмма обратного рассеяния цилиндра диаметром 7.14 м и длиной 73 м

Подставляя в (1) полученные выше значения G_a , $A_{эфф}$ и значения $S_{эфф}$, при мощности передатчика $P_{и} = 2$ МВт и дальности до летательного объекта $r = 350$ км получим мощности отражения на входе приёмника радара НР, равные 1.3×10^{-16} Вт, 1.3×10^{-15} Вт, для $S_{эфф}$ равной 100 м^2 и 1000 м^2 соответственно.

Мощность шумов $P_{ш}$ на входе приёмника определяется как [1]

$$P_{ш} = kT_c \Delta f, \quad (3)$$

где $k = 1.38 \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана,

T_c – шумовая температура системы, учитывающая шумы неба, тепловые шумы антенны и фидера,

Δf – полоса пропускания приёмника.

Для рассматриваемого радара НР, работающего в метровом диапазоне длин волн, $T_c = 570 \text{ К}$, $\Delta f = 20$ кГц. Тогда, получим $P_{ш} = 1.1 \times 10^{-16}$ Вт. Отношения помеха/шум равны 1.2 и 12 для $S_{эфф}$ равной 100 м^2 и 1000 м^2 соответственно. В максимуме ДОР, когда фюзеляж самолета расположен по нормали к лучу лепестка ДН антенны радара НР, отношение помеха/шум, для рассматриваемого случая, может достигать 365. При дальности до летательного аппарата $r = 400$ км отношение помеха/шум становится больше единицы при $S_{эфф} = 135 \text{ м}^2$, при $r = 150$ км – уже при $S_{эфф} = 3 \text{ м}^2$, а при дальности $r = 100$ км – при $S_{эфф} = 0.6 \text{ м}^2$.

Таким образом, мощность импульсов, отраженных от летательных аппаратов и принимаемых боковыми лепестками ДН антенны, на входе приёмника может значительно превышать мощность полезного НР сигнала и мощность собственных шумов системы.

Летательный аппарат, создающий отражения зондирующего сигнала должен находиться в зоне прямой видимости для антенны радара НР. Дальность прямой видимости, с учетом сферичности Земли, определяется выражением [3]

$$r_e \approx 3.57\sqrt{h}, \quad (4)$$

где r_e – дальность прямой видимости (в километрах), h – высота объекта над поверхностью земли (в метрах).

Из этого выражения следует, что при высоте летательного аппарата 10000 м, дальность его прямой видимости составляет 357 км. Высоты 0.8 км достаточно для обеспечения дальности прямой видимости в 100 км. Большинство воздушных судов гражданской авиации имеют ограничение по максимальной высоте полета около 13 км, что соответствует дальности их прямой видимости 407 км.

Зона прямой видимости может ограничиваться рельефом местности, в которой расположен радар НР. Карты рельефа местности доступны, например, в [4]. Их анализ показал, что максимальные углы закрытия ДН антенны радара НР составляют 1.55° в юго-восточном, 1.43° – в западном и 1.3° – в южном направлении. В других направлениях углы закрытия составляют от 0 до 0.47° . По известным углам закрытия были определены дальности прямой видимости объектов, находящихся на высоте 10 км над поверхностью земли. Это позволило очертить зону прямой видимости, в которой могут возникать отражения от летательных аппаратов. На рис. 5 представлена карта местности с нанесенной темным цветом расчетной зоной прямой видимости.

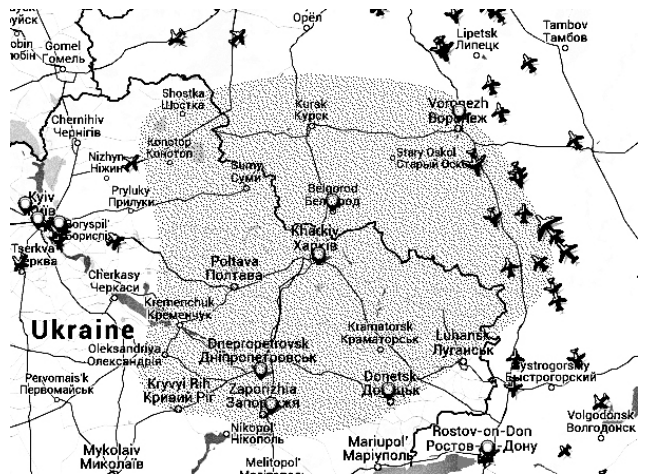


Рис. 5 – Зона видимости радаром НР летательных аппаратов на высоте 10 км

Положение летательных аппаратов в реальном времени доступно для просмотра на сайте [5]. Было

установлено, что в правой части зоны видимости (см. рис. 5), соответствующей восточному и северо-восточному направлениям относительно радара НР, находится одновременно до 10 летательных аппаратов, среди которых есть как небольшие, так и крупногабаритные широкофюзеляжные авиалайнеры. По каждому из них на сайте [5] приведена информация, в том числе, указан тип воздушного судна и высота над уровнем земли. Следует отметить, что среди них значительное число составляют аппараты, приведенные в таблице 1, а их высота над уровнем земли, как правило, находится в пределах 10-11.5 км. Эти факторы являются определяющими в образовании помех радару НР.

Экспериментальные результаты. На радаре НР с антенной НДА-100 зондирование ионосферы осуществляется составным двухчастотным радиоимпульсом с длительностью элементов 650 и 135 мкс. Для этих элементов зондирующего сигнала имеются отдельные каналы приёма и обработки ионосферной информации. Помехи от летательных аппаратов имеют большее влияние на высотный профиль мощности сигнала, некогерентно рассеянного ионосферой от короткого зондирующего импульса (см. рис. 2). Влияние помех на профиль мощности НР сигнала по каналу длинного импульса менее заметно, из-за худшего разрешения по дальности. Однако эхо-сигнал от длинного импульса используется для определения основных ионосферных параметров, которые, вследствие наличия помехи, могут определяться некорректно.

Следует отметить, что характерным признаком помех, вызванных отражениями от летательных аппаратов, является появление гармонической составляющей в отраженном сигнале даже при небольшой их амплитуде по отношению к полезному НР сигналу.

На рис. 6–8 представлены результаты измерений ионосферных параметров в виде трех последовательных одноминутных сеансов наблюдения (по каналу длинного импульса).

На графиках представлены высотные распределения следующих параметров: автокорреляционной функции (АКФ) НР сигнала, спектра НР сигнала, отношения сигнал/шум, измеренного сечения рассеяния ионосферной плазмы и кинетических температур электронов T_e и ионов T_i . Наиболее чувствительным к рассматриваемым помехам оказался спектр НР сигнала, форма которого, при наличии отражений, существенно изменяется, часто с двугорбой на одnogорбую (см. рис. 7). В свою очередь, изменение формы спектра ведет к некорректному определению температур ионов и электронов на интервалах высот, соответствующих расстоянию до источника помех. На рис. 6 представлен начальный этап появления помехи на дальности 320 км. Видно небольшое уменьшение провала центральной части спектра на этой высоте, температуры электронов T_e и ионов T_i практически равны (кривые температур «слипаются»). На рис. 7 помеха является более интенсивной, искажения спектра существенны – он стал одnogорбым, высота максимума сечения рассеяния увеличилась с 272 до 290 км (сместилась в сторону помехи), произошла инверсия кривых температур T_e и T_i . После исчезновения помехи (см. рис. 8) форма спектра, высотная зависимость сечения рассеяния и высотные зависимости температур восстановились до прежних значений.

Возникает также погрешность в определении скорости движения ионосферной плазмы. Из рис. 9 видно, что присутствие помехи на дальности 320 км привело к искажению высотного профиля движения ионосферной плазмы на соответствующем высотном интервале.

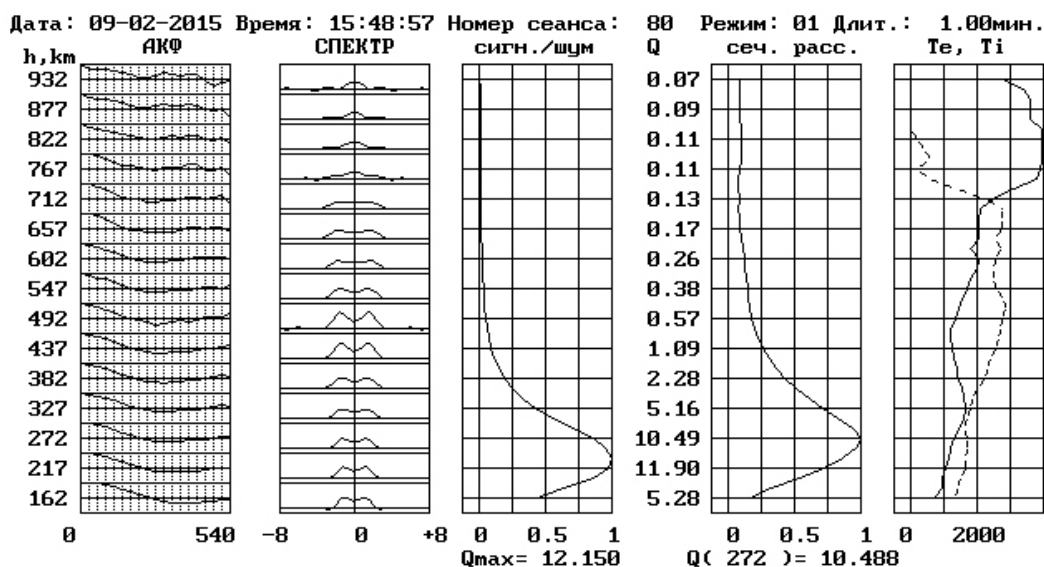


Рис. 6 – Начальный этап появления помехи на высоте 320 км

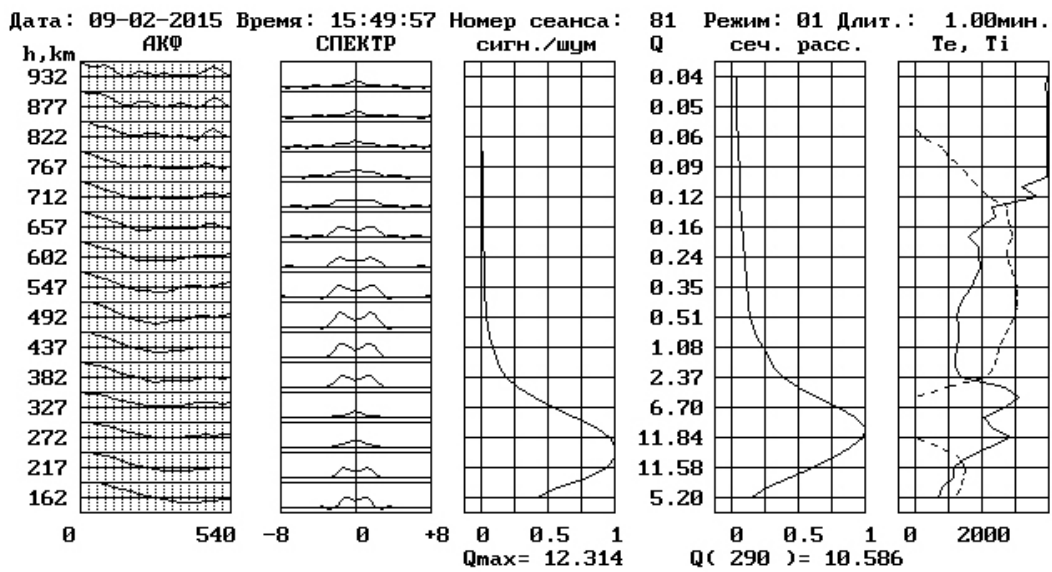


Рис. 7 – Помеха на высоте 320 км вносит искажения в измеряемые ионосферные параметры

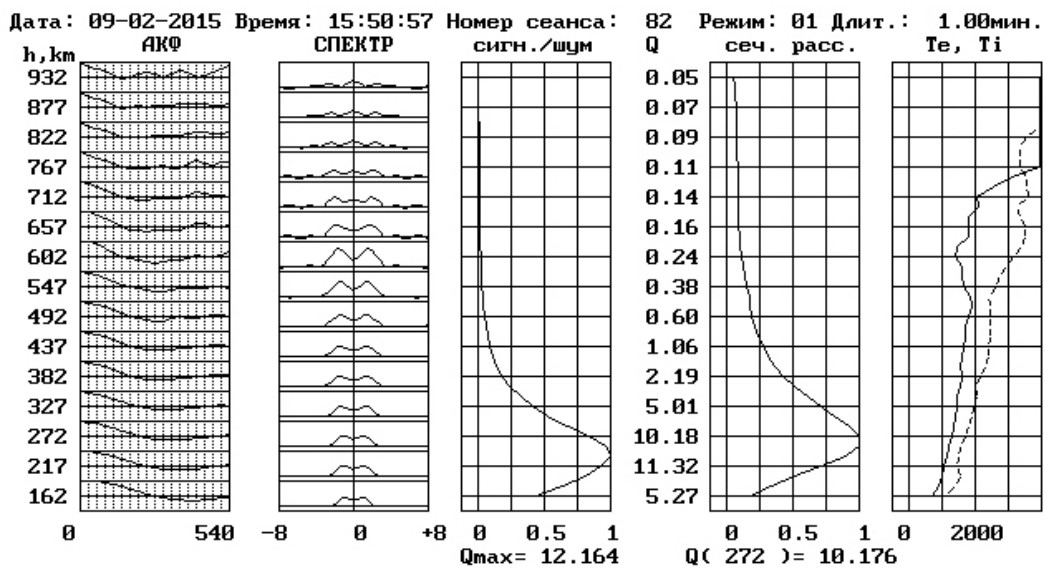


Рис. 8 – Значения ионосферных параметров после исчезновения помехи

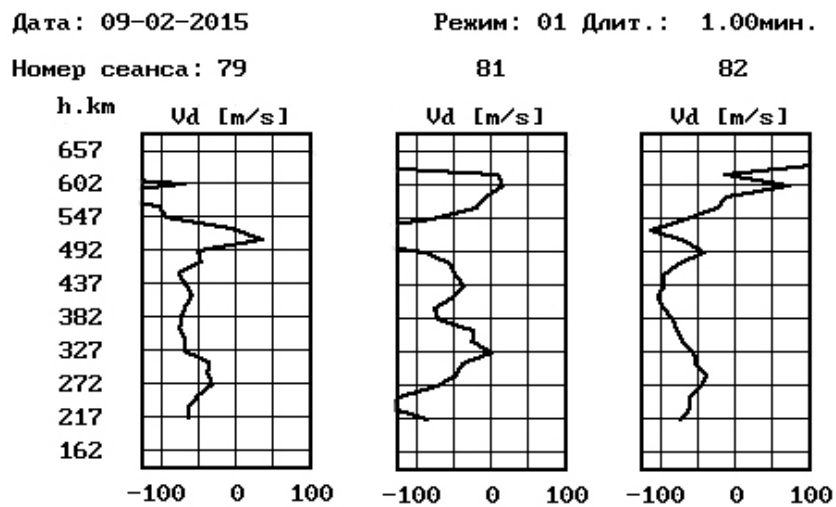


Рис. 9 – Высотные зависимости скорости движения ионосферной плазмы: сеансы 79 и 82 – помеха отсутствует, сеанс 81 – помеха на высоте 320 км

При этом измеренное значение скорости нисходящего ($V_d < 0$) движения плазмы под действием помехи упало с -50 м/с до 0, а после исчезновения помехи снова возросло до прежнего значения (-50 м/с).

Выводы. 1. Источниками помех для радара НР могут служить летательные аппараты на удалении от 100 до 400 км при высоте над поверхностью земли, обеспечивающей их прямую видимость – от 0.8 до 13 км, соответственно.

2. Для создания помехи, превышающей уровень собственных шумов системы достаточно аппарата с эффективной площадью рассеяния от 0.6 м^2 на дальности 100 км до 135 м^2 на дальности 400 км.

3. Проведенный анализ воздушной обстановки с помощью сайта [5] показал, что помехи для радара НР Института ионосферы создаются преимущественно отражениями от летательных аппаратов из восточного и северо-восточного направлений.

4. По каналу приёма эхо-сигнала от короткого импульса влияние помех проявляется в искажении высотного профиля мощности НР сигнала, по каналу приёма эхо-сигнала от длинного импульса – в искажении формы спектра НР сигнала, некорректном определении кинетических температур и скорости движения ионосферной плазмы.

5. Минимизация влияния рассмотренного типа помех возможна при условии разработки специального программного обеспечения, используемого для обработки результатов ионосферных измерений.

Список литературы: 1. Белоцерковский Г. Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. – М., Сов. радио, 1975. – 336 с. 2. *Wikimedia Project*. Wikipedia, 2015. – Режим доступа : https://en.wikipedia.org/wiki/Wide-body_aircraft. – Дата обращения : 14 июля 2015. 3. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972. – 336 с. 4. *Google Inc.* Google Earth, 2015. – Режим доступа : <http://www.google.com/earth> – Дата обращения 02 июля 2015. 5. *Svenska Resenätverket AB*. Flightradar24 AB, 2015. – Режим доступа : <http://www.flightradar24.com>. – Дата обращения: 10 марта 2015.

Bibliography (transliterated): 1. Belocerkovskij G. B. *Osnovy radiolokacii i radiolokacionnye ustrojstva*. Moscow: Sov. radio, 1975. Print. 2. *Wikimedia Project*. *Wikipedia*, 2015.– Web. 14 Juli 2015 <https://en.wikipedia.org/wiki/Wide-body_aircraft>. 3. Doluhanov M. P. *Rasprostranjenije radiovoln*. Moscow: Svjaz', 1972. Print. 4. *Google Inc.*, Google Earth, 2015. – Web. 02 Juli 2015 <<http://www.google.com/earth>>. 5. *Svenska Resenätverket AB*. *Flightradar24 AB*, 2015. Web. 10 March 2015 <<http://www.flightradar24.com>>.

Поступила (received) 24.07.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чепурний Яків Миколайович – головний інженер Інституту іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 707-67-69; e-mail: yakov955@gmail.com.

Чепурний Яков Николаевич – главный инженер Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 707-67-69; e-mail: yakov955@gmail.com.

Чепурнуу Яків Миколайович – Chief Engineer, Institute of Ionosphere, Kharkiv; tel.: (057) 707-67-69; e-mail: yakov955@gmail.com.@

Ємельянов Леонід Якович – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу Інституту іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 707-65-88; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

Емельянов Леонид Яковлевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 707-65-88; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

Emelyanov Leonid Yakovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph. D.), Senior Research Scientist, Head of Department, Institute of Ionosphere, Kharkiv; tel. (057) 707-65-88; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

Іскра Дмитро Олександрович – молодший науковий співробітник Інституту іоносфери, м. Харків; тел.: (057) 707-67-69; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua.

Искра Дмитрий Александрович – младший научный сотрудник Института ионосферы НАН и МОН Украины. тел.: (057) 707-67-69; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua.

Iskra Dmytro Oleksandrovych – Junior Researcher Scientist, Institute of Ionosphere, Kharkiv; tel.: (057) 707-67-69; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua.