

УДК 551 510 535 . 621 396 238

РЕЗУЛЬТАТЫ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ РАССЕЯНИИ УКВ НА ИСКУССТВЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ

А. В. Коровин, А. М. Насыров, Е. В. Проскурин, Н. Н. Ягнов

Приводятся результаты измерения углов места и азимутов областей, возмущенных двумя нагревными стендами. Экспериментально определено положение зеркальной поверхности в пространстве при ракурсном рассеянии и выявлена ее несимметрия по отношению к оси диаграммы антенны и выявлена ее несимметрия по отношению к оси диаграммы антенны и выявлена ее несимметрия по отношению к оси диаграммы антенны и выявлена ее несимметрия по отношению к оси диаграммы антенны. Оценена величина критического угла между волновым вектором волны накачки и геомагнитным вектором, при превышении которого мелкомасштабное расслоение не наблюдается. Обнаружено явление аномально длительной релаксации рассеянного сигнала при нагреве в ночных условиях.

При решении ряда задач физики взаимодействия мощных радиоволн КВ диапазона с ионосферной плазмой возникает необходимость в надежном определении пространственного положения области рассеяния пробных волн на искусственной мелкомасштабной ионосферной турбулентности, развивающейся в поле мощной волны накачки. В экспериментах по ракурсному рассеянию УКВ, проводившихся совместно НИРФИ и КГУ, эта задача решалась путем одновременных измерений направления прихода пробных радиоволн, рассеянных из возмущенной области (ВО) в точку приема, и высоты отражения мощной радиоволны накачки от ионосферы. Возмущающие передатчики располагались в районах Горького и Васильсурска. Передающий пункт линии ракурсного рассеяния размещался в Ростовской, приемный — в Волгоградской областях. Исследовалось рассеяние на неоднородностях с поперечными масштабами $l_{\perp} = 3$ м. Большая часть экспериментальных данных получена при нагреве в Горьком на частотах 4,6 и 5,75 МГц. Возмущающий передатчик работал циклами: 3 мин — нагрев, 2 мин — пауза. Высота отражения волны накачки вычислялась по методике [1] из данных ионосферной станции, расположенной в пункте нагрева. Измерения азимутов и углов места прихода радиоволн проводились в Волгограде на специально разработанных двухканальных фазовых пеленгаторах с разнесенными антеннами. Азимутальная база была ориентирована перпендикулярно направлению на возмущающий передатчик в Горьком (Зименки) и равнялась $d_{\psi} = 2,85 \lambda$, λ — длина волны пробного передатчика. База углов места ориентирована по направлению на возмущающий передатчик в Горьком и равна $d_{\theta} = 7,46 \lambda$. При превышении сигналом уровня шума в 10 раз по напряжению достигалась точность измерения азимутов $\sigma_{\psi} \approx 0^{\circ},1$ и углов места $\sigma_{\theta} \approx 0^{\circ},1$. Диапазон однозначного отсчета азимутов равнялся $\pm 10^{\circ}$, углов места — $0^{\circ} - 30^{\circ}$. Для обеспечения приема сигналов, рассеянных над Горьким и Васильсурском, антенны угломера были выполнены с достаточно широкими диаграммами направленности в горизонтальной плоскости (пятиэлементные волновые каналы на высоте $h_A = 1,5 \lambda$).

Угловые измерения проводились в июне — октябре 1979 г. На рис. 1 приведены результаты измерения угла места при нагреве в Горьком (17.10.79). На этом же рисунке представлен ход высот h для слоя, где плазменная частота в области F ионосферы равна частоте, возмущаю-

щего передатчика f_H . Значения углов места отложены на правой, а высот — на левой осях ординат. На оси абсцисс указано время наблюдения. Вертикальными линиями на кривой высот указан характерный масштаб слоя ионосферы $L = [N^{-1}(dN/dh)]^{-1} \cdot 10^{-1}$ в километрах по

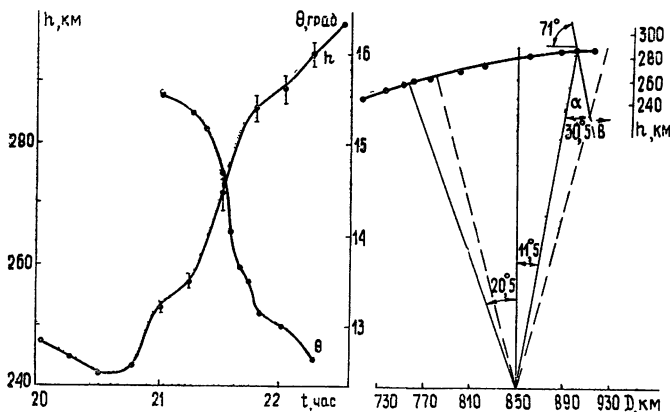


Рис. 1.

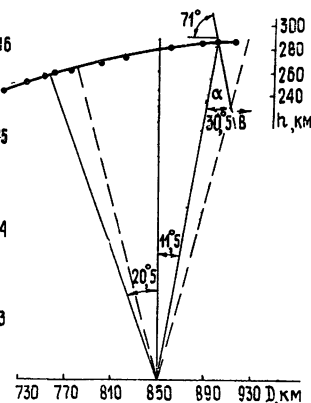


Рис. 2.

шкале h . Особенностью графиков является противофазность их изменения во времени (с увеличением h угол места θ уменьшается). Аналогичный результат получен при измерениях θ и h при нагреве в Васильевске. Построенное по экспериментальным значениям θ и h положение области зеркального рассеяния в вертикальной плоскости, проходящей через приемный и нагревный пункты, показано на рис. 2 (при нагреве в Горьком). По оси абсцисс отложена дальность от пункта нагрева до приемника, по оси ординат — высота отражения волны накачки. При построении графика учитывалась сферичность ионосферного слоя и отклонения лазерной частоты от номинала 5,75 МГц в пределах диаграммы направленности мощного передатчика за счет изменения угла падения волны накачки на ионосферный слой. Наклон зеркальной поверхности в средней части равен 10° по отношению к горизонту. При увеличении высоты отражения волны накачки происходит «скольжение» области рассеяния по зеркальной поверхности от южной кромки диаграммы направленности греющего передатчика к северной. Этим объясняется противофазность изменения h и θ во времени на рис. 1. Эффект «скольжения» обусловлен тем, что рассеяние радиоволн на искусственных неоднородностях происходит из узкого интервала высот, в котором выполнены условия зеркальности рассеяния по отношению к вектору геомагнитного поля. Размер области рассеяния по высоте определяется ракурсным углом $\Delta\chi$. На рис. 2 пунктиром отмечен ракурс диаграммы направленности греющего передатчика в вертикальной плоскости в меридиональном направлении на уровне, соответствующем порогу возбуждения мелкомасштабных неоднородностей $P_{пз} = 2 \text{ МВт}$ [4]. Характерно, что область зеркального рассеяния, из которой регистрировался ракурсный сигнал, расположена несимметрично по отношению к центру диаграммы направленности нагревной антенны. Если ограничиться уровнем, в пределах которого амплитуда ракурсного сигнала уменьшается в e раз, то наблюдаемая в экспериментах зона рассеяния простиралась на 100 км к югу и на 50 км к северу от вертикали. Такое смещение области рассеяния наблюдалось в экспериментах по аномальному поглощению радиоволн [9]. Проведенные измерения позволили экспериментально оценить величину критического угла $\alpha_{кр} \approx 30^\circ$ между волновым вектором волны накачки k и геомагнитным вектором H , при превышении которого начинается резкое ослабление

интенсивности ракурсного рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях. Полученное значение $\alpha_{кр}$ близко совпадает с теоретической оценкой критического угла $\alpha_{кр}$, при превышении которого исчезает эффект аномального ослабления волны накачки обыкновенной поляризации за счет трансформации в Z -моду при рассеянии на стимулированных этой волной неоднородностях [3]. Протяженность зеркальной поверхности южнее края диаграммы направленности нагревной антенны на уровне $0,1 P_H = P_{п.э} = 2 \text{ МВт}$ позволяет сделать вывод о том, что реальные пороги возбуждения неоднородностей были еще меньше, чем полученные нами в экспериментах по нагреву на переменной мощности $P_H = 2 \div 20 \text{ МВт}$ [4]. Полагая, что нагрев на южном крае зеркальной области осуществлялся боковым лепестком диаграммы направленности, можно получить в качестве верхней границы порога значение $P_{п.э} < 1 \text{ МВт}$. Точность оценки определяется точностью измерения реальной диаграммы направленности нагревной антенны.

Измерения азимутов прихода радиоволн при рассеянии над Горьким и Васильсурском, выполненные в июне — октябре 1979 г., показали существование флуктуаций углов со среднеквадратичным значением $\sigma\psi = 1^\circ,1 \div 1^\circ,2$, что соответствует «видимому» блужданию эффективного центра рассеяния в горизонтальной плоскости в пределах $\approx 20 \text{ км}$ (в направлении восток — запад). Это может быть связано с неоднородностью структуры возмущенной области, которая, вероятно, состоит из отдельных «ядер» с повышенным значением флуктуаций электронной плотности, перемещающихся в горизонтальной плоскости. Другой причиной, приводящей к флуктуациям азимутов, являются случайные изменения высоты ВО, приводящие к появлению горизонтальной составляющей скорости перемещения за счет «скольжения» области рассеяния по зеркальной поверхности.

Полученные из угловых измерений данные свидетельствуют о высокой степени ракурсной чувствительности механизма рассеяния радиоволн на искусственных мелкомасштабных неоднородностях. Это приводит к характерной зависимости уровня рассеянного сигнала от высоты нагрева. На рис. 3 приведен пример такой зависимости, полученный по результатам одновременных измерений амплитуд сигнала и высоты рассеяния (наблюдения 17.10.79 г. в 20—23 мск). В этот период изменение высоты было монотонным (рис. 1). За счет эффекта «скольжения» по зеркальной поверхности образовалось плато для высот 257—280 км. Увеличение сигнала на высотах $h > 250 \text{ км}$ объясняется вхождением ВО в область зеркального рассеяния, а уменьшение на высотах $h > 280 \text{ км}$ — обрезанием за счет условия $\alpha = (\hat{k}H) > 30^\circ$. Если считать ракурсный угол пренебрежимо малым, по рис. 3 можно определить максимальную толщину Δh возмущенной области. На высоте $h = 250 \text{ км}$ $\Delta h = 6 \text{ км}$, на высоте $h = 285 \text{ км}$ $\Delta h = 15 \text{ км}$. Учитывая, что поверхность

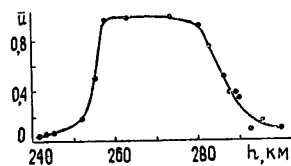


Рис. 3.

зеркального рассеяния наклонена под углом 10° к горизонту, по значениям Δh определяется горизонтальный размер области рассеяния в направлении, проходящем через возмущенный объем и приемный пункт, $l = 35 \div 85 \text{ км}$. Эти результаты согласуются с данными работы [7].

При нагреве на фиксированной частоте изменение высоты отражения мощной волны приводит к относительно быстрым смещениям области рассеяния по зеркальной поверхности. Для приведенного на рис. 1 примера увеличение высоты происходит со скоростью $V_h = 18 \text{ м/с}$, что приводит к скорости скольжения $V_c = V_h/\sin\varphi$ (φ — угол наклона зеркальной поверхности), равной $\approx 100 \text{ м/с}$. Однако ионозонд давал возможность измерить лишь средние значения скорости вертикальных сме-

щений рассеивающей области за цикл нагрева. Измерения углов места позволили обнаружить быстрые изменения h непосредственно при приеме рассеянного сигнала. Направление и величина скорости изменения высоты могут заметно измениться даже внутри одного трехминутного цикла включения накачки. Например, 14 июня 1979 г. в течение интервала времени 90 с были зарегистрированы изменения углов места, равные 1° . Максимальные значения вертикальных дрейфов, обнаруженные по угловым измерениям в июне 1979 г., равнялись $V_h = 250$ м/с. Ранее [5] отмечались такие большие эквивалентные скорости вертикального дрейфа для искусственных крупномасштабных возмущений.

Интересным, с нашей точки зрения, представляется обнаруженное в 1979 г. явление аномально длительной релаксации рассеянного сигнала после выключения накачки. Ранее было показано [4, 8], что при рассеянии на неоднородностях с поперечными масштабами $l_{\perp} = 3$ м время релаксации $\tau_{p1} = 2 \div 10$ с и что для $l_{\perp} \leq 7$ м расплывание искусственных возмущений обусловлено поперечной диффузией электронов в магнитном поле Земли [10]. В июне 1979 г. при наблюдениях в ночных условиях после обычной релаксации с постоянной времени τ_{p1} в течение всей двухминутной паузы в нагреве наблюдался остаточный рассеянный сигнал. Из-за кратковременности паузы можно оценить лишь нижнюю границу времени релаксации $\tau_{p2} > 120$ с. Отметим, что существование двух времен релаксации было обнаружено и другими авторами [6, 8, 11], однако значения τ_{p2} в этих работах были меньше, чем получены в наших экспериментах. На рис. 4 приведен образец записи наблюдавшегося эффекта (на верхней дорожке самописца рассеянный УКВ сигнал, на нижней — сигнал волны накачки). В середине

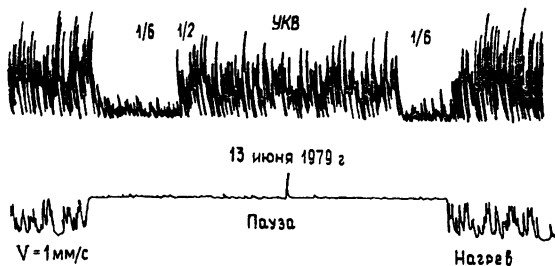


Рис. 4.

паузы во время существования остаточного УКВ сигнала усиление приемного канала специально увеличено. Явление аномально длительной релаксации наблюдалось в течение нескольких дней в июне 1979 г. в ночные часы. Время существования эффекта не превышало одного — полутора часов. Угловые измерения, проведенные в это время, позволили обнаружить постепенное смещение азимутов после включения нагрева к западу относительно направления на пункт нагрева. При выключении накачки азимут достаточно быстро (за время, меньшее 40 с) смещается к востоку. Величина смещения достигает значения 1° . Результаты азимутальных измерений приведены на рис. 5. По оси абсцисс отложено время

включения и выключения накачки, по оси ординат — азимуты приема. Измерения азимутов в одном пункте не позволяют определить истинного направления смещения эффективного центра рассеяния. Если предположить, что смещение рассеивающей области происходит в плоскости

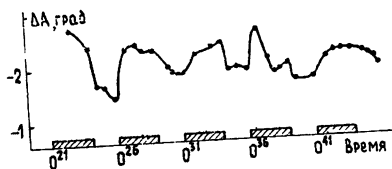


Рис. 5.

включения и выключения накачки, по оси ординат — азимуты приема. Измерения азимутов в одном пункте не позволяют определить истинного направления смещения эффективного центра рассеяния. Если предположить, что смещение рассеивающей области происходит в плоскости

скости магнитного меридиана, то наблюдаемое изменение азимута на 1° эквивалентно смещению на 70 км. При этом скорость перемещения достигает значений $V_{\text{эфф}} = 1,5$ км/с. Создается впечатление, что в процессе нагрева ближе к центру диаграммы направленности антенны возмущающего передатчика образуется «ядро», которое очень медленно расплывается. Постепенно при нагреве размер ВО увеличивается, и ее центр смещается относительно «ядра». По частотам замираний рассеянного сигнала было оценено отношение характерного размера «ядра» к размеру области рассеяния при нагреве, оказавшееся равным $\approx 0,6$. Отметим, что скорость $V_{\text{эфф}}$ является не истинной, а эффективной, связанной с различием скоростей релаксации неоднородностей в центре и на краях возмущенной области. Подобный эффект наблюдался ранее при измерениях в КВ диапазоне [6].

Авторы выражают благодарность Г. Г. Гетманцеву, Н. А. Митякову, Л. М. Ерухимову за помощь в организации исследований и полезное обсуждение результатов, Л. В. Гришкевичу — за предоставление ионосферных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. — М.: Наука, 1977.
2. Minkoff I., Kugelmann P., Weissman I. — Radio Sci., 1974, 9, № 11, p. 941.
3. Митяков Н. А., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. — Изв. вузов — Радиофизика, 1975, 18, № 9, с 1273
4. Коровин А. В., Метелев С. А., Насыров А. М. и др. — В сб.: Влияние мощного радиоизлучения на ионосферу. — г. Апатиты, 1979.
5. Ерухимов Л. М., Митякова Э. Е., Мясников Е. Н. и др. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 12, с. 1814.
6. Беленов А. Ф. и др. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 12, с 1805
7. Калитенков Н. В. и др. — В сб.: Исследование ионосферы и магнитосферы методами активного воздействия. — г. Апатиты, 1977.
8. Фролов В. Л. Диссертация, Горький, НИРФИ, 1979.
9. Allen E. M., Thome G. D., Rao P. V. — Radio Sci., 1974, 9, № 11, p. 905.
10. Ерухимов Л. М., Мясников Е. Н., Фролов В. Л. Тезисы докладов II Всесоюзного совещания по проблеме «Неоднородная структура ионосферы» — Ашхабад: 1979, с 38.
11. Minkoff I., Kreppel R. — J. Geophys. Res., 1976, 81, p. 2844.

Казанский государственный
университет

Поступила в редакцию
13 июня 1980 г.,
после доработки
23 декабря 1980 г.

RESULTS OF ANGULAR MEASUREMENTS AT VHF SCATTERING BY ARTIFICIAL INHOMOGENEITIES

A. V. Korovin, A. M. Nasyrov, E. V. Proskurin, N. N. Yagnov

Measurement results are presented for position angles and azimuths of regions disturbed by two heating structures. A position of a mirror surface in the space is experimentally defined for foreshortened scattering and its asymmetry is found relative to the axis of the pump transmitter diagram. A value is estimated of the critical angle between the pump wave vector and the geomagnetic one in the increase of which the small-scale lamination is not observed. A phenomenon is detected of anomalously continuous relaxation of the scattering signal when heating in the night.