

УДК 523.98

Ю. Ф. Юровский

Лабораторія радіоастрономії НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія», Кацивелі

Локальные радиоисточники на диске Солнца во время затмения 11 августа 1999 г.

Локальне джерело, зареєстроване на хвилі $\lambda = 10.5$ см 11 серпня 1999 р., характеризувалося підвищеним випромінюванням над плямами та більш інтенсивним міжплямовим компонентом з яскравісною температурою $3 \cdot 10^6$ К. Над активними областями на лімбі виявлено протяжне по висоті випромінювання, радіояскравість якого зменшується від $(226 \pm 14) \cdot 10^3$ К на висоті $35 \cdot 10^3$ км до $(110 \pm 6) \cdot 10^3$ К на висоті $180 \cdot 10^3$ км від фотосфери. Три різних способи вимірювання радіорадіуса Сонця на хвилі 1.07 м дали узгоджений результат $R_{d1.07} = (1.20 \pm 0.05) R_{\phi}$, що відповідає положенню межі ефективно випромінювального шару на метрових хвилях на висоті $h_{1.07} = (0.195 \pm 0.03) R_{\phi}$ чи $(136 \pm 21) \cdot 10^3$ км. Розташування межі короткохвильового радіоджерела вище межі довгохвильового джерела є незвичайним.

ВВЕДЕНИЕ

Радиоизлучение Солнца на волне $\lambda = 10.5$ см выходит с уровня, на котором происходит энерговыделение солнечных вспышек. Метровые волны излучаются выше, в тех слоях короны, где радиоволны генерируются ускоренными во время вспышки заряженными частицами. Достигнув окрестностей Земли, эти частицы вызывают геомагнитные бури, полярные сияния, прекращение радиосвязи и целый комплекс других геофизических явлений, включая воздействие на биосферу Земли и здоровье человека. Изменения солнечного радиопотока в процессе закрытия и открытия диска Солнца непрозрачным диском Луны позволяют выяснить, какие участки солнечной атмосферы ответственны за повышенное излучение и как эти участки расположены относительно видимых образований. Поэтому для получения сведений об областях, определяющих «космическую погоду» в окрестностях Земли, наблюдения затмения проводились на сантиметровых волнах и на волнах метрового диапазона.

АППАРАТУРА

Радиотелескоп сантиметрового диапазона. Антенна радиотелескопа диаметром 3 м с электриче-

ским приводом помещена в радиопрозрачный купол диаметром 6 м для защиты от метеорологических воздействий. Ширина диаграммы направленности радиотелескопа 3° , антенная температура от невозмущенного Солнца $T_a = 1500$ К. Модуляционный радиометр прямого усиления настроен на частоту 2.85 ГГц. Полоса пропускания радиометра 40 МГц. Чувствительность $\Delta T_a = 0.15$ К при $\tau = 1$ с. Цифровая регистрация производится с частотой 100 Гц при квантовании сигнала на ± 512 уровней.

Радиотелескоп метровых волн. Антенна размерами 3×3 м состоит из 16 семиеlementных антенн типа «волновой канал», размещена на параллактическом поворотном устройстве с электрическим приводом. Ширина диаграммы направленности антенны равна 11° . Модуляционный радиометр прямого усиления настроен на частоту 280 МГц. Полоса пропускания радиометра $\Delta f = 10$ МГц. Постоянная времени регистрирующего прибора $\tau = 100$ мс. Чувствительность радиотелескопа $\Delta T = 0.58$ К. Непрерывный динамический диапазон регистрируемой интенсивности 20 дБ. Цифровая регистрация производится с частотой 10 Гц при квантовании сигнала на ± 512 уровней.

Оптические наблюдения. Фотографирование фаз затмения в белом свете производилось сотрудником Лаборатории физики Солнца КрАО А. Н. Бабиным с помощью стационарного телескопа АФР-2, распо-

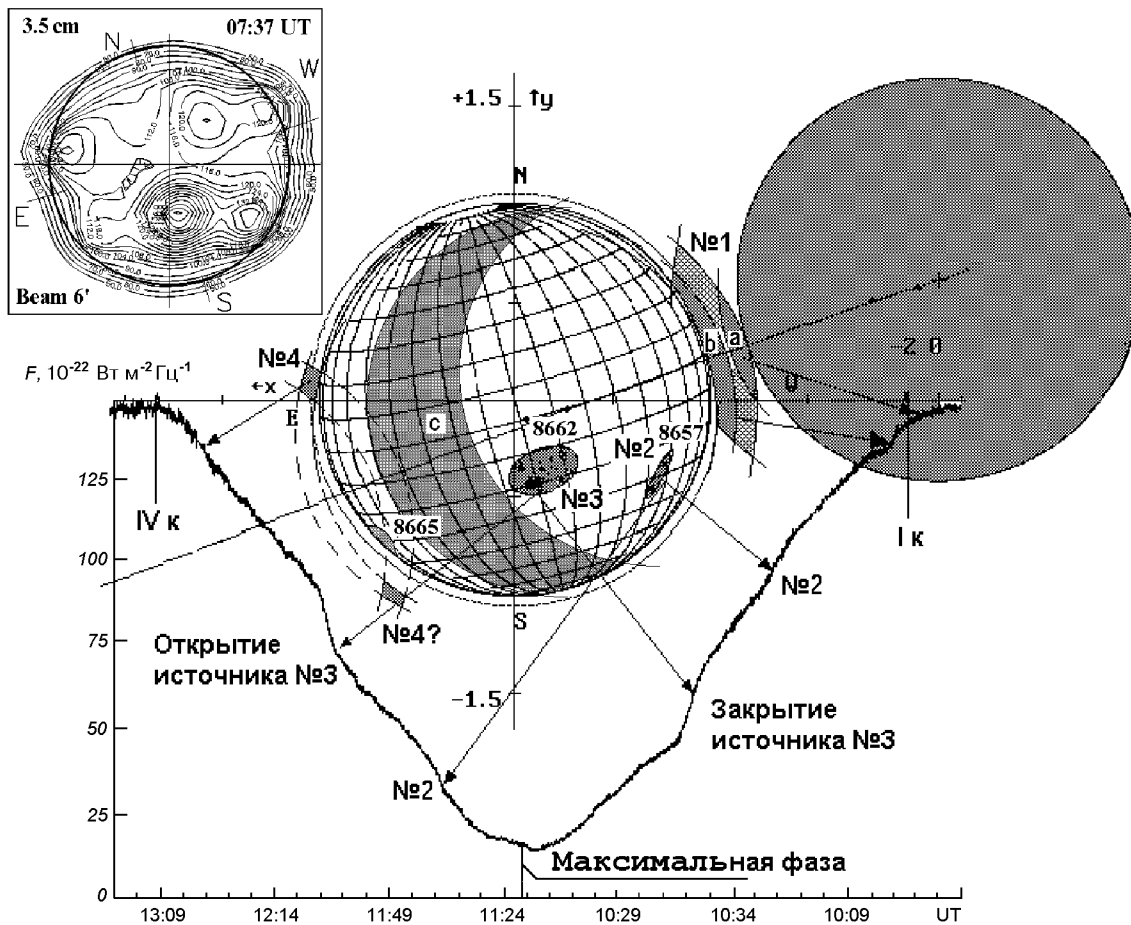


Рис. 1. Обстоятельства затмения, изменение потока в течение затмения на частоте 2.85 ГГц, радиокарта и положение активных образований на диске Солнца

ложенного на территории Лаборатории радиоастрономии КраО. Положение лимба Луны и оптически видимых деталей было измерено на полученных снимках с помощью координатного устройства «Ас-корекорд-2» с точностью 5".

Обстоятельства затмения. Эфемериды затмения вычислялись с помощью программы, разработанной пулковскими радиоастрономами Г. Б. Гельфрейхом и А. Н. Коржавиным. Первый оптический контакт наступил в 9:56:20 UT при высоте Солнца около 55° над горизонтом. В момент максимальной фазы в 11:20:00 UT диском Луны закрывалось 0.938 диаметра фотосферы. Последний контакт наблюдался в 12:38:20 UT. Метеорологические условия в день затмения были благоприятными, облачность отсутствовала.

Согласно данным [4] на диске Солнца находились группы пятен NOAA 8662 с координатами 13S, 01W, дата пересечения центрального меридиана

СМР ≈ 11.6; NOAA 8657, 31S.42W, СМР ≈ 8.2; группы пятен на восточном лимбе Солнца NOAA 8667, 23N, 87E, СМР ≈ 18.2 и NOAA 8665, 23S, 68E, СМР ≈ 16.8; а также заходящие за лимб группы NOAA 8651, 25N, 86W, СМР ≈ 2.7 и NOAA 8656 14N, 80W, СМР ≈ 4.4. Кроме того, вблизи центрального меридиана 9 августа наблюдалась группа пятен NOAA 8664, 23N, 07E, СМР ≈ 10.1, распавшаяся к моменту затмения.

Положение некоторых групп на диске Солнца показано на рис. 1, где нанесена также траектория центра Луны и показаны изменения плотности потока излучения на волне 10.5 см в течение затмения. Радиоисточникам присвоены порядковые номера 1—4. Внезатменный поток радиоизлучения Солнца по нашим измерениям составлял $(148 \pm 15) \cdot 10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$ на волне 10.5 см и $(17 \pm 2) \cdot 10^{-22} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$ на волне 1.07 м. По сведениям [2] в течение затмения зарегистрирован один ра-

диовсплеск на метровых волнах в 10:24.4 UT. На сантиметровых волнах по этим данным всплесковая активность не наблюдалась. На радиотелескопе РТ-22 КрАО были получены радиокарты на волнах 2.0, 2.3, 2.8 и 3.5 см [1]. Одна из них приведена на рис. 1 в левом верхнем углу.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ НА ВОЛНЕ 10.5 СМ

Радиоизлучение невозмущенного Солнца. Радиояркость (эффективная температура) излучающей области определяется по известной формуле [3]:

$$T_b = \frac{dF \cdot \lambda^2}{2k \cdot d\Omega} \quad (\text{К}), \quad (1)$$

где dF , Вт·м⁻²Гц⁻¹ — перепад потока на исследуемом интервале времени; λ , м — длина волны; $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град — постоянная Больцмана; $d\Omega = 4\pi \sin^2(32R_d/240dA/A)$, стер — телесный угол, занимаемый излучающей площадкой; R_d — принятый для расчетов радиорadius Солнца в единицах радиуса фотосферы $R_\phi \approx 700 \cdot 10^3$ км; dA — площадь открывающейся или закрывающейся площадки в произвольных единицах измерения; $A = 1$ — площадь всего диска Солнца с радиусом R_d в тех же единицах измерения.

Наименьшую эффективную температуру $T_{d2.85} = (42 \pm 8) \cdot 10^3$ К имел участок диска, закрывавшийся в течение 10:46:00—11:12:00 UT (область c на рис. 1). За время с 11:00:00 до 11:12:00 UT перепад потока составил $dF \approx 16 \cdot 10^{-22}$ Вт·м⁻²Гц⁻¹ и закрылось $dA = 0.1584$ площади диска. Если бы найденную температуру имела вся поверхность диска, то поток от него составил бы $F_{d2.85} = dFA/dA \approx 101 \cdot 10^{-22}$ Вт·м⁻²Гц⁻¹. Будем считать его потоком от невозмущенного Солнца. Следовательно, избыточный поток $47 \cdot 10^{-22}$ Вт·м⁻²Гц⁻¹ излучался всеми вместе взятыми локальными источниками.

В момент максимальной фазы затмения остаточный поток составлял $F_{o2.85} \approx 11 \cdot 10^{-22}$ Вт·м⁻²Гц⁻¹. Поток указанной величины может излучаться диском с радиорadiusом, равным $R_{d2.85} \approx (1.05 \pm \pm 0.01)R_\phi$. Запаздывание IV радиоконтакта на 2 мин относительно оптического контакта не противоречит найденному значению радиорadiusа.

ЛИМБОВЫЕ ИСТОЧНИКИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Радиозатмение на волне 10.5 см началось в 9:47:30 ± 30 с UT, приблизительно на 9 мин 20 с раньше

оптического затмения (I контакта), что соответствует высоте излучающего слоя $h \approx 1.26R_\phi \approx \approx 180 \cdot 10^3$ км. Точно в расчетный момент, в 11:11:40 ± 30 с UT, эта радиояркая область снова появилась из-за лимба Луны. Этот источник № 1 находился в области, обозначенной на рис. 1 заливкой различной плотности. Радиояркость его деталей a и b получилась равной $T_{1a} \approx 116 \cdot 10^3$ К, $T_{1b} \approx 240 \cdot 10^3$ К.

После максимальной фазы затмения в 11:24:00 UT возрастание потока замедлилось в результате закрытия радиояркой области, находившейся на восточном лимбе Солнца. Открытие этой области наблюдалось в интервале 12:27:30—12:33:00 UT. Сравнение с радиокартой Солнца (см. рис. 1) показывает, что избыточное излучение области № 4, вероятнее всего, связано с локальным источником, располагавшимся над лимбовой группой пятен NOAA 8667. Средний перепад потока при закрытии и открытии источника № 4 составил около $dF \approx 3 \cdot 10^{-22}$ Вт·м⁻²Гц⁻¹, а угловые размеры всего источника получились равными приблизительно $0.1R_\phi \approx 1.6'$. Нижняя более близкая к фотосфере часть источника на высоте $35 \cdot 10^3$ км имела эффективную температуру $T_{4a} \approx 213 \cdot 10^3$ К, а располагавшаяся над ней на высоте $56 \cdot 10^3$ км вторая часть источника могла излучаться абсолютно черным телом с вдвое меньшей температурой $T_{4b} \approx 106 \cdot 10^3$ К.

РАДИОИСТОЧНИК № 3 НАД ГРУППОЙ ПЯТЕН NOAA 8662

Наиболее мощный радиоисточник закрывался в течение 10:32:00—10:47:00 UT и открывался в течение 11:23:00—12:05:00 UT (рис. 1 и 2). Перепад потока при этом составлял $13 \cdot 10^{-22}$ Вт·м⁻²Гц⁻¹. На рис. 2 на панелях 1 и 3 приведены зарисовки группы пятен NOAA 8662 по фотографиям, полученным в моменты, близкие к интервалам времени открытия/закрытия группы диском Луны. За время нахождения за диском Луны конфигурация пятен несколько изменилась, и они переместились в связи с общим вращением Солнца. Результаты вычисления радиояркости площадок, закрывавшихся (открывавшихся) в течение одной минуты, показаны на рис. 2, панели 2 и 4. Приблизительное положение максимумов радиояркости приведено на рис. 2, панели 1 и 3, в виде заштрихованных областей, ограниченных лимбом Луны в одном направлении и произвольными линиями в другом направлении. Усреднение за 1 мин соответствует

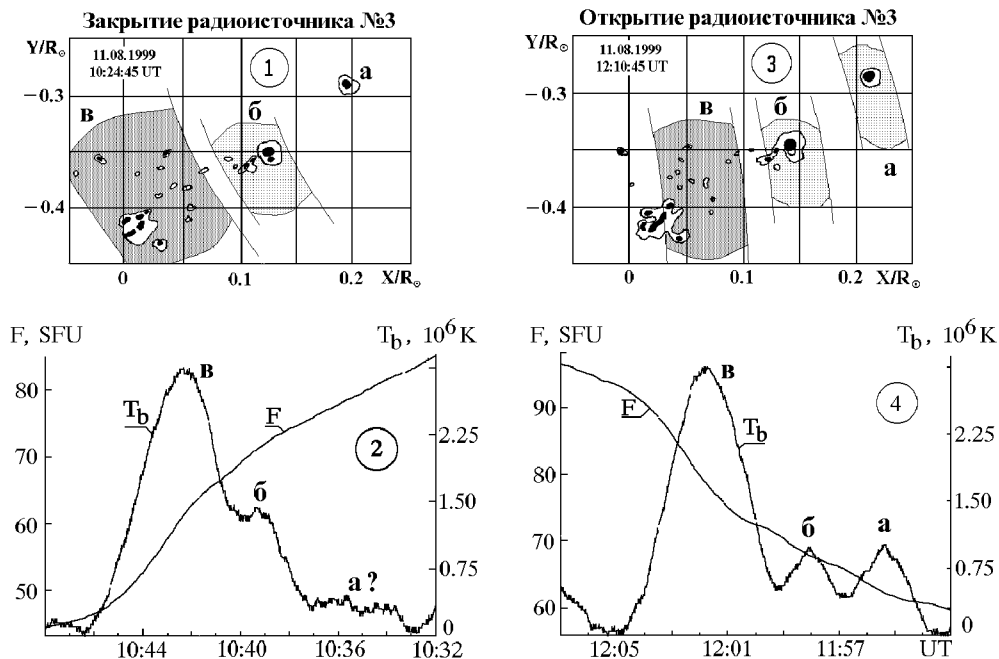


Рис. 2. Зарисовка группы пятен NOAA 8662 по нашим фотографиям в моменты ее закрытия (1) и открытия (3) диском Луны. Распределение радиояркости (панели 2 и 4) над этой группой характеризуется максимумами над пятнами *a*, *б* величиной около 10^6 К и наличием межпятенного компонента *в* с эффективной температурой порядка $3 \cdot 10^6$ К

угловому разрешению $23''$. При открытии радиосточника состоял из 3 деталей. Детали *a* и *б* имели максимальную температуру около 10^6 К и совпадали по положению с головным (*a*) и средним (*б*) пятнами группы. Наиболее яркая деталь *в* несколько смещена относительно наибольшего хвостового пятна группы в сторону головных пятен как при открытии, так и при закрытии группы. Поэтому можно предположить, что это межпятенный компонент. Температура межпятенной детали *в* в максимуме радиояркости составила около $3 \cdot 10^6$ К. При закрытии радиосточника № 3 выявились только детали *б* и *в* (рис. 2, панели 1 и 2).

Другие активные области в день затмения были связаны со слабыми радиосточниками, поток от которых не превосходил $2 \cdot 10^{-22}$ Вт·м⁻²Гц⁻¹. Поэтому мы не приводим здесь результаты исследования этих источников.

ЗАТМЕНИЕ НА МЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

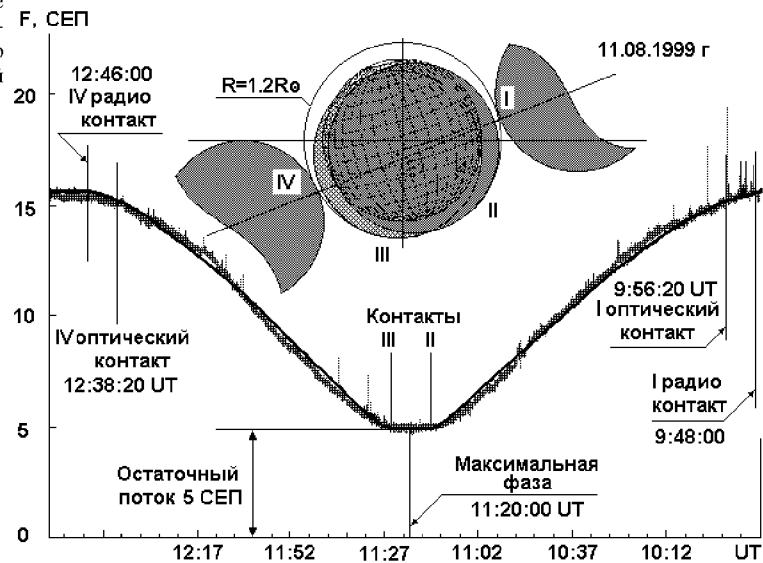
На рис. 3 показан эскиз обстоятельств затмения и приведена кривая изменения потока на частоте 280 МГц. Видимый диаметр Луны на 3 % превосходил диаметр Солнца, поэтому в радиодиапазоне затме-

ние было кольцеобразным, о чем свидетельствует плоский участок записи 11:15:00—11:25:00 UT на рис. 3. Его длительность дает возможность вычислить эффективный радиорadius Солнца R_d . Из очевидных геометрических построений следует, что $R_d = R_L + R_\phi \sqrt{(d_1/2)^2 + D^2}$, где $R_L = 1.03R_\phi$ — радиус Луны; $d_1/2 = 0.134R_\phi$ — длина пути центра диска Луны за время $dt/2 = 5.5 \pm 0.5$ мин между моментами II и III контактов; $D = 0.145R_\phi$ — расстояние между центрами дисков Луны и Солнца в момент максимальной фазы затмения.

Отсюда находим $R_{d280} = (1.22 \pm 0.03)R_\phi$.

Поскольку на кривой радиозатмения нет перепадов уровня, которые можно было бы связать с закрытием/открытием локальных источников, то внезатменную плотность потока $F_{d280} \approx (16 \pm 0.5) \cdot 10^{-22}$ Вт·м⁻²Гц⁻¹ мы приняли за плотность потока от невозмущенного Солнца и по формуле (1) получили его яркостную температуру на частоте 280 МГц: $T_{280} \approx 0.7 \cdot 10^6$ К. Сравнение кривой радиозатмения с кривой закрытия площади такого равномерно излучающего диска (сплошная линия на рис. 3) показывает, что распределение радиояркости реального Солнца незначительно отличается от равномерного распределения.

Рис. 3. Изменение плотности потока на частоте 280 МГц в течение затмения незначительно отличается от закрытия площади равномерно яркого диска с радиусом $R_{d280} \approx 1.2R_{\phi}$ и эффективной температурой $T_{b280} \approx 0.7 \cdot 10^6$ К



Поток в момент максимальной фазы имел остаточную величину $F_0 = (5 \pm 0.5) \cdot 10^{-22}$ Вт·м⁻²Гц⁻¹. Величина этого остаточного потока также позволяет найти эффективный размер радиосолнца по формуле [3]

$$R_d = R_{\phi} \sqrt{F_d / (F_d - F_0)},$$

откуда находим $R_{d280} = (1.20 \pm 0.05)R_{\phi}$.

Радиус Солнца в направлении I—IV контактов определяет высоту излучающего слоя в конкретной точке контактов. По известной скорости движения Луны $V = 0.024375R_{\phi}$ мин⁻¹ находим высоту излучающего слоя $h_{280} = (0.19 \pm 0.03)R_{\phi}$. Таким образом, три различных метода измерения радиорadiusа Солнца на волне 1.07 м дали в пределах погрешностей практически одинаковые результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На волне 10.5 см локальный источник над группой пятен NOAA 8662 состоял из повышенного излучения над пятнами и более интенсивного межпятенного компонента с яркостной температурой около $3 \cdot 10^6$ К. Над активными областями, располагавшимися на лимбе, обнаружена повышенная радиояркость, убывающая от $(226 \pm 14) \cdot 10^3$ К на высоте $35 \cdot 10^3$ км до $(110 \pm 6) \cdot 10^3$ К на высоте $180 \cdot 10^3$ км от фотосферы.

На волне 1.07 м (частота 280 МГц) три различных способа измерения радиорadiusа Солнца дали

вполне согласующиеся результаты $R_{d280} = (1.20 \pm 0.05)R_{\phi}$, что соответствует высоте эффективно излучающего слоя $h_{280} = (0.195 \pm 0.03)R_{\phi}$ или $(136 \pm 21) \cdot 10^3$ км.

1. Бабин А. Р., Будзиновская И. А., Миронов М. А., Цветков Л. И. Результаты наблюдения частного солнечного затмения 11 августа 1999 года // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2001.—97.—С. 26—42.
2. Бюл. Солнечные данные.—1999.—№ 8.
3. Железняков В. В. Радиоизлучение Солнца и планет. — М.: Наука. 1964.—560 с.
4. Solar Geophys. Data.—1999.—N 662.—Part I.—P. 54, 84, 59.

LOCAL RADIO SOURCES ON THE SUN DURING THE ECLIPSE IN 11 AUGUST 1999

Yu. F. Yurovskii

A local radio source at a wavelength of 10.5 cm in 11 August 1999 consisted of an increased radiation region above sunspots and of a more intensive interspots component with a brightness temperature of about $3 \cdot 10^6$ K. An emission region extended on height was found over the solar limb. The radio brightness of the region decreased from $(226 \pm 14) \cdot 10^3$ K for a height of $35 \cdot 10^3$ km down to $(110 \pm 6) \cdot 10^3$ K for a height of $180 \cdot 10^3$ km above the photosphere. Three different ways of solar radio radius measurements at a wavelength of 1.07 m gave agreed results, namely, $R_{d1.07} = (1.20 \pm 0.05)R_{\phi}$, which corresponds to the height of effectively radiating layer at metre wavelengths which is equal to $h_{1.07} = (0.195 \pm 0.03)R_{\phi}$ or $(136 \pm 21) \cdot 10^3$ km. Therefore, the border of short-wave radio source was higher than the border of long-wave source, which is unusual.