УДК 550.388.2

ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИМ ФАРАДЕЕВСКИМ МЕТОДОМ

Е. Н. Виняйкин

Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

В 2008 и 2009 годах, в которые отмечался глубокий минимум солнечной активности, проведены измерения полного электронного содержания ионосферы радиоастрономическим методом, использующим фарадеевское вращение в ионосфере плоскости поляризации линейно поляризованной компоненты диффузного радиоизлучения Галактики. В измерениях, выполненных в Радиоастрономической обсерватории НИРФИ «Старая Пустынь» на частоте 290 МГц, использована исследованная ранее область северного полюса мира. Калибровка по яркостной температуре выполнена по радиоисточнику Кассиопея А. Приведена временная зависимость плотности потока радиоизлучения Кассиопеи А, полученная по результатам измерений на частоте 290 МГц в 1978–2011 годы. Разработана и применена новая методика учёта побочного поляризованного сигнала, которая принимает во внимание его зависимость от времени, что позволило повысить точность измерений временны́х вариаций полного электронного содержания ионосферы. Эта методика позволила измерить с более высокой точностью, чем ранее, величину яркостной температуры линейно поляризованной компоненты диффузного галактического радиоизлучения в направлении северного полюса мира, составившую $0.83 \pm 0.07~{
m K}$ на частоте 290 МГц. Для этой области небосвода в работе приведены спектры яркостной температуры и позиционного угла плоскости поляризации линейно поляризованной компоненты галактического диффузного радиоизлучения в диапазоне от метровых до сантиметровых волн, что открывает возможность выбора подходящей частоты для измерений радиоастрономическим фарадеевским методом в будущем. Выполнено сопоставление значений полного электронного содержания ионосферы с соответствующими значениями из глобальных ионосферных карт, полученных по наблюдениям сигналов спутников GPS. Разность средних значений полного электронного содержания ионосферы по всем проведённым в данной работе радиоастрономическим измерениям и соответствующим средним из глобальных ионосферных карт составила $0,15 \cdot 10^{12}$ см⁻², среднеквадратичная разность составила $1,9 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}.$

введение

Радиоастрономический метод измерения полного электронного содержания ионосферы (ПЭСИ, $N_{\rm et}$), т. е. интеграла от электронной концентрации $N_{\rm e}(h)$ по высоте h, был предложен в работах [1–3]. Он возник из потребности учитывать фарадеевское вращение в ионосфере для определения истинного значения позиционного угла плоскости поляризации линейно поляризованной компоненты диффузного синхротронного радиоизлучения Галактики в дециметровом и метровом диапазонах длин волн [1, 4–7]. Угол поворота $\varphi_{\rm ion}$ плоскости поляризации в ионосфере из-за эффекта Фарадея в квазипродольном приближении для сферически слоистой ионосферы согласно [8–10] составляет

$$\varphi_{\rm ion}[{\rm rpag}] = \frac{1,355 \cdot 10^{-6}}{(\nu[{\rm M}\Gamma{\rm g}])^2} \int_{h_{\rm min}[{\rm cm}]}^{h_{\rm max}[{\rm cm}]} N_{\rm e}[{\rm cm}^{-3}]H[\Im]\cos\theta\sec z\,{\rm d}h[{\rm cm}],\tag{1}$$

где ν — частота, H — напряжённость магнитного поля, θ — угол между вектором магнитного поля и волновым вектором, z(h) — зенитный угол направления на источник на высоте h.

В работе [2] выражение для φ_{ion} представлено в виде

$$\varphi_{\rm ion}[\rm rpad] = \frac{1,355 \cdot 10^{-6}}{(\nu[\rm M\Gamma I])^2} \overline{H[\Im]\cos\theta\sec z} \int_{h_{\rm min}[\rm CM]}^{h_{\rm max}[\rm CM]} N_{\rm e}[\rm cm^{-3}] \, dh[\rm cm], \tag{2}$$

где среднее значение $\overline{H\cos\theta\sec z}$ берётся по интервалу высот $h_{\min}-h_{\max}$, в котором происходит основная часть фарадеевского поворота плоскости поляризации, причём $h_{\rm max} \gg h_{\rm m},$ где $h_{\rm m}$ высота максимума электронной концентрации (N_e(h_m) = (N_e)_{max}). Из (2) видно, что для определения $\varphi_{\rm ion}$ необходимо знать значение интеграла $N_{\rm et}$. В [7] величина $N_{\rm et}$ определялась в рамках модели однородного слоя с некоторой эффективной толщиной и концентрацией, равной $(N_{\rm e})_{\rm max}$, величина $H \cos \theta$ считалась постоянной и соответствующей высоте 400 км, а в интервале высот 200÷1000 км усреднялась величина sec z. В [5, 6] N_{et} определялась в модели параболического слоя, причём величина (N_e)_{max}, как и в [7], вычислялась по значениям критических частот слоя ионосферы F₂. Последние предоставлялись ближайшими к месту измерений ионосферными станциями вертикального зондирования (в [7] использовались данные ионосферной станции в посёлке Зимёнки). Корреляция измеренных в [5–7] значений позиционного угла плоскости поляризации поляризованной компоненты радиоизлучения Галактики с вычисленными по (2) значениями $\varphi_{\rm ion}$ явилась веским доказательством внеатмосферного происхождения регистрируемого линейно поляризованного радиоизлучения. После учёта угла φ_{ion} в поляризационных радиоастрономических измерениях та или иная область небосвода становилась прокалиброванной по позиционному углу плоскости поляризации, а её последующие наблюдения уже являлись источником информации о ПЭСИ [2, 3, 11–13] в соответствующей подыоносферной точке ¹.

Данная работа содержит описание методики и обстоятельств измерений ПЭСИ радиоастрономическим фарадеевским методом с использованием области небосвода с центром в направлении северного полюса мира в качестве источника линейно поляризованного сигнала, просвечивающего ионосферу, результаты измерений ПЭСИ этим методом в 2008 и 2009 годах в Радиоастрономической обсерватории НИРФИ «Старая Пустынь», а также сопоставление полученных «радиоастрономических» значений ПЭСИ с соответствующими по координатам и времени значениями этой же величины из глобальных ионосферных карт ПЭСИ, составленных по данным двухчастотных фазовых и кодовых измерений псевдодальности по сигналам спутников GPS [14].

1. ОБЛАСТЬ СЕВЕРНОГО ПОЛЮСА МИРА КАК ИСТОЧНИК, ПРОСВЕЧИВАЮЩИЙ ИОНОСФЕРУ В ИЗМЕРЕНИЯХ ПЭСИ

В радиоастрономическом фарадеевском методе измерения ПЭСИ в качестве источника линейно поляризованного радиоизлучения, просвечивающего ионосферу, используется диффузное синхротронное радиоизлучение Галактики из той или иной области небосвода. Прокалиброваны по позиционному углу и по яркостной температуре несколько областей небосвода, причём на многих частотах метрового и дециметрового диапазонов длин волн (см. [7, 15–17] и ссылки в этих работах). Оптимальным диапазоном для радиоастрономических фарадеевских измерений ПЭСИ является интервал частот примерно от 200 до 400 МГц, в котором яркостная температура и угол поворота плоскости поляризации в ионосфере достаточно велики. Наиболее удобной для измерений ПЭСИ областью небосвода при наблюдениях на средних и высоких географических широтах северного полушария является область северного полюса мира, угол места которой равен геогра-

 $^{^1}$ Подыоносферной точкой называется вертикальная проекция на поверхность Земли точки пересечения луча зрения в направлении наблюдаемой области со сферой максимума электронной концентрации в ионосфере на высоте $h_{\rm m}.$



Рис. 1. (*a*) Спектр яркостной температуры $T_{\rm bp}(\nu)$ линейно поляризованной компоненты галактического радиоизлучения в направлении области северного полюса мира по измерениям в диапазоне частот 200÷8 300 МГц. Прямая соответствует формуле (3). (*б*) Зависимость позиционного угла плоскости поляризации линейно поляризованной компоненты галактического радиоизлучения в направлении области северного полюса мира от квадрата длины волны по измерениям в диапазоне частот 290÷8 300 МГц. Прямая соответствует формуле (4)

фической широте места. Дело в том, что эта область не перемещается в течение суток, и поэтому подыоносферная точка неподвижна и расположена на сравнительно небольшом расстоянии от места расположения радиотелескопа на том же географическом меридиане к северу от него. Наблюдая область северного полюса мира, мы наблюдаем чисто временные изменения ПЭСИ над фиксированной подыоносферной точкой. При использовании других областей небосвода, часто более ярких в поляризованном радиоизлучении [16, 17], чем область северного полюса мира, подыоносферная точка перемещается по поверхности Земли в процессе наблюдений и к временны́м вариациям ПЭСИ добавляются ещё и пространственные. К тому же, каждому положению подыоносферной точки соответствует своё местное время, отличающееся от местного времени в пункте расположения радиотелескопа и совпадающее с ним только в момент кульминации (верхней или нижней) наблюдаемой области небосвода.

Возможен выбор частоты поляризационных измерений ПЭСИ по наблюдениям области северного полюса мира в указанном выше оптимальном интервале частот, поскольку спектры яркостной температуры $T_{\rm bp}(\nu)$ и позиционного угла плоскости поляризации $\chi_{\rm g}(\lambda^2)^2$ для этой области известны. Указанные спектры, полученные по данным из [15, 18, 19], приведёны на рис. 1. Яркостная температура поляризованной компоненты галактического радиоизлучения в направлении области северного полюса мира по данным измерений на 16 частотах в диапазоне 200÷8 300 МГц [15, 18, 19] представляется в виде ³ [19]

$$T_{\rm bp}[K] = 0.92 \, (\nu [M\Gamma \eta]/300)^{-1.82},\tag{3}$$

а позиционный угол по данным в интервале частот 290÷8300 МГц в виде

$$\chi_{\rm eq}(\nu) = -48^{\circ} \, (\lambda[{\rm M}])^2 + 40.8^{\circ}, \tag{4}$$

соответствующая мера вращения в принятых в радиоастрономии единицах равна $RM = -0.84 \text{ pag/m}^2$.

Е. Н. Виняйкин

 $^{^2}$ Для области северного полюса мира позиционный угол плоскости поляризации одинаков в галактической и экваториальной системах координат $\chi_{\rm g}=\chi_{\rm eq}.$

³ В (3) и на рис. 1*a* величина $T_{\rm bp}(\nu) = [\lambda^2/(2k)] I_{\rm p}$, где $I_{\rm p}$ – интенсивность линейно поляризованной компоненты, k – постоянная Больцмана, соответствует определению, принятому Международным астрономическим союзом в 1973 году. В [15, 18, 19] принято определение $T_{\rm bp} = (\lambda^2/k) I_{\rm p}$.

При измерениях ПЭСИ радиоастрономическим фарадеевским методом с использованием области северного полюса мира антенна радиотелескопа устанавливается в направлении на север (азимут 180°) под углом места h_0 , равном географической широте места φ_g^4 . Широта подыоносферной точки φ_{si} (в данном случае — проекция на поверхность Земли точки пересечения луча зрения, направленного на область северного полюса мира, с максимумом электронной концентрации в ионосфере на высоте h_m) определяется из формулы

$$\varphi_{\rm si} = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{R_{\rm E}}{R_{\rm E} + h_{\rm m}}\cos\varphi_{\rm g}\right),\tag{5}$$

где $R_{\rm E} = 6\,371$ км — средний радиус Земли. Подставляя в (5) $\varphi_{\rm g} = 55,65^{\circ}, h_{\rm m} = 450$ км [20, 21] ⁵, получим для обсерватории «Старая Пустынь» $\varphi_{\rm si} \approx 58^{\circ}$.

Перепишем выражение (2) в виде

$$N_{\rm et}[{\rm TECU}] = 7,38 \cdot 10^{-7} (\overline{H[\Im]\cos\theta\sec z})^{-1} (\nu[{\rm M}\Gamma{\rm u}])^2 \varphi_{\rm ion}[{\rm rpag}] = K(\nu)\varphi_{\rm ion}[{\rm rpag}].$$
(6)

В (6) использована принятая для величины ПЭСИ единица 1 TECU= 10^{12} см⁻². Коэффициент в (6) при наблюдениях области северного полюса мира на частоте 290 МГц в обсерватории «Старая Пустынь» равен $K(290 \text{ M}\Gamma \text{q}) = 0,185$ и был вычислен, следуя [7] и [22].

2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПЭСИ

Измерения ПЭСИ были выполнены 22–23 октября 2008 года, 27–28 апреля 2009 года и 10–13 ноября 2009 года (пять ночных и два дневных сеанса с общей продолжительностью 80 часов) ⁶ в обсерватории «Старая Пустынь» (географическая долгота обсерватории равна $2^{h}54,5^{m}$ в. д.) с помощью азимутально-угломестного радиотелескопа РТМ-10 с 10-метровой параболической антенной. РТМ-10 оснащён штатным модуляционным радиометром с полосой 3 МГц и чувствительностью 0,2 K · c^{1/2}, что при постоянной времени 16 с, применявшейся в наблюдениях, соответствует 0,05 К. Использован коаксиальный облучатель с двумя ортогональными парами линейных вибраторов, которые запитывались противофазно и с одинаковой амплитудой для возбуждения моды H_{11} коаксиального волновода. Вместе с симметрирующими устройствами вибраторы выполняли роль разделителя ортогональных линейных поляризаций [24]. Ширина главного луча диаграммы направленности антенны на уровне 0,5 по мощности в E- и H-плоскостях равнялась 7°50′ и 7°30′ соответственно. Сигнал с выходов разделителя поступал на входы переключателя поляризаций (модулятора), с выхода которого через вентиль шёл на вход первого усилителя радиометра. Далее с выхода первого усилителя сигнал через коаксиальное вращающееся сочленение поступал на основную часть радиометра в кабине РТМ-10.

⁴ Определяемое таким образом положение области северного полюса мира изменяет со временем своё положение среди звёзд в силу прецессии и нутации земной оси. Мы пренебрегаем этим изменением, когда сопоставляем результаты поляризационных наблюдений области северного полюса мира, выполненные на разных частотах в разные годы (рис. 1), поскольку угловые размеры диаграмм направленности использовавшихся радиотелескопов, составляющие в большинстве случаев несколько угловых градусов, много больше прецессионно-нутационных смещений области северного полюса мира за несколько лет.

⁵ Высота 450 км принимается в качестве значения $h_{\rm m}$ в методике построения глобальных ионосферных карт (GIM) [14, 20, 21], получаемых из обработки регистрируемых сетью наземных приёмников сигналов спутников GPS. Ионосфера при этом рассматривается как сферический слой нулевой толщины, расположенный на фиксированной высоте $h_{\rm m}$.

⁶ Как известно, на 2008–2009 годы пришёлся глубокий и длительный минимум солнечной активности (см., например, [23]).

В процессе измерений облучатель с переключаемыми ортогональными линейными поляризациями непрерывно вращался против часовой стрелки (для направления визирования). На выходе радиометра возникал квазисинусоидальный сигнал на второй гармонике частоты вращения $\Omega =$ $= 2\pi/T$ с медленно изменяющимися, в масштабе периода вращения T = 4,7 мин, амплитудой и фазой. Этот сигнал соответствовал на плоскости регистрируемых значений параметров Стокса линейной поляризации векторной сумме полезного сигнала (в данном случае это галактическое диффузное частично линейно поляризованное радиоизлучение из области северного полюса мира, принимаемое главным лучом диаграммы направленности) и побочного поляризованного сигнала, принимаемого по боковым лепесткам диаграммы направленности. Последний обусловлен в основном частично линейно поляризованным собственным радиоизлучением земной поверхности в месте расположения радиотелескопа и отражённым от неё и местных предметов галактическим радиоизлучением; в дневное время существенно ещё и отражённое радиоизлучение Солнца. Вектор полезного сигнала вращается в силу вращения небосвода и изменения ПЭСИ, а вектор побочного поляризованного сигнала в первом приближении постоянен и неподвижен. Чтобы разделить указанные составляющие регистрируемого линейно поляризованного сигнала, необходимо проводить наблюдения в достаточно большом интервале времени. В отсутствие изменений ПЭСИ вектор полезного сигнала от области северного полюса мира описал бы на плоскости параметров Стокса полную окружность за 12 часов.

Калибровка радиотелескопа по яркостной температуре осуществлялась по радиоизлучению мощного незаходящего на средних широтах космического радиоисточника Кассиопея А. Поток радиоизлучения молодого остатка сверхновой Кассиопея А убывает со временем, поэтому в обсерватории «Старая Пустынь» с 1978 года ведутся измерения плотности потока радиоизлучения этого радиоисточника на частоте 290 МГц и ряде других частот относительно стабильного радиоисточника Лебедь А [25–27]. По измерениям с 1978 по 2011 годы получена следующая зависимость плотности потока излучения Кассиопеи А на частоте 290 МГц *S*^{CasA}_{290 МГц} от времени *t*:

$$S_{290 \text{ MFu}}^{\text{CasA}}[\text{Ян}] = 6,241 \cdot 10^8 \left(t[\text{годы}] - 1\,681\right)^{-1,99}.$$
(7)

Плотность потока радиоизлучения Кассиопеи A на частоте 290 МГц на среднюю эпоху измерений ПЭСИ (апрель 2009 года), согласно (6), принималась равной 6135 ± 300 Ян. Формула (7) позволяет определить плотность потока радиоизлучения и в последующие годы с точностью около 5%.

Юстировка по позиционному углу φ облучателя осуществлялась путём выставления одной из двух ортогональных пар линейных вибраторов в вертикальное положение и установки при этом стрелки сельсин-приёмника, указывающей позиционный угол облучателя, на ноль круговой шкалы углового положения облучателя.

3. РЕДУКЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На выходе модуляционного радиометра, как уже указывалось, регистрируется квазисинусоидальный сигнал с медленно меняющимися (в масштабе периода T) амплитудой и фазой, представляющий собой сглаженный интегрирующей RC-цепочкой радиометра отклик на разность $I_{x'x'}\eta_{x'} - I_{y'y'}\eta_{y'}$, где $I_{x'x'}$, $I_{y'y'}$ — элементы матрицы когерентности в координатах x', y', соответствующих направлениям вдоль ортогональных линейных вибраторов облучателя, $\eta_{x'}$ и $\eta_{y'}$ — КПД каналов ортогональных линейных поляризаций в паре разделитель—переключатель. Полный выходной сигнал, который обозначим как $Q'(\varphi)$ (измеряется в милливольтах), может быть записан в виде (предполагается осесимметричная диаграмма направленности антенны и идеаль-

Е. Н. Виняйкин

ное вращающееся сочленение)

$$Q'(\varphi) = G\alpha^{-1} \left\{ \cos[2\left(\varphi - \varphi_{\tau}\right)] Q_{\Sigma} + \sin[2\left(\varphi - \varphi_{\tau}\right)] U_{\Sigma} \right\} + G \left(T_{A} - T_{0}\right) \left(\Delta \eta / \bar{\eta}\right) = G\alpha^{-1} \left[\cos(2\varphi) \tilde{Q}_{\Sigma} + \sin(2\varphi) \tilde{U}_{\Sigma}\right] + G \left(T_{A} - T_{0}\right) \left(\Delta \eta / \bar{\eta}\right).$$
(8)

В (8) $G = G(t) = G_{\rm R}(t)\bar{\eta}, G_{\rm R}(t)$ — коэффициент усиления радиометра (после переключателя), $\bar{\eta} = (\eta_{x'} + \eta_{y'})/2, \ \Delta \eta = \eta_{x'} - \eta_{y'}, \ \alpha = \sqrt{1 + (4\pi\tau/T)^2}$ — коэффициент, на который надо умножить амплитуду квазисинусоиды на выходе радиометра, чтобы учесть влияние интегрирующей цепочки радиометра с постоянной времени $\tau = RC \ (R - \text{сопротивление резистора}, \ C - \ {\rm ë}$ мкость конденсатора), $\varphi_{\tau} = \arctan(4\pi\tau/T)/2 \approx 2\pi\tau/T \ ($ учтено, что $\tau \ll T$) — смещение измеренного значения позиционного угла плоскости поляризации в сторону увеличения по сравнению с истинным значением из-за смещения фазы квазисинусоиды на $2\varphi_{\tau}$ [7, 28], $\varphi = \Omega \ (t - t_0), \ T_{\rm A}$ — антенная температура, T_0 — физическая температура разделителя и переключателя,

$$Q_{\Sigma} = Q + Q_{\text{no6}} = \cos[2(\varphi_{\text{ion}} - q_{\text{eq}})]Q_{\text{eq}} - \sin[2(\varphi_{\text{ion}} - q_{\text{eq}})]U_{\text{eq}} + Q_{\text{no6}},$$

$$U_{\Sigma} = U + U_{\text{no6}} = \sin[2(\varphi_{\text{ion}} - q_{\text{eq}})]Q_{\text{eq}} + \cos[2(\varphi_{\text{ion}} - q_{\text{eq}})]U_{\text{eq}} + U_{\text{no6}},$$

$$\tilde{Q}_{\Sigma} = \tilde{Q} + \tilde{Q}_{\text{no6}} = \cos(2\varphi_{\tau})Q_{\Sigma} - \sin(2\varphi_{\tau})U_{\Sigma},$$

$$\tilde{U}_{\Sigma} = \tilde{U} + \tilde{U}_{\text{no6}} = \sin(2\varphi_{\tau})Q_{\Sigma} + \cos(2\varphi_{\tau})U_{\Sigma},^{7}$$
(9)

Q и U — параметры Стокса радиоизлучения наблюдаемой области в антенных температурах, усреднённые по главному лучу антенны, в системе горизонтальных координат x, y в картинной плоскости (x — вверх к северу, y — влево к востоку), $Q_{\rm поб}$ и $U_{\rm поб}$ — параметры Стокса побочного поляризованного сигнала в антенных температурах в тех же координатах, $Q_{\rm eq}$ и $U_{\rm eq}$ — параметры Стокса поляризованного сигнала в экваториальных небесных координатах, $q_{\rm eq}$ — экваториальный параллактический угол

$$\operatorname{tg} q_{\mathrm{eq}} = \frac{\cos(\varphi_{\mathrm{g}})\sin(s-\alpha_{\mathrm{r}})}{\sin(\varphi_{\mathrm{g}})\cos(\delta_{\mathrm{r}})-\cos(\varphi_{\mathrm{g}})\sin(\delta_{\mathrm{r}})\cos(s-\alpha_{\mathrm{r}})},\tag{10}$$

где $\alpha_{\rm r}$ и $\delta_{\rm r}$ — прямое восхождение и склонение области наблюдения, s — местное звёздное время. Для области северного полюса мира ($\alpha_r = 0, ^8, \delta_r = \pi/2$), как следует из (10), $q_{\rm eq} = -s = -t_{\rm H}$, $t_{\rm H}$ — часовой угол.

Редукция данных состояла из следующих этапов:

1) Для каждого периода вращения облучателя по сигналу $Q'(\varphi)$ были вычислены параметры Стокса регистрируемого радиоизлучения $(\tilde{Q}'_{\Sigma})_n$, $(\tilde{U}'_{\Sigma})_n$ ⁹ в координатах x, y, c поправкой на уменьшение интегрирующей цепочкой амплитуды квазисинусоиды, по следующим формулам (n = 0, 1, ..., N - 1 — номер периода, N — количество полных оборотов облучателя в сеансе измерений):

$$(\tilde{Q}'_{\Sigma})_n = \frac{1}{4} \alpha \frac{G_0}{G_n} \Big\{ Q'(\varphi = 2\pi n) - Q'\Big(\varphi = 2\pi n + \frac{\pi}{2}\Big) + Q'[\varphi = \pi (2n+1)] - Q'(\varphi = 2\pi n + \frac{\pi}{2}) \Big\}$$

⁷ Первые два уравнения в (9) являются уравнениями окружности в параметрической форме (параметр $\varphi_{\rm ion} - q_{\rm eq}$) в координатах Q_{Σ} , U_{Σ} , если параметры Стокса побочного поляризованного сигнала постоянны в сеансе измерений.

⁸ Прямое восхождение области северного полюса мира — величина неопределённая, мы полагаем её равной 0, как и в [15].

⁹ Штрих здесь означает, что значения параметров соответствуют сигналу (8) на выходе радиометра.

$$-Q'\left[\varphi = \pi \left(2n+1\right) + \frac{\pi}{2}\right]\right\}, \quad (11)$$
$$(\tilde{U}'_{\Sigma})_n = \frac{1}{4}\alpha \frac{G_0}{G_n} \left\{Q'(\varphi = 2\pi n + \pi/4) - Q'\left(\varphi = 2\pi n + \frac{3\pi}{4}\right) + Q'[\varphi = \pi \left(2n+1\right) + \pi/4] - Q'\left[\varphi = \pi \left(2n+1\right) + \frac{3\pi}{4}\right]\right\}. \quad (12)$$

Вычисление по формулам (11) и (12) позволяет исключить независящую от φ составляющую выходного сигнала (8), обусловленную разностью потерь в разделителе и переключателе поляризации ¹⁰, и отфильтровать возможную на практике нежелательную первую гармонику частоты Ω^{11} функции $Q'(\varphi)^{12}$. Коэффициент G_0/G_n , учитывающий изменение коэффициента усиления и приводящий выходной сигнал к начальному усилению G_0 , был измерен, как уже указывалось, по наблюдениям Кассиопеи А. Калибровку проводят в режиме измерения интенсивности поочерёдно для обеих поляризаций и берётся средняя величина.

2) Далее, если на плоскость параметров Стокса нанести все точки $(\tilde{Q}'_{\Sigma})_n$, $(\tilde{U}'_{\Sigma})_n$ данного сеанса измерений, то из получившегося графика видно, что они приблизительно следуют окружности, координаты центра которой $(\tilde{Q}'_{no6}, \tilde{U}'_{no6})$ отвечают параметрам Стокса побочного поляризованного сигнала, в первом приближении предполагаемого постоянным, а радиус T'_p , как видно из (9), пропорционален величине линейно поляризованного сигнала $\sqrt{Q_{eq}^2 + U_{eq}^2}$. Если антенна радиотелескопа имеет экваториальную монтировку, то, наоборот, радиус окружности пропорционален величине поляризованного сигнала, а координаты её центра соответствуют параметрам Стокса галактического поляризованного сигнала. На рис. 2a дан пример сеанса 11–12.11.2009. Движение изображающей точки на плоскости параметров Стокса происходит против часовой стрелки и обусловлено вращением небосвода (изменением параллактического угла q_{eq} со временем со скоростью $-30^{\circ} \, \mathrm{v}^{-1}$). Это движение модулируется изменением угла $\varphi_{\rm ion}$ фарадеевского вращения в ионосфере со временем. Методом наименьших квадратов находится окружность, величина радиуса и координаты центра которой обеспечивают минимум функции F трёх определяемых параметров $\tilde{Q}'_{\rm no6}, \tilde{U}'_{\rm no6}, T'_{\rm p} = \sqrt{\tilde{Q}'^2 + \tilde{U}'^2}$:

$$F(\tilde{Q}'_{\text{поб}}, \tilde{U}'_{\text{поб}}, T'_{\text{p}}) = \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \sqrt{\left[(\tilde{Q}'_{\Sigma})_n - \tilde{Q}'_{\text{поб}} \right]^2 + \left[(\tilde{U}'_{\Sigma})_n - \tilde{U}'_{\text{поб}} \right]^2} - T'_{\text{p}} \right\}^2.$$
(13)

3) Затем можно определить наблюдаемое значение позиционного угла плоскости поляризации линейно поляризованной компоненты галактического радиоизлучения области в горизонтальных координатах x, y (угол отсчитывается от вертикальной оси x против часовой стрелки (к востоку)) для каждого периода:

$$\tilde{\chi}'_n = \frac{1}{2} \operatorname{angle} \left[\left(\tilde{Q}'_{\Sigma} \right)_n - \tilde{Q}'_{\text{IIO6}}, \left(\tilde{U}'_{\Sigma} \right)_n - \tilde{U}'_{\text{IIO6}} \right].$$
(14)

 $^{^{10}}$ Если эта составляющая изменяется за время меньше T = 4,7 мин, то значения параметров Стокса будут искажены. Например, в дневных измерениях из-за мощного и быстропеременного спорадического радиоизлучения Солнца в годы его активности антенная температура $T_{\rm A}$ может быстро изменяться.

¹¹ Первая гармоника может возникнуть из-за возбуждения основной ТЕМ-моды коаксиального волновода вследствие несовершенства переключателя.

¹² Использование формул (11), (12) для определении параметров Стокса означает, что временно́е разрешение, с которым они определяются, равно периоду T = 4,7 мин. Отсчёты функции $Q'(\varphi)$ берутся через T/8 = 35 с, что почти соответствует теореме отсчётов, по которой независимыми являются отсчёты, регистрируемые с интервалом $\pi \tau / \sqrt{3}$, что равно 29 с при $\tau = 16$ с.



Рис. 2. (a) Плоскость суммарных значений параметров Стокса принимаемого радиоизлучения в 14-часовом сеансе наблюдений. Каждая изображающая точка соответствует периоду T = 4,7 мин. (b) Плоскость параметров Стокса (без учёта φ_{τ}) галактического радиоизлучения в яркостных температурах (параметры Стокса побочного поляризованного сигнала, предполагавшегося постоянным, вычтены из суммарных параметров) и вписанная окружность (величина F = 3,0 K², см. (13)) для того же сеанса, что и на рис. 2a

Здесь angle(x, y) — угол между прямой, проведённой из начала координат в точку с координатами (x, y), и осью x, отсчитываемый от оси x против часовой стрелки.

4) С учётом поправок на постоянную времени τ интегрирующей цепочки $\varphi_{\tau} = 20,4^{\circ}$, с учётом параллактического угла $(q_{\rm eq})_n$ и с учётом значения $\chi_{\rm eq}(290 \text{ M}\Gamma \text{n}) = 172^{\circ} \pm 10^{\circ} \text{ [15]}$ можно определить угол поворота плоскости поляризации в ионосфере для *n*-го периода

$$(\varphi_{\rm ion})_n = \tilde{\chi}'_n - \varphi_\tau + (q_{\rm eq})_n - \chi_{\rm eq}.$$
(15)

5) По значениям угла поворота плоскости поляризации в ионосфере можно вычислить ПЭСИ из равенства (6):

$$N_{\rm et}[{\rm TECU}] = 0.185\varphi_{\rm ion}[{\rm rpag}]. \tag{16}$$

6) Если необходимо измерить яркостную температуру линейно поляризованной компоненты галактического радиоизлучения, то следует пересчитать $T'_{\rm p}$ в единицы яркостной температуры с помощью соотношения (так же пересчитываются и параметры Стокса полезного сигнала)

$$T_{\rm bp} = A \, \frac{T_{\rm p}'}{10 \, (V_{\rm CasA})_0} \,, \tag{17}$$

где $A = \lambda^2 D_m S_{290 \text{ M}\Gamma_{\mathfrak{q}}}^{\text{CasA}}/(16\pi k)$, $\lambda = 1,03 \text{ м}$ — длина волны, $D_m = 585$ — коэффициент направленного действия антенны по главному лучу антенны, $S_{290 \text{ M}\Gamma_{\mathfrak{q}}}^{\text{CasA}} = 6\,135$ Ян (см. раздел 2), k постоянная Больцмана, $(V_{\text{CasA}})_0$ — величина выходного сигнала при начальной калибровке. Наличие коэффициента 10 в знаменателе (17) связано с тем, что калибровку производят при усилении радиометра в 10 раз меньше, чем при измерениях поляризованного сигнала. При вычислении Aпредполагалось, что средние значения параметров Стокса галактического радиоизлучения, приходящего по боковым лепесткам, равны нулю (из-за случайного разброса позиционных углов в

различных участках небосвода). Вклад поляризованных составляющих собственного радиоизлучения Земли и отраженного от неё галактического радиоизлучения обуславливает побочный поляризованный сигнал, учитываемый при редукции данных наблюдений. В настоящих измерениях величина A = 55,27 K.

На рис. 26 приведён пример обработки данных наблюдений того же сеанса 11–12.11.2009 согласно приведённому выше порядку действий. На осях отложены параметры Стокса полезного сигнала в системе горизонтальных координат в единицах яркостной температуры без учёта сдвига φ_{τ} по позиционному углу. Из рис. 26 видно, что имеется систематическое отклонение изображающих точек от окружности. Похожим образом выглядят графики всех остальных сеансов. Везде видно своеобразное обвивание окружности с обеих сторон движущейся изображающей точкой [29]. Это явление, наряду с ошибкой в величине χ_{eq} позиционного угла на входе в ионосферу, приводит к уменьшению точности определения φ_{ion} , а, следовательно, и ПЭСИ. Наиболее вероятной причиной обсуждаемого отклонения является изменение побочного поляризованного сигнала во времени. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Поскольку радиотелескоп во время измерений радиоизлучения области северного полюса мира неподвижен, отсутствует изменение вклада частично линейно поляризованного собственного радиоизлучения земной поверхности в месте расположения радиотелескопа при изменении угла визирования антенны. Изменением этого вклада за $10\div14$ часов наблюдений (продолжительность одного сеанса наблюдений) можно, по-видимому, пренебречь из-за отсутствия каких-либо резких изменений в физическом состоянии и температуре земной поверхности за время сеанса. Вклад же частично линейно поляризованного отражённого от земной поверхности космического радиоизлучения к концу ночного сеанса наблюдений в осенний период времени возрастает, поскольку восходят над горизонтом более яркие области небосвода, близкие к центру Галактики. В дневных сеансах наблюдений вклад отражённого радиоизлучения Солнца (собственное радиоизлучение Солнца не обладает, как правило, линейной поляризацией) также меняется, во-первых, из-за его движения по небосводу и, во-вторых, из-за возможного сравнительно медленного изменения плотности потока радиоизлучения со временем (при быстрых в масштабе T изменениях



Рис. 3. (a) Плоскость параметров Стокса (без учёта φ_{τ}) галактического радиоизлучения в яркостных температурах (параметры Стокса побочного поляризованного сигнала вычтены из суммарных параметров) и вписанная окружность (величина F = 1,2 K², см. (18)) для того же сеанса, что и на рис. 2a. (b) Параметры Стокса побочного поляризованного сигнала (без учёта φ_{τ}) в зависимости от времени (сплошные линии) и их значения в предположении постоянства побочного поляризованного сигнала (штриховая и пунктирная горизонтальные прямые) для того же сеанса, что и на рис. 2a

измерения по рассматриваемой методике становятся невозможными, см. выше). Не исключено, в принципе, и влияние слабых поляризованных помех от удалённых наземных радиоустройств, принимаемых через боковые лепестки. С другой стороны, оценки возможной фарадеевской деполяризации на неоднородностях ионосферы не дают оснований считать яркостную температуру линейно поляризованной компоненты галактического радиоизлучения непостоянной на частоте 290 МГц.

Допустим теперь, что параметры Стокса побочного поляризованного сигнала изменяются со временем в течение сеанса измерений. Предположим, что они являются полиномами второй степени от времени: $\tilde{Q}_{no6}(t) = a_0 + a_1 (t - t_0) + a_2 (t - t_0)^2$, $\tilde{U}_{no6}(t) = b_0 + b_1 (t - t_0) + b_2 (t - t_0)^2$ $(t - t_0 -$ время, прошедшее с начала данного сеанса измерений) ¹³. Тогда вместо функции трёх параметров (13) будем рассматривать функцию семи параметров:

$$F(a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, T'_p) = \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ -T'_p + \sqrt{\left[(\tilde{Q}'_{\Sigma})_n - a_0 - a_1 (t - t_0)_n - a_2 (t - t_0)_n^2 \right]^2 + \left[(\tilde{U}'_{\Sigma})_n - b_0 - b_1 (t - t_0)_n - b_2 (t - t_0)_n^2 \right]^2} \right\}^2.$$
(18)

Результаты обработки сеанса наблюдений 11–12.11.2009 в этом предположении показаны на рис. 3. Сопоставление рис. 26 и 3a и соответствующих значений F = 3,0 K² и F = 1,2 K² указывает на то, что учёт переменности побочного поляризованного сигнала существенно улучшает качество аппроксимации данных наблюдений и точность определения яркостной температуры и позиционного угла плоскости поляризации галактического радиоизлучения.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПЭСИ И ИХ СОПОСТАВЛЕНИЕ С ДАННЫМИ GPS

Перейдём теперь к описанию результатов определения значений ПЭСИ по данным радиоастрономических поляризационных наблюдений. Пользуясь (16), вычислим значения ПЭСИ для всех проведённых наблюдений. На рис. 4 показаны временные зависимости ПЭСИ в ночных сеансах наблюдений 22–23 октября 2008 года (в эти дни индекс числа солнечных пятен SSN = 0 [23]); 11–12 ноября 2009 года (11.11.2009 SSN = 7, 12.11.2009 SSN = 0 [23]). Здесь и далее время указано московское (зимнее), которое близко к местному времени в обсерватории «Старая Пустынь» (на 5,5 мин опережает его). Косые крестики соответствуют интервалу времени T = 4,7 мин, сплошные линии — результат медианного сглаживания по интервалу времени 6T (примерно 0,5 ч). На рис. 4*a* виден локальный максимум около полуночи, на рис. 4*b* — утренний подъём, на обоих рисунках видны волнообразные возмущения с периодом больше 1 часа. Ошибка в измерении абсолютного значения $N_{\rm et}$ складывается из ошибки 1,85 ТЕСИ из-за неопределённости 10° в значении $\chi_{\rm eq}(290 \ M\Gamma q)$, ошибки 0,5 ТЕСИ из-за разброса изображающих точек на плоскости параметров Стокса полезного сигнала около окружности (например, на рис. 3*a*). Заметим, что эта составляющая ошибки в зависимости от сеанса измерений меньше на 5÷50%, чем при редукции данных в предположении постоянства побочного поляризованного сигнала. Для сравнения, рас

 $^{^{13}}$ Обработка данных наблюдений показала, что нет необходимости рассматривать полиномы более высокой степени для сеансов продолжительностью около 12 ч, поскольку более высокие степени не дают заметного уменьшения величины F, но усложняют обработку. Более того, для некоторых сеансов можно ограничиться рассмотрением линейной аппроксимации.



Рис. 4. Зависимости $N_{\rm et}(t)$ с временны́м разрешением T = 4,7 мин (косые крестики) и около получаса (сплошная линия) для сеанса 22–23.10.2008 (*a*) и 11–12.11.2009 (*б*)

чётная ошибка, обусловленная флуктуационным порогом чувствительности радиотелескопа, равна 0,125 TECU. Полная ошибка в силу независимости её составляющих равна примерно 2 TECU. Если же речь идёт лишь о временны́х вариациях ПЭСИ, то остаётся только вторая составляющая погрешности 0,5 TECU, обусловленная неполным учётом переменности побочного поляризованного сигнала и коэффициента усиления радиометра, несовершенством вращающегося сочленения и другими возможными причинами.

Представляет интерес сопоставить полученные значения $N_{\rm et}(t)$ с приведёнными на сайте [14] (см., также [20, 21]) значениями ПЭСИ, размещёнными в виде таблиц с шагом по долготе 5°, по широте 2,5° и по времени 2 ч, полученными несколькими исследовательскими центрами по наблюдениям сигналов со спутников GPS с помощью сетей наземных приёмников. Из всех представленных на этом сайте научных центров были выбраны Jet Propulsion Laboratory of California Institute of Technology (Kog JPLG), Center for Orbit Determination in Europe, University of Berne, Switzerland (CODG), European Space Agency Group (ESAG)
Grup Universitat Politecnica de Catalunya (UPRG). Путём интерполяции к географическим координатам подыоносферной точки для луча визирования области северного полюса мира из обсерватории «Старая Пустынь» (см. раздел 1) получены значения $N_{\rm et}(t)$ из таблиц каждого из этих центров. Поскольку значения ПЭ-СИ различных центров для одного и того же пункта на поверхности Земли и момента времени различаются между собой на $0.5 \div 3$ TECU (пример приведён на рис. 5a, см. также [29]), то проведено их усреднение. На рис. 56 и 6 приведены сглаженные двухчасовым временным окном кривые $N_{\rm et}(t)$, а заполненными квадратиками представлены средние значения $N_{\rm et}(t)$ по указанным четырём центрам [14]. Ошибка последних составляет 1 ТЕСИ. Учитывая это и ошибку 2 ТЕСИ в радиоастрономических фарадеевских измерениях, можно констатировать, что имеется согласие в пределах погрешностей значений ПЭСИ, полученных в данной работе, и значений, взятых из [14].

Вместе с тем на рис. 6 видно, что «радиоастрономическая» кривая ПЭСИ имеет более глубокие ночные минимумы и более высокие дневные максимумы, чем по данным из [14] (заполненные квадратики). Кроме того, минимумы и максимумы сдвинуты относительно таковых, получаемых по данным из [14], вправо по оси времени. По нашему мнению, для фиксированной точки (в данном случае это точка с географическими координатами 2^h54,5^m в. д., 58° с. ш.)следует отдать предпочтение радиоастрономическим данным по сравнению с данными из глобальных ионосферных карт [14] для той же точки, поскольку последние получены путём усреднения по больши́м

Е. Н. Виняйкин



Рис. 5. (a) Зависимость $N_{\rm et}(t)$ в подыоносферной точке по данным четырёх исследовательских центров [14] 22–23.10.2008. Квадратики соответствуют центру UPRG, треугольники — JPLG, ромбики — CODG, кружочки — ESAG. Заполненные квадратики, соединённые отрезками прямых, соответствуют средним значениям. (b) Сопоставление сглаженных двухчасовым временны́м окном радиоастрономических значений $N_{\rm et}(t)$ (сплошная линия, см. рис. 4a) и значений из [14] (ломаная линия с символами, см. рис. 5a)



Рис. 6. Сопоставление сглаженных двухчасовым временны́м окном радиоастрономических значений $N_{\rm et}(t)$ (сплошная кривая) и значений из [14] (квадратики) для 10–13.11.2009

территориям и интерполяции, в них не разделяются временные (в масштабе менее двух часов) и пространственные вариации. Кроме того, наклонение орбит большинства спутников GPS равно 55° [21] и для определения ПЭСИ на географических широтах больше 55°, в том числе в рассматриваемой подыоносферной точке с широтой 58°, требуется уже не интерполяция, а экстраполяция данных, полученных с помощью большинства спутников данной системы. С этой целью удобнее использовать спутники ГЛОНАСС, наклонение орбит которых равно примерно 65° [21].

В табл. 1 сведены результаты измерений яркостной температуры поляризованной компоненты радиоизлучения из области северного полюса мира и результаты измерений ПЭСИ по всем пяти ночным и двум дневным сеансам радиоастро-

номических наблюдений в обсерватории «Старая Пустынь» в сравнении с данными из [14]. Среднее за 7 сеансов значение яркостной температуры поляризованной компоненты галактического радиоизлучения в области северного полюса мира на частоте 290 МГц, измеренное с учётом переменности побочного поляризованного сигнала в каждом из сеансов, составило

$$T_{\rm bp290\ M\Gamma \mu}^{\rm CIIM}[\rm K] = 0.83 \pm 0.07.$$
 (19)

В (19) кроме ошибки 0,04 К, указанной в табл. 1, учтена ошибка около 6% в определении калибровочной постоянной A. Величина (19) уточняет значение $T_{bp290~M\Gamma_{II}}^{C\Pi M} = 0.9 \pm 0.2$ К, полученное в [15] с помощью 14-метрового радиотелескопа без учёта переменности побочного поляризованного сигнала (ППС) при редукции данных, хотя и согласуется с ним в пределах ошибок.

Дата	$T_{\rm bp},{\rm K}$	$T_{\rm bp},{\rm K}$	\bar{R} , TECU	\bar{R} , TECU	$\sqrt{R^2}$, TECU	$\sqrt{R^2}$, TECU
	(постоянные	(переменные	(постоянные	(переменные	(постоянные	(переменные
	параметры	параметры	параметры	параметры	параметры	параметры
	$\Pi\Pi C)$	$\Pi\Pi C)$	$\Pi\Pi C)$	$\Pi\Pi C)$	$\Pi\Pi C)$	$\Pi\Pi C)$
22 - 23.10.08	$0,\!905\pm0,\!095$	$0,\!905\pm0,\!095$	0,460	0,23	1,02	$0,\!95$
27 - 28.04.09	$0,\!515\pm0,\!200$	$0,\!485\pm0,\!200$	1,415	0,70	1,86	1,82
10 - 11.11.09	$0,\!780\pm0,\!120$	$0,\!865\pm0,\!080$	-1,080	-1,03	2,04	$1,\!67$
11.11.09	$0,955\pm0,185$	$0,975 \pm 0,155$	3,720	$2,\!19$	$4,\!12$	$2,\!45$
11 - 12.11.09	$0{,}800\pm0{,}135$	$0,\!800\pm0,\!080$	-0,400	-1,05	1,91	$1,\!63$
12.11.09	$1,025 \pm 0,265$	$1,\!025\pm0,\!205$	3,230	1,56	4,33	2,73
12 - 13.11.09	$0,\!720\pm0,\!135$	$0,710\pm0,110$	$0,\!540$	$-0,\!54$	2,27	1,96
Среднее	$0,770 \pm 0,050$	$0,\!830\pm0,\!040$	1,000	$0,\!15$	$2,\!63$	1,91
по всем						
сеансам						

Таблица 1. Сопоставление значений ПЭСИ из [14] и результатов измерений

Величина R в табл. 1 — разность значений $N_{\rm et}$, измеренных в обсерватории «Старая Пустынь», и значений $N_{\rm et}$ по данным спутника GPS, взятая для сглаженных двухчасовым окном измеренных значений $N_{\rm et}$ в моменты времени, для которых значения $N_{\rm et}$ по данным спутника GPS приведены в [14]. Среднее значение \bar{R} по всем сеансам наблюдений при учёте изменения побочного поляризованного сигнала равно 0,15 TECU, среднеквадратичная величина $\sqrt{R^2} = 1,9$ TECU, что формально укладывается в указанные выше погрешности измерений. Из табл. 1 видно, что при учёте временной зависимости побочного поляризованного сигнала \bar{R} уменьшается почти во всех сеансах, а $\sqrt{R^2}$ уменьшается во всех без исключения сеансах по сравнению с ситуацией, когда при редукции данных побочный поляризованный сигнал считался постоянным. Если рассматривать $\chi_{\rm eq}(290 \ {\rm M}{\rm fm})$ как неизвестную величину, а $\varphi_{\rm ion}$ определять из (16) с помощью значений $N_{\rm et}$ из [14], то из (15) следует, что $\chi_{\rm eq}(290 \ {\rm M}{\rm fm}) = 172,8^\circ$, что больше, чем измерено в [15] и принято в данной работе, всего на 0,8° при ошибке 10° [15].

Радиоастрономический фарадеевский метод, применённый и усовершенствованный в данной работе, позволяет измерить полное электронное содержание до высоты $h_{\text{max}} = (1 \div 2) \cdot 10^3$ км [7, 22], в то время как по двухчастотным фазовым и кодовым измерениям псевдодальности по сигналам спутников GPS получаются значения N_{et} до высоты $h_{\text{max}} \approx 20 \cdot 10^3$ км [21], т. е. включая плазмосферу [30]. Имеющейся точности измерений обоими методами, рассматриваемыми в данной работе, недостаточно, чтобы выделить вклад последней.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2008 и 2009 годах с помощью 10-метрового радиотелескопа выполнены радиоастрономические поляризационные измерения галактического радиоизлучения из области северного полюса мира на частоте 290 МГц. В результате разработки и применения нового метода учёта побочного поляризованного сигнала уточнено значение яркостной температуры поляризованной компоненты диффузного галактического радиоизлучения в направлении области северного полюса мира, составившее $T_{\rm bp290~M\Gamma q}^{\rm CIIM} = 0.83 \pm 0.07$ К.

По данным этих же поляризационных измерений определено полное электронное содержание ионосферы в зависимости от времени суток в условиях глубокого минимума активности Солнца. Минимальные значения ПЭСИ поздней осенью перед рассветом (около 5 ч местного времени) составили 1÷3 TECU, максимальные послеполуденные (в 13–14 ч) — около 10 TECU. Проведено

Е. Н. Виняйкин

сопоставление полученных результатов с интерполированными по географическим координатам значениями полного электронного содержания ионосферы из глобальных ионосферных карт [14], показавшее, что в пределах погрешностей измерений они согласуются. Это обстоятельство позволяет использовать данные [14] для вычисления ионосферных поправок на позиционный угол плоскости поляризации в радиоастрономических поляризационных наблюдениях на волне с длиной около 1 м с точностью $5^{\circ} \div 10^{\circ}$.

Автор благодарен А. М. Пасеке и Б. С. Формозову за подготовку радиотелескопа РТМ-10 к наблюдениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Разин В. А. // Астрон. журн. 1958. Т. 35. С. 241.
- 2. Brouw W. K., Berkhuijsen E. M. // Nature. 1962. V. 196. P. 757.
- 3. Разин В. А., Теплых А. И., Косолапенко В. И. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1988. Т. 28, № 6. C. 1027.
- 4. Разин В. А. // Радиотехника и электроника. 1956. Т. 1, вып. 6. С. 846.
- 5. Westerhout G., Seeger Ch. L., Brouw W. N., Tinbergen J. // Bull. Astron. Institutes Netherlands. 1962. V. 16. P. 187.
- 6. Brouw W. K., Muller C. A., Tinbergen J. // Bull. Astron. Institutes Netherlands. 1962. V. 16. P. 213.
- 7. Разин В. А., Хрулёв В. В., Фёдоров В. Т. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1968. Т. 11, № 10. C.1461.
- 8. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. 684 с.
- 9. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука, 1972. 564 с.
- 10. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 502 с.
- 11. Добрушский Л.А., Косолапенко В.И., Попова Л.В. и др. // Ионосферные волновые возмущения. Алма-Ата: Наука, 1989. С. 128.
- 12. Боголюбов А.А., Добрушский Л.А., Косолапенко В.И и др. // Ионосферные волновые возмущения. Алма-Ата: Наука, 1989. С. 133.
- 13. Baker J. R. // J. Atmos. Terr. Phys. 1972. V. 34. P. 1923.
- 14. ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex.
- 15. Виняйкин Е.Н., Кузнецова И.П., Пасека А.М. и др. // Письма в Астрон. журн. 1996. Т. 22. C. 652.
- 16. Vinyajkin E. N., Razin V. A. // AIP Conf. Proc. 2002. V. 609. P. 26.
- 17. Razin V. A., Vinyajkin E. N., Paseka A. M., Teplykh A. I. // Astrophysics and Cosmology after Gamov. Cambridge Sci. Publ., 2007. P. 443.
- 18. Виняйкин Е. Н. // Труды Двенадцатой научной конф. по радиофизике. Нижний Новгород: ННГУ, 2008. С. 53.
- 19. Виняйкин Е.Н. Результаты научной деятельности ФГНУ НИРФИ за 2008 год: Препринт № 527 НИРФИ. Нижний Новгород, 2009. С. 38.
- 20. Mannucci A. J., Ho C. M., Lindqwister U. J. // Radio Sci. 1998. V. 33. P. 565.
- 21. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Институт солнечно-земной физики, 2006. 479 с.
- 22. Titheridge J. E. // Planet. Space Sci. 1972. V. 20. P. 353.
- 23. Van der Linden R.A.M. and the SIDC team. Online catalogue of the sunspot index: http://sidc.oma.be/html/sunspot.html.

2012

- Абрамов В. И., Белов И. Ф., Волохов С. А., Мельников А. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1976. Т. 19, № 11. С. 1656.
- 25. Виняйкин Е. Н. // Астрон. журн. 2007. Т. 84. С. 105.
- 26. Виняйкин Е. Н. // Труды Пятнадцатой научной конференции по радиофизике. Нижний Новгород: ННГУ, 2011. С. 60.
- 27. Виняйкин Е. Н. // Астрон. журн. 2006. Т. 83. С. 168.
- 28. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. Ч. І. Сигналы, линейные системы с постоянными и переменными параметрами. М.: Сов. радио, 1966. 438 с.
- 29. Виняйкин Е. Н. Сопоставление результатов измерений полного электронного содержания ионосферы радиоастрономическим методом и с помощью сигналов спутников GPS: Препринт № 542 НИРФИ. Нижний Новгород, 2011. 52 с.
- 30. Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 178 с.

Поступила в редакцию 27 июля 2012 г.; принята в печать 5 августа 2012 г.

MEASUREMENTS OF TOTAL ELECTRON CONTENT OF THE IONOSPHERE BY THE RADIOASTRONOMY FARADAY METHOD

E. N. Vinyaikin

In 2008 and 2009, when a deep solar-activity minimum was observed, the total electron content of the ionosphere was measured by the radioastronomy method using the ionospheric Faraday rotation of the polarization plane of a linear-polarized component of the diffuse radio-frequency (RF) radiation of the galaxy. In the measurements performed at a frequency of 290 MHz at the Radioastronomy observatory "Staraya Pustyn" of the Radiophysical Research Institute of Nizhny Novgorod, the previously studied region of the Celestial North Pole was used. The brightness temperature was calibrated by the Cassiopeia A radio source. The time dependence of the Cassiopeia A RF radiation stream density, which was obtained in the period 1978–2011 from the measurement results at a frequency of 290 MHz, is shown. A new method of accounting for a spurious polarized signal allowing for its time dependence was developed and used, which makes it possible to improve the measurement frequency of the time variations of total electron content of the ionosphere. This method allowed us to more accurately measure the brightness temperature of the linearly polarized component of diffuse galaxy RF radiation in the direction of the Celestial North Pole, which amounted to 0.83 ± 0.07 K at a frequency of 290 MHz. For this region of the horizon, we demonstrate the spectra of the brightness temperature and the position angle of the polarization plane of the linearly polarized component of the galaxy diffuse RF radiation ranging from meter to centimeter wavelengths, which allows us to choose the required frequency for the measurements by the radioastronomy Faraday method in the future. The values of the total electron content of the ionosphere are compared with the corresponding values from the global ionospheric maps obtained from observations of the GPS satellite signals. The difference between the average values of total electron content of the ionosphere is $1.9 \cdot 10^{12}$ cm⁻² according to all radioastronomy measurements and the corresponding means from the global ionospheric maps.