

СОПОСТАВЛЕНИЕ
РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ
ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО
СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ
РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИМ
МЕТОДОМ
И С ПОМОЩЬЮ СИГНАЛОВ
СПУТНИКОВ GPS

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Научно-исследовательский радиофизический институт»
(ФГБНУ НИРФИ)

Препринт № 542

Сопоставление результатов измерений
полного электронного содержания ионосферы
радиоастрономическим методом и с помощью сигналов
спутников GPS

Е. Н. Виняйкин

Нижний Новгород
2011

ВИНЯЙКИН Е.Н.
СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ
ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ
РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ
И С ПОМОЩЬЮ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВ GPS.//
Препринт № 542. – Нижний Новгород: ФГБНУ НИРФИ. 2011. 52 с.

Выполнены измерения полного электронного содержания ионосферы (ПЭСИ) радиоастрономическим поляризационно-фарадеевским (РАПФ) методом в годы последнего минимума солнечной активности. Проведено сопоставление полученных значений ПЭСИ с соответствующими по времени и координатам значениями ПЭСИ из глобальных ионосферных карт, полученных с использованием сигналов спутников GPS. Выявлено их согласие в пределах ошибок измерений. Согласие улучшается при обработке данных измерений РАПФ методом с учётом изменения побочного поляризованного сигнала в процессе измерений. Отмечаются различия в суточном ходе ПЭСИ по результатам РАПФ метода и по данным GPS. Уточнено значение яркостной температуры поляризованной компоненты галактического радиоизлучения на частоте 290 МГц в направлении Северного полюса Мира. Обсуждаются перспективы и возможности РАПФ метода измерения ПЭСИ.

1. Введение

Полное электронное содержание ионосферы (ПЭСИ) есть количество свободных электронов в вертикальном столбе с поперечным сечением 1 см^2 или 1 м^2 , то есть интеграл от электронной концентрации по высоте

$$N_{\text{etot}} = \int_0^{\infty} N_e(h) dh. \quad (1)$$

Единицей измерения ПЭСИ является величина $1 \text{ TECU} = 10^{12} \text{ см}^{-2} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$. ПЭСИ является одним из важнейших интегральных параметров ионосферы. С одной стороны, знание этого параметра необходимо для определения угла рефракции, фазовой и групповой задержки, угла поворота плоскости поляризации из-за эффекта Фарадея при трансionoсферном распространении радиоволн [1], а с другой стороны, вариации ПЭСИ являются откликом на различные природные явления (солнечные вспышки, затмения Солнца, геомагнитные возмущения, землетрясения, тайфуны) и техногенные события (взрывы, запуски ракет, нагрев ионосферы мощными радиоволнами), несущим информацию об этих явлениях и событиях.

2. Методы измерений полного электронного содержания ионосферы

Существующие методы измерения ПЭСИ можно различать как по физическим эффектам, используемым при его измерении, так и по используемым при этом приемнике и месте его размещения (поверхность Земли, искусственный спутник Земли (ИСЗ)) и передатчике и его расположении (поверхность Земли, ИСЗ, природный источник радиоволн в космическом пространстве). Большое значение имеют временное и пространственное покрытие и временное разрешение измерений ПЭСИ. Рассмотрим кратко основные методы измерения ПЭСИ по используемым в них физическим эффектам.

Метод вертикального зондирования ионосферы

Здесь используется явление полного внутреннего отражения радиоволны при равенстве её частоты f плазменной частоте f_0 на соответствующем уровне ионосферы h (в современных ионозондах определяется также доплеровский сдвиг частоты) [2, 3]¹. При этом электронная концентрация определяется из соотношения $N_e(h) = 1,24 \cdot 10^4 f^2$ (МГц), где $N_e(h)$ в см⁻³. Высотная зависимость электронной концентрации при зондировании с поверхности Земли в диапазоне 1–20 МГц определяется лишь до высоты максимума $F2$ -слоя, и, чтобы получить $N_e(h)$ выше, необходимо одновременно проводить зондирование сверху в этом же пункте с достаточно высоко находящегося ИСЗ [4]. Далее путем “сшивания” нижнего и верхнего профилей и интегрирования по высоте получают ПЭСИ. Такой подход практически исключает непрерывность измерений ПЭСИ в данном географическом пункте.

Метод некогерентного рассеяния

Метод некогерентного рассеяния основан на анализе рассеяния сигнала мощного радиолокатора свободными электронами ионосферы [5, 6]. Станции некогерентного рассеяния работают на волнах метрового и дециметрового диапазонов длин волн. Получение высотного профиля электронной концентрации $N_e(h)$, в том числе и на высотах выше максимума $F2$ -слоя, а следовательно, и ПЭСИ, основано на обработке измеренных для дискретного набора высот следующих усреднённых параметров некогерентно рассеянного сигнала: мощности, поляризации и положения плазменной линии в его спектре [6]. Чувствительность метода около 1%. Ввиду малой интенсивности рассеянного сигнала для

¹ В этих работах и в [4–8] содержится обширная библиография работ по методам измерений профилей электронной концентрации $N_e(h)$ и ПЭСИ.

реализации данного метода требуются мощные передатчики, большие антенны и высокочувствительные приемники. Общее число станций некогерентного рассеяния во всем мире всего около десяти.

Метод когерентных частот

Этот метод исследования основан на явлении частотной дисперсии плазмы и заключается в просвечивании ионосферы радиосигналами с когерентными частотами, излучаемыми передатчиком, расположенным на космическом аппарате (КА), с последующим измерением на Земле разности фаз сигналов, приведенных к одной частоте [5, 7, 8]. В этом методе используется зависимость разности фаз сигналов на двух когерентно связанных между собой частотах f_1 и f_2 ($(f_1/f_2) = (m/n) < 1$, m и n – целые числа) от интегрального электронного содержания вдоль луча “наземный приёмник – КА”. Если КА достаточно удалён, например спутники навигационных систем ГЛОНАСС ($m/n = 7/9$) и GPS ($m/n = 60/77$), то метод позволяет получать информацию о ПЭСИ (точнее о временных и пространственных вариациях этой величины). В случае размещения передатчика на ИСЗ типа Парус, Транзит (когерентные частоты 150 и 400 МГц), получают информацию о вариациях электронного содержания до высоты орбиты ~ 1000 км. Соотношение между наклонным ПЭСИ и разностью фаз ($\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 \frac{f_2}{f_1}$) сигналов на частотах f_2 и f_1 , приведённой к частоте f_2 , на котором основан данный метод, имеет вид

$$N_{\text{tot}} (10^{12} \text{ см}^{-2}) = 0,744 f_1 (\text{ГГц}) \left(\left(\frac{f_2}{f_1} - 1 \right) \left(\frac{f_1}{f_2} + 1 \right) \right)^{-1} \frac{\Delta\Phi}{2\pi}. \quad (2)$$

Подставляя в (2) $f_1 = 1,2276$ ГГц, $f_2 = 1,57542$ ГГц [7], получим для GPS $N_{\text{tot}}(\text{TECU}) = 1,81 \frac{\Delta\Phi}{2\pi}$. Для системы ГЛОНАСС ($f_1 = 1,25$ ГГц, $f_1/f_2 = 7/9$ [7]) имеем $N_{\text{tot}}(\text{TECU}) = 1,83 \frac{\Delta\Phi}{2\pi}$. Поскольку начальная разность фаз $\Delta\Phi_0$ может оставаться неизвестной, и $\Delta\Phi$ измеряется с точностью до целого числа 2π , то существует неопределённость в значениях N_{tot} . Минимальное значение неопределённости величины N_{tot} , обусловленной $2\pi n$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) неоднозначностью значений $\Delta\Phi$, получается при $\Delta\Phi = \pm 2\pi$ и равно $\pm 1,8$ TECU. Чтобы получить абсолютную величину ПЭСИ, необходимо привлекать дополнительную информацию.² Для построения глобальных карт абсолютных значений ПЭСИ по сигналам GPS используется комбинация двухчастотных фазовых и кодовых измерений [7]. При этом для получения "начального уровня" ПЭСИ, рассчитанного из кодовых измерений, используются непрерывные ряды данных продолжительностью не менее 20 минут [7].

Метод фарадеевского вращения

Данный метод использует эффект Фарадея в намагниченной плазме (ионосфере), заключающийся во вращении плоскости поляризации линейно поляризованной радиоволны при её распространении от КА или ИСЗ, расположенного за пределами ионосферы, к наземному приёмнику [7, 8]. Угол поворота $\varphi_{\text{ион}}$ плоскости поляризации после прохождения радиоволной ионосферы при квазипродольном распространении равен

² В [9] предложен многочастотный фазовый метод получения абсолютных значений ПЭСИ.

$$\varphi_{\text{ion}} (\text{град}) = \frac{1,355}{f^2 (\text{ГГц})} \overline{B(\text{Гс}) \cos \alpha \sec z} N_{\text{etot}} (10^{12} \text{см}^{-2}), \quad (3)$$

где B – величина магнитного поля Земли, α – угол между волновым вектором и вектором магнитного поля, z – зенитный угол источника на высоте h от поверхности Земли; черта означает среднее по лучу зрения в ионосфере.³ Измеряя φ_{ion} , можно определить ПЭСИ, но для этого необходимо знать начальное значение плоскости поляризации излучаемой волны на входе в ионосферу и уметь разрешать неопределённость $n \cdot 180^\circ$ ($n=0, \pm 1, \pm 2 \dots$) в значениях φ_{ion} . В противном случае измеримы лишь вариации ПЭСИ.

Разновидностью фарадеевского метода являются измерения ПЭСИ по измерению фарадеевского вращения при радиолокации Луны [10].

Радиоастрономический поляризационно-фарадеевский (РАПФ) метод

Если в качестве источника линейно поляризованного сигнала использовать частично линейно поляризованное синхротронное радиоизлучение межзвёздной среды Галактики, то фарадеевский метод называется радиоастрономическим поляризационно-фарадеевским (РАПФ) методом [11, 12] (см. также [13]). В качестве источника линейно поляризованного сигнала удобно использовать область Северного полюса Мира (СПМ) [14]. Горизонтальные угловые координаты этой области небосвода в Радиоастрономической обсерватории ФГБНУ НИРФИ “Старая Пустынь” таковы: азимут 180° , угол места, равный географической широте места, $55^\circ 39'$ (долгота пункта $2^{\text{h}}54,5^{\text{m}}$). Полюс Мира неподвижен на небосводе, и поэтому не требуется сопровождения данной области антенной радиотелескопа. Луч зрения фиксирован относительно ионосферы, в связи с чем, область СПМ весьма удобна для измере-

³ В (3) предполагается сферическая слоистость ионосферы, по меньшей мере, вдоль луча визирования.

ний чисто временных вариаций ПЭСИ различных масштабов. Фиксированный луч зрения можно обеспечить также при использовании передатчиков на геостационарных спутниках, однако на средних и высоких географических широтах они наблюдаются на слишком низких углах, чтобы получать достоверные сведения о ПЭСИ в подионосферной точке ввиду существенного влияния горизонтальных градиентов этой величины на больших расстояниях. Важно то, что измерения РАПФ методом возможны в произвольных направлениях с использованием заранее прокалиброванных по поляризационным параметрам радиоизлучения областей небосвода.

Из рассмотренных методов РАПФ метод наиболее дешёв, поскольку не требует запуска и поддержания работоспособности космических аппаратов, и экологичен, поскольку сигналы космического радиоизлучения имеют естественное происхождение и весьма слабы, в отличие от мощных сигналов передатчиков, используемых в активных наземных измерениях ПЭСИ (метод зондирования, метод некогерентного рассеяния). РАПФ метод опирается на результаты радиоастрономических поляризационных исследований распределенного (диффузного) галактического радиоизлучения в метровом и дециметровом диапазонах длин волн, выполненных ранее в НИРФИ [14–17]. В ходе этих исследований получены, в частности, спектры яркостной температуры и позиционного угла плоскости поляризации линейно поляризованной компоненты диффузного галактического радиоизлучения в избранных направлениях, что открывает возможность использования некоторых областей небосвода в качестве естественных источников линейно поляризованного радиоизлучения с известным, зависящим от частоты, позиционным углом плоскости поляризации за пределами ионосферы. Распространяясь в земной ионосфере, радиоволны от этих природных “передатчиков” подвергаются воздействию эффекта Фарадея, то есть их плоскость поляризации поворачивается на определенный угол. Величина этого угла пропорциональна полному электронному содержанию ионосферы согласно (3), что и позволяет измерять последнее. Необходимость измерений текущих значений ПЭСИ обусловлена его изменчиво-

стью в силу влияния, как отмечалось выше, многочисленных природных воздействий, главным из которых является активность Солнца, а также различных антропогенных факторов. Существующие модели ионосферы могут предсказать лишь некоторые средние значения ПЭСИ, оставляя за текущими измерениями его точные непредсказуемые значения. Знание ПЭСИ необходимо во многих задачах трансионосферной связи, космической навигации, прикладной радиоастрономии, геофизики и физики атмосферы. Данная работа посвящена сопоставлению результатов измерений ПЭСИ РАПФ методом, выполненных в годы глубокого минимума солнечной активности (2008–2009 гг.), со значениями ПЭСИ из глобальных ионосферных карт, полученных по измерениям сигналов спутников GPS [18].

3. Радиоастрономические измерения полного электронного содержания ионосферы в зависимости от времени суток в период минимальной активности Солнца

В октябре 2008 г., апреле и ноябре 2009 г. в Радиоастрономической обсерватории ФГБНУ НИРФИ “Старая Пустынь” (РАО СП) были выполнены измерения ПЭСИ РАПФ методом. Их главной целью было получение значений ПЭСИ в период глубокого минимума солнечной активности, имевшего место между 23-м и 24-м циклами активности Солнца. Эти данные можно сопоставить с соответствующими значениями из GPS ионосферных карт [18], а в дальнейшем со значениями ПЭСИ в текущем 24-м цикле солнечной активности. В качестве источника линейно поляризованного сигнала использовалась область Северного полюса Мира, удобство применения которой для измерений ПЭСИ отмечено выше. Яркостная температура линейно поляризованной компоненты галактического радиоизлучения в направлении СПМ на частоте 290 МГц равна $1,8 \pm 0,4$ К ($0,9 \pm 0,2$ К при использовании определения,

принятого Международным Астрономическим союзом ⁴), позиционный угол плоскости поляризации $172^\circ \pm 10^\circ$ [14]. В измерениях использовался радиотелескоп РТМ-10 с 10-метровой параболической антенной, оснащенный модуляционным радиометром на частоту $f=290$ МГц с полосой 3 МГц и чувствительностью $0,2 \text{ К с}^{1/2}$, что при постоянной времени 16 с, применявшейся в наблюдениях, соответствует 0,05 К. Использовался коаксиальный облучатель с двумя ортогональными парами линейных вибраторов (возбуждаемых противофазно и с одинаковой амплитудой), выполняющими роль разделителя ортогональных линейных поляризаций. Сигнал с них подавался на входы переключателя поляризаций (модулятора), с выхода которого через вентиль поступал на вход первого усилителя радиометра. Далее с выхода первого усилителя сигнал через коаксиальное вращающееся сочленение подавался на основную часть радиометра в кабине РТМ-10. Методика поляризационных измерений заключалась в непрерывном вращении облучателя с переключаемыми линейными поляризациями против часовой стрелки (для направления визирования) и регистрации возникающего при этом квазисинусоидального сигнала на второй гармонике частоты вращения с медленно изменяющимися, в масштабе периода вращения $T=4,7$ мин, амплитудой и фазой. Этот сигнал соответствует на плоскости параметров Стокса линейной поляризации векторной сумме полезного сигнала (в данном случае это галактическое частично линейно поляризованное радиоизлучение из области СПМ) и побочного поляризованного сигнала (ППС). Последний обусловлен, в основном, частично линейно поляризованным собственным радиоизлучением земной поверхности в месте расположения радиотелескопа и отражённым от неё и также частич-

⁴ Ниже будем использовать именно это определение яркостной температуры $T_{\text{бр}}$ поляризованной компоненты диффузного галактического радиоизлучения, связанного с интенсивностью $I_{\text{р}}$ поляризованной компоненты законом Рэлея–

Джинса в таком же виде, как и для неполяризованного излучения: $I_{\text{р}} = \frac{2kT_{\text{бр}}}{\lambda^2}$.

но линейно поляризованным галактическим радиоизлучением; в дневное время существенно ещё и отражённое радиоизлучение Солнца. Калибровка радиотелескопа по яркостной температуре осуществлялась при его работе в режиме измерения интенсивности по радиоизлучению мощного космического радиоисточника Кассиопея А, являющегося молодым остатком сверхновой. Плотность потока радиоизлучения Кассиопеи А на среднюю эпоху измерений принималась равной 6150 Ян на частоте 290 МГц согласно [19] ($1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт/м}^2\text{Гц}$). Юстировка по позиционному углу облучателя осуществлялась путём выставления одной из двух ортогональных пар линейных вибраторов в вертикальное положение и установки при этом стрелки сельсин-приёмника, показывающей угол поворота облучателя, на ноль круговой шкалы углового положения облучателя.

4. Редукция данных измерений полного электронного содержания ионосферы

Перейдём к более подробному описанию редукции данных поляризационных наблюдений галактического радиоизлучения, проводимых с целью определения ПЭСИ. Введём в картинной плоскости (плоскости, перпендикулярной лучу зрения) декартовую систему координат x_δ, y_α (ось x_δ направлена к Северному полюсу Мира, ось y_α к востоку), вращающуюся вместе с небосводом. Вектор Стокса радиоизлучения избранной области небосвода в этой системе координат обозначим как

$S_{\text{eq}} = \begin{pmatrix} I \\ Q_{\text{eq}} \\ U_{\text{eq}} \\ V_{\text{eq}} \end{pmatrix}$. Введём также в картинной плоскости декартовую систему

координат x, y , ось x которой направлена снизу вверх к зениту, ось y справа налево на восток⁵. Свяжем ещё с ортогональными парами ли-

⁵ О целесообразности выбора такой системы координат см., например, [20].

нейных вибраторов оси декартовых координат x', y' , повернутых на угол φ относительно x, y ($\varphi > 0$, если поворот осуществлён против часовой стрелки, глядя на небо). Вектор Стокса $S(\varphi)$ радиоизлучения избранной области в координатах x', y' можно получить из вектора S_{eq} следующим образом:

$$S(\varphi) = \begin{pmatrix} I \\ Q(\varphi) \\ U(\varphi) \\ V(\varphi) \end{pmatrix} = \mathbf{M}_R(\varphi) \mathbf{M}_R(-\varphi_{\text{ion}}) \mathbf{M}_R(q_{\text{eq}}) \begin{pmatrix} I \\ Q_{\text{eq}} \\ U_{\text{eq}} \\ V_{\text{eq}} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где

$$\mathbf{M}_R(\psi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\psi & \sin 2\psi & 0 \\ 0 & -\sin 2\psi & \cos 2\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

– матрица Мюллера вращателя [20]⁶, φ_{ion} – угол фарадеевского поворота плоскости линейной поляризации радиоволны после прохождения ею ионосферы (для РАО СП эта величина положительная, так как вращение происходит против часовой стрелки, глядя на область излучения), q_{eq} – экваториальный параллактический угол,

$$\text{tg}q_{\text{eq}} = \frac{\cos \varphi_g \sin(s - \alpha_r)}{\sin \varphi_g \cos \delta_r - \cos \varphi_g \sin \delta_r \cos(s - \alpha_r)}, \quad (6)$$

⁶ Матрица $\mathbf{M}_R(\psi)$ описывает изменение вектора Стокса при повороте исходной системы декартовых координат на угол ψ или воздействие вращающей среды, которое приводит к повороту плоскости поляризации линейно поляризованной волны на угол $-\psi$ относительно осей фиксированной системы декартовых координат.

где φ_g – географическая широта места, α_r и δ_r – прямое восхождение и склонение области наблюдения, s – местное звёздное время, $\varphi = \Omega(t - t_0)$, $\Omega = 2\pi/T$, $T = 4,7$ мин – период вращения облучателя. Для области Северного полюса Мира ($\alpha_r = 0, \delta_r = \pi/2$), как следует из (6), $q_{\text{eq}} = -s = -t_{\text{H}}$ (t_{H} – часовой угол).

На выходе модуляционного радиометра регистрируется квазисинусоидальный сигнал с медленно меняющимися (в масштабе периода T) амплитудой и фазой, представляющий собой сглаженный интегрирующей RC -цепочкой радиометра отклик на разность $I_{x'x'}\eta_{x'} - I_{y'y'}\eta_{y'}$ ($I_{x'x'}, I_{y'y'}$ – элементы матрицы когерентности [20], $\eta_{x'}$ и $\eta_{y'}$ – КПД плеч переключателя поляризации, соответствующих поляризациям вдоль оси x' и вдоль оси y'). Полный выходной сигнал, который обозначим как $Q'(\varphi)$ (измеряется в мВ или в отсчётах АЦП), может быть записан в виде ⁷

$$\begin{aligned} Q'(\varphi) &= G\alpha^{-1} \left\{ [\cos 2(\varphi - \varphi_r)] Q_{\Sigma} + [\sin 2(\varphi - \varphi_r)] U_{\Sigma} \right\} + G(T_A - T_0)(\Delta\eta/\bar{\eta}) = \\ &= G\alpha^{-1} \left[(\cos 2\varphi) \tilde{Q}_{\Sigma} + (\sin 2\varphi) \tilde{U}_{\Sigma} \right] + G(T_A - T_0)(\Delta\eta/\bar{\eta}), \end{aligned} \quad (7)$$

где $G = G(t) = G_R(t)\bar{\eta}$, $G_R(t)$ – коэффициент усиления радиометра

(после переключателя), $\bar{\eta} = \frac{\eta_{x'} + \eta_{y'}}{2}$, $\Delta\eta = \eta_{x'} - \eta_{y'}$, $\alpha = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi\tau}{T}\right)^2}$,

$\varphi = \Omega(t - t_0)$, T_A – полная антенная температура, T_0 – физическая температура переключателя, Q и U – параметры Стокса радиоизлучения

⁷ Предполагается осесимметричная диаграмма направленности антенны и идеальное вращающееся сочленение. На практике в правой части (7) может быть первая гармоника частоты вращения облучателя Ω , вторая гармоника, обусловленная эллиптичностью главного луча антенны и неоднородностью фона и другие паразитные составляющие.

наблюдаемой области в антенных температурах, усреднённые по главному лучу антенны, в системе координат x, y , $Q_{\text{поб}}$ и $U_{\text{поб}}$ – параметры Стокса побочного поляризованного сигнала в антенных температурах в системе координат x, y , $\varphi_\tau = \frac{1}{2} \arctg(2\Omega\tau) \approx \frac{2\pi\tau}{T}$ – задержка по позиционному углу из-за влияния интегрирующей цепочки радиометра с постоянной времени τ [15, 21] (учтено, что $\tau \ll T$);

$$\begin{aligned} Q_\Sigma &= Q + Q_{\text{поб}} = [\cos 2(\varphi_{\text{ion}} - q_{\text{eq}})]Q_{\text{eq}} - [\sin 2(\varphi_{\text{ion}} - q_{\text{eq}})]U_{\text{eq}} + Q_{\text{поб}}, \\ U_\Sigma &= U + U_{\text{поб}} = [\sin 2(\varphi_{\text{ion}} - q_{\text{eq}})]Q_{\text{eq}} + [\cos 2(\varphi_{\text{ion}} - q_{\text{eq}})]U_{\text{eq}} + U_{\text{поб}}, \quad (8)^8 \\ \tilde{Q}_\Sigma &= \tilde{Q} + \tilde{Q}_{\text{поб}} = (\cos 2\varphi_\tau)Q_\Sigma - (\sin 2\varphi_\tau)U_\Sigma, \\ \tilde{U}_\Sigma &= \tilde{U} + \tilde{U}_{\text{поб}} = (\sin 2\varphi_\tau)Q_\Sigma + (\cos 2\varphi_\tau)U_\Sigma. \end{aligned}$$

Последние два уравнения в (8) можно записать в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} \tilde{Q}_\Sigma \\ \tilde{U}_\Sigma \end{pmatrix} = \mathbf{M}_R(-\varphi_\tau) \begin{pmatrix} Q_\Sigma \\ U_\Sigma \end{pmatrix}. \quad (8a)$$

Уравнение (8a) можно, разумеется, записать и отдельно для параметров Стокса полезного и побочного сигналов:

$$\begin{pmatrix} \tilde{Q} \\ \tilde{U} \end{pmatrix} = \mathbf{M}_R(-\varphi_\tau) \begin{pmatrix} Q \\ U \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \tilde{Q}_{\text{поб}} \\ \tilde{U}_{\text{поб}} \end{pmatrix} = \mathbf{M}_R(-\varphi_\tau) \begin{pmatrix} Q_{\text{поб}} \\ U_{\text{поб}} \end{pmatrix}. \quad (8b)$$

Редукция данных измерений и получение зависимости ПЭСИ от времени суток велась следующим образом:

⁸ Первые два уравнения в (8) являются уравнениями окружности в параметрической форме (параметр $\varphi_{\text{ion}} - q_{\text{eq}}$) в координатах Q_Σ , U_Σ , если параметры Стокса побочного поляризованного сигнала постоянны в сеансе измерений. Волнистая линия над значками параметров Стокса в (7), (8) и ниже означает влияние интегрирующей цепочки на фазу квазисинусоиды.

1. Для каждого периода вращения облучателя по регистрируемому сигналу $Q'(\varphi)$ вычислялись суммарные параметры Стокса $(\tilde{Q}'_{\Sigma})_n$, $(\tilde{U}'_{\Sigma})_n$ в координатах x, y , с поправкой за уменьшение интегрирующей цепочки амплитуды квазисинусоиды, по следующим формулам ($n = 0, 1 \dots N - 1$ – номер периода, N – количество полных оборотов облучателя в сеансе измерений):

$$(\tilde{Q}'_{\Sigma})_n = \frac{1}{4} \alpha \frac{G_0}{G_n} \left[Q'(\varphi = 2\pi n) - Q'(\varphi = 2\pi n + \frac{\pi}{2}) + Q'(\varphi = \pi(2n + 1)) - Q'(\varphi = \pi(2n + 1) + \frac{\pi}{2}) \right] \quad (9),$$

$$(\tilde{U}'_{\Sigma})_n = \frac{1}{4} \alpha \frac{G_0}{G_n} \left[Q'(\varphi = 2\pi n + \pi/4) - Q'(\varphi = 2\pi n + \frac{3\pi}{4}) + Q'(\varphi = \pi(2n + 1) + \pi/4) - Q'(\varphi = \pi(2n + 1) + \frac{3\pi}{4}) \right] \quad (10),$$

где $\frac{G_0}{G_n} = \left(1 + \frac{V_{\text{CasA2}} - V_{\text{CasA1}}}{V_{\text{CasA1}}} \frac{n}{N - 1} \right)^{-1}$, если калибровок всего две, V_{CasA1}

и V_{CasA2} величины калибровочного сигнала в первой (перед сеансом) и второй (по его завершению) калибровках по радиоизлучению Кассиопеи А. Заметим, что калибровка производится в режиме измерения интенсивности с использованием каждой из ортогональных пар вибраторов и берётся средняя величина. Из (9) и (10) видно, что $(\tilde{Q}'_{\Sigma})_n$ и $(\tilde{U}'_{\Sigma})_n$ выражаются в тех же единицах, что и $Q'(\varphi)$.

Вычисление по формулам (9) и (10) позволяет исключить независимую от φ составляющую (третье слагаемое в правых частях (7)), обусловленную разностью потерь в плечах переключателя поляризации (модулятора), и отфильтровать возможную на практике нежелательную

первую гармонику частоты Ω функции $Q'(\varphi)$ ⁹. Отметим, что величины параметров Стокса со штрихом (это параметры на выходе радиометра с поправкой на амплитуду за постоянную времени, выраженные в mV или в отсчётах АЦП) связаны с нештрихованными (теми же величинами, но пересчитанными на вход без учёта влияния RC -цепочки на фазу квазисинусоиды и выраженными в градусах Кельвина) следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \tilde{Q}'_{\Sigma} \\ \tilde{U}'_{\Sigma} \end{pmatrix} = G_0 \begin{pmatrix} \tilde{Q}_{\Sigma} \\ \tilde{U}_{\Sigma} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \tilde{Q}'_{\text{поб}} \\ \tilde{U}'_{\text{поб}} \end{pmatrix} = G_0 \begin{pmatrix} \tilde{Q}_{\text{поб}} \\ \tilde{U}_{\text{поб}} \end{pmatrix}. \quad (10a)$$

2. На плоскости параметров Стокса линейной поляризации наносятся все точки $(\tilde{Q}'_{\Sigma})_n, (\tilde{U}'_{\Sigma})_n$ данного сеанса измерений. Из полученного графика видно, что изображающие точки приблизительно следуют окружности, радиус которой, как видно из (8), пропорционален величине линейно поляризованного сигнала $\sqrt{Q_{\text{eq}}^2 + U_{\text{eq}}^2}$, а координаты центра отвечают параметрам Стокса ППС, в первом приближении предполагаемого постоянным¹⁰. Движение изображающей точки на плоскости параметров Стокса обусловлено вращением небосвода (изменением параллактического угла q_{eq} со временем) и изменением угла $\varphi_{\text{юн}}$ фарадеевского вращения в ионосфере со временем.

⁹ Использование (9), (10) означает, что временное разрешение, с которым определяются параметры Стокса, 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 $\pi\tau/\sqrt{3} = 29$ с при $\tau = 16$ с.

¹⁰ Если антенна радиотелескопа имеет экваториальную монтировку, то, наоборот, радиус окружности пропорционален величине ППС, а координаты её центра соответствуют параметрам Стокса галактического поляризованного сигнала.

3. Методом наименьших квадратов находится окружность на плоскости параметров Стокса, радиус и координаты центра которой доставляют минимум функции трёх определяемых параметров

$$F(\tilde{Q}'_{\text{поб}}, \tilde{U}'_{\text{поб}}, T'_p) = \sum_{n=0}^{N-1} \left(\sqrt{\left[(\tilde{Q}'_{\Sigma})_n - \tilde{Q}'_{\text{поб}} \right]^2 + \left[(\tilde{U}'_{\Sigma})_n - \tilde{U}'_{\text{поб}} \right]^2} - T'_p \right)^2. \quad (11)$$

Значения параметров $\tilde{Q}'_{\text{поб}}, \tilde{U}'_{\text{поб}}, T'_p$ (все в mV или отсчётах АЦП) получаются решением системы трёх уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(\tilde{Q}'_{\text{поб}}, \tilde{U}'_{\text{поб}}, T'_p)}{\partial \tilde{Q}'_{\text{поб}}} &= 0, \\ \frac{\partial F(\tilde{Q}'_{\text{поб}}, \tilde{U}'_{\text{поб}}, T'_p)}{\partial \tilde{U}'_{\text{поб}}} &= 0, \\ \frac{\partial F(\tilde{Q}'_{\text{поб}}, \tilde{U}'_{\text{поб}}, T'_p)}{\partial T'_p} &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

4. Определяется наблюдаемое значение позиционного угла плоскости поляризации радиоизлучения наблюдаемой области в горизонтальных координатах x, y [20] (отсчитывается от вертикальной оси x против часовой стрелки (к востоку)) для каждого периода:

$$\tilde{\chi}_n = \frac{1}{2} \text{angle} \left(\left(\tilde{Q}'_{\Sigma} \right)_n - \tilde{Q}'_{\text{поб}}, \left(\tilde{U}'_{\Sigma} \right)_n - \tilde{U}'_{\text{поб}} \right). \quad (13)$$

5. Учитывается поправка φ_{τ} на позиционный угол за постоянную времени $\tau = RC$ интегрирующей RC -цепочки радиометра (см. выше)¹¹

¹¹ При постоянной времени $\tau = 16\text{с}$ и периоде вращения облучателя $T = 4,7\text{мин}$ поправка $\varphi_{\tau} = 20,4^{\circ}$. Действия (14) можно избежать, если вместо (13) сразу вычислить $\chi_n = \frac{1}{2} \text{angle} \left((Q_{\Sigma})_n - Q_{\text{поб}}, (U_{\Sigma})_n - U_{\text{поб}} \right)$, используя, как и в (13), $(\tilde{Q}'_{\Sigma})_n, (\tilde{U}'_{\Sigma})_n, \tilde{Q}'_{\text{поб}}, \tilde{U}'_{\text{поб}}$ и имея ввиду формулы (8а), (8b) и (10а).

$$\chi_n = \tilde{\chi}_n - \varphi_\tau. \quad (14)$$

6. Учитывается вращение небосвода, то есть вводится текущая поправка за параллактический угол (для момента середины n -го периода вращения облучателя):

$$\chi_{\text{eqn}} = \tilde{\chi}_n - \varphi_\tau + q_{\text{eq}}. \quad (15)$$

7. Вычитается начальное (на входе в ионосферу) известное заранее значение позиционного угла плоскости поляризации радиоизлучения наблюдаемой области χ_{eq0} в экваториальных координатах x_δ, y_α . Остаток $(\varphi_{\text{ion}})_n$ равен углу поворота плоскости поляризации в ионосфере в момент времени, соответствующий n -у периоду вращения облучателя:

$$(\varphi_{\text{ion}})_n = \chi_{\text{eqn}} - \chi_{\text{eq0}}. \quad (16)$$

Значения полного электронного содержания N_{tot} (ПЭСИ) для подионосферной точки (см. ниже) при наблюдениях области СПМ в РАО СП на частоте 290 МГц находились по измеренному углу поворота φ_{ion} плоскости поляризации галактического радиоизлучения в ионосфере из соотношения, вытекающего из (3):

$$N_{\text{tot}} (10^{12} \text{ см}^{-2}) = 0,185 \cdot \varphi_{\text{ion}} (\text{град})^{12}. \quad (17)$$

¹² Угловая скорость движения изображающей точки по окружности против часовой стрелки на плоскости Q, U при наблюдении области СПМ при постоянном значении ПЭСИ равна $15^\circ \text{ час}^{-1}$ из-за вращения небосвода и соответствующего равномерного уменьшения параллактического угла. При уменьшении ПЭСИ, например после дневного максимума, со скоростью $-0,185 \cdot 15^\circ \text{ час}^{-1} = -2,775 \text{ TECU час}^{-1}$ движение изображающей точки прекращается, а при ещё более быстром уменьшении ПЭСИ возникает попятное движение, то есть по часовой стрелке.

8. Чтобы выразить величины параметров Стокса и температуры поляризованной компоненты галактического радиоизлучения в яркостных температурах (в градусах Кельвина), следует вычислить калибровочный коэффициент

$$A = \frac{1}{2} \frac{\lambda^2 D_m S_{\text{CasA}}(\lambda, t)}{8\pi k}, \quad (18)$$

где $\lambda = 1,03\text{м}$ – длина волны, D_m – коэффициент направленного действия антенны по главному лучу, $S_{\text{CasA}}(\lambda, t)$ – плотность потока калибровочного источника Кассиопея А на волне λ , в эпоху измерений t , k – постоянная Больцмана, коэффициент $1/2$ обеспечивает принятое МАС определение яркостной температуры поляризованной компоненты (см. выше)¹³. При вычислении (18) предполагалось, что средние значения параметров Стокса галактического радиоизлучения, приходящего по боковым лепесткам, равны нулю (из-за разброса позиционных углов в различных участках небосвода), а вклад поляризованных составляющих собственного радиоизлучения Земли и отраженного от неё галактического радиоизлучения обуславливает побочный поляризованный сигнал, учитываемый при редукции данных наблюдений.

Значения яркостной температуры поляризованной компоненты галактического радиоизлучения, соответствующие усреднённым по главному лучу значениям параметров Стокса, равны

$$T_{\text{bp}} = A \frac{T'_p}{V_{\text{CasA1}}}, \quad (19)$$

где V_{CasA1} – величина выходного сигнала от калибровочного источника Кассиопея А в первой калибровке, взятая в тех же единицах, что и T'_p

¹³ При $D_m = 585$, $S_{\text{CasA}} = 6150\text{Ян}$ на частоте 290 МГц, имеем $A = 5,375$.

(mV или отсчёты АЦП). Аналогично, если надо выразить параметры Стокса полезного сигнала в яркостных температурах, то

$$\tilde{Q}_b = A \frac{\tilde{Q}'}{V_{\text{CasA1}}}, Q_b = A \frac{Q'}{V_{\text{CasA1}}}, \tilde{U}_b = A \frac{\tilde{U}'}{V_{\text{CasA1}}}, U_b = A \frac{U'}{V_{\text{CasA1}}}. \quad (19a)$$

5. Результаты измерений полного электронного содержания ионосферы в предположении постоянства побочного поляризованного сигнала в сеансе измерений

Побочный сигнал превышает полезный при наблюдениях области СПМ на частоте 290 МГц на радиотелескопе РТМ-10 в 2,4 раза (среднее по проведённым семи сеансам). Все точки $(\tilde{Q}'_{\Sigma})_n, (\tilde{U}'_{\Sigma})_n$ на плоскости параметров Стокса при наблюдениях области СПМ во всех семи сеансах расположены в одной и той же четверти, а именно – в третьей. На рис.1, в качестве примера, показана плоскость суммарных значений параметров Стокса на выходе радиометра в сеансе 11–12.11.2009¹⁴.

¹⁴ Если, как на рис.1, побочный поляризованный сигнал находится в третьей четверти на плоскости параметров Стокса суммарного поляризованного сигнала и превышает (или равен) по величине полезный $\sqrt{\tilde{Q}'_{\text{поб}}{}^2 + \tilde{U}'_{\text{поб}}{}^2} \geq T'_p$, то максимально возможный интервал изменения величины суммарного поляризованного сигнала составляет $\left[\sqrt{\tilde{Q}'_{\text{поб}}{}^2 + \tilde{U}'_{\text{поб}}{}^2} - T'_p, \sqrt{\tilde{Q}'_{\text{поб}}{}^2 + \tilde{U}'_{\text{поб}}{}^2} + T'_p \right]$, а максимально возможный интервал изменения угла между осью \tilde{Q}'_{Σ} и текущим положением вектора суммарного поляризованного сигнала на плоскости параметров Стокса равен $\left[\pi + \arctg \tilde{U}'_{\text{поб}} / \tilde{Q}'_{\text{поб}} - \arctg T'_p / \sqrt{\tilde{Q}'_{\text{поб}}{}^2 + \tilde{U}'_{\text{поб}}{}^2} - (T'_p)^2, \pi + \arctg \tilde{U}'_{\text{поб}} / \tilde{Q}'_{\text{поб}} + \arctg T'_p / \sqrt{\tilde{Q}'_{\text{поб}}{}^2 + \tilde{U}'_{\text{поб}}{}^2} - (T'_p)^2 \right]$ (предполагается, что побочный сигнал постоянен). Если, как в нашем случае, $\sqrt{\tilde{Q}'_{\text{поб}}{}^2 + \tilde{U}'_{\text{поб}}{}^2} \gg T'_p$, то указанный угол изменяется в пределах ${}_{+}T'_p / \sqrt{\tilde{Q}'_{\text{поб}}{}^2 + \tilde{U}'_{\text{поб}}{}^2}$ от среднего значения $\pi + \arctg \tilde{U}'_{\text{поб}} / \tilde{Q}'_{\text{поб}}$. Например для сеанса 11–12.11.2009 интервал изменения угла равен $[207^{\circ} \div 257^{\circ}]$.

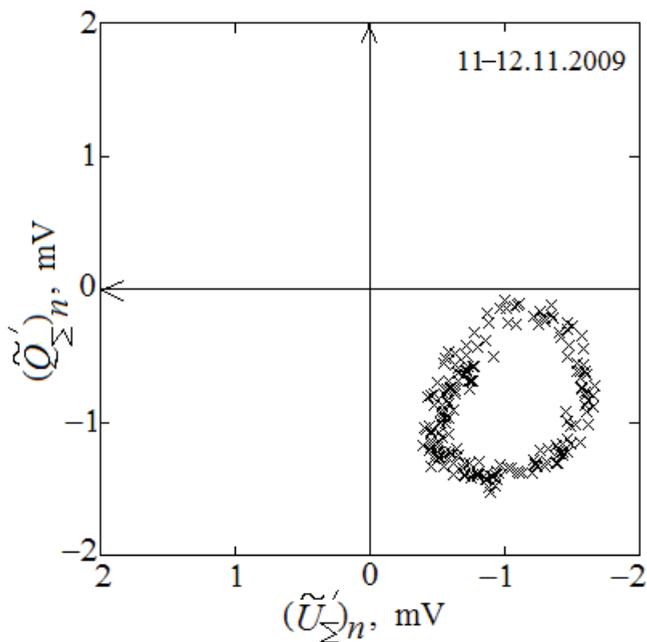


Рис.1

На рис.2, 5 приведены, как пример, результаты обработки данных двух сеансов измерений ПЭСИ в виде косых крестиков (каждый крестик соответствует n -у периоду вращения облучателя) на плоскости параметров Стокса \tilde{Q}_b, \tilde{U}_b вместе с окружностями, полученными методом наименьших квадратов, на рис.3, 6 – графики отклонений

$$R = \sqrt{\tilde{Q}_b'^2 + \tilde{U}_b'^2} - T_{bp} \quad (20)$$

значений яркостной поляризационной температуры, измеренной в каждом периоде, от значения радиуса наилучшей окружности T_{bp} ; горизонтальные линии на рис.3, 6 указывают уровни $\pm 3\sigma$. На рис.4, 7 показаны графики значений $N_{\text{tot}} (10^{12} \text{ см}^{-2})$ для каждого периода (косые крестики) и значения ПЭСИ, полученные путём медианного сглаживания

по двухчасовым интервалам времени, в зависимости от времени суток (здесь и ниже время московское, зимнее, которое опережает гринвическое на 3 часа)¹⁵. Там же приведены данные (заполненные квадратики), взятые в те же интервалы времени из глобальных ионосферных карт [18] для географических координат подионосферной точки, соответствующей пересечению луча визирования в направлении СПМ с ионосферой на высоте максимума $N_e(h)$ (подионосферная точка расположена приблизительно на 2° севернее РАО "Старая Пустынь").

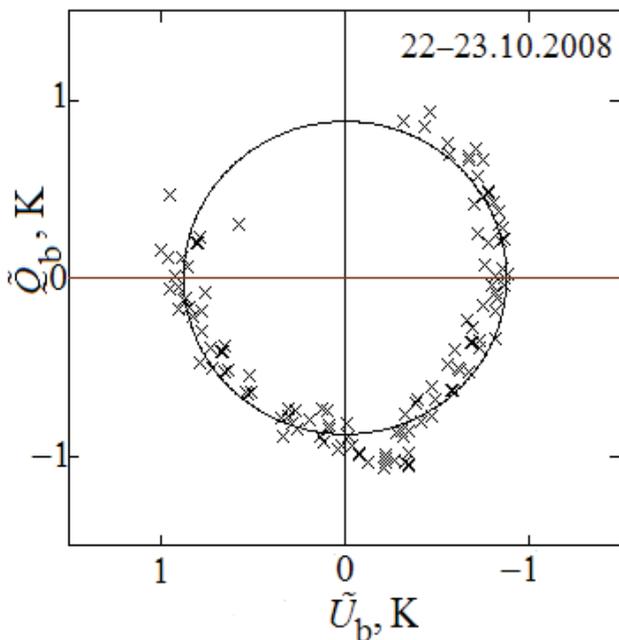


Рис.2

¹⁵ Из рис.4 видно, что, помимо общего суточного хода, показанного кривой двухчасового сглаживания, наблюдаются волнообразные возмущения ПЭСИ с периодом около 1 часа, виден ночной максимум вблизи полуночи. Подобные детали поведения ПЭСИ видны и в других сеансах наблюдений (см. ниже). В данной работе ограничимся обсуждением суточного хода ПЭСИ.

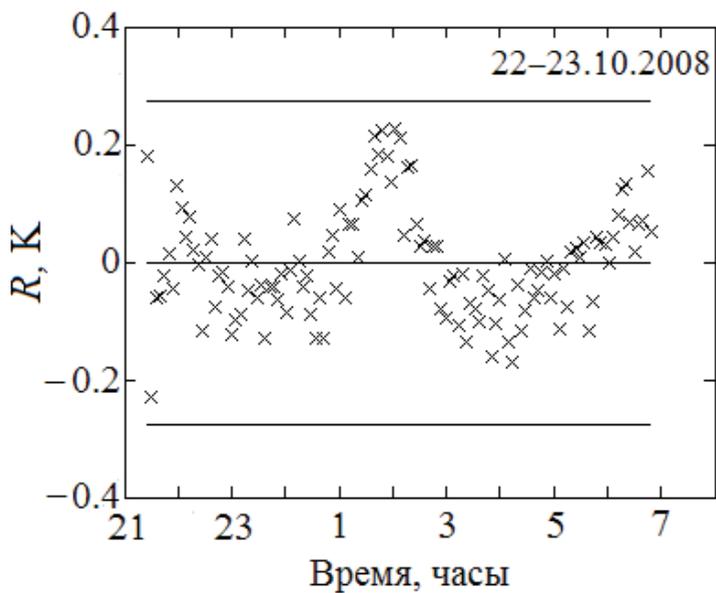


Рис.3

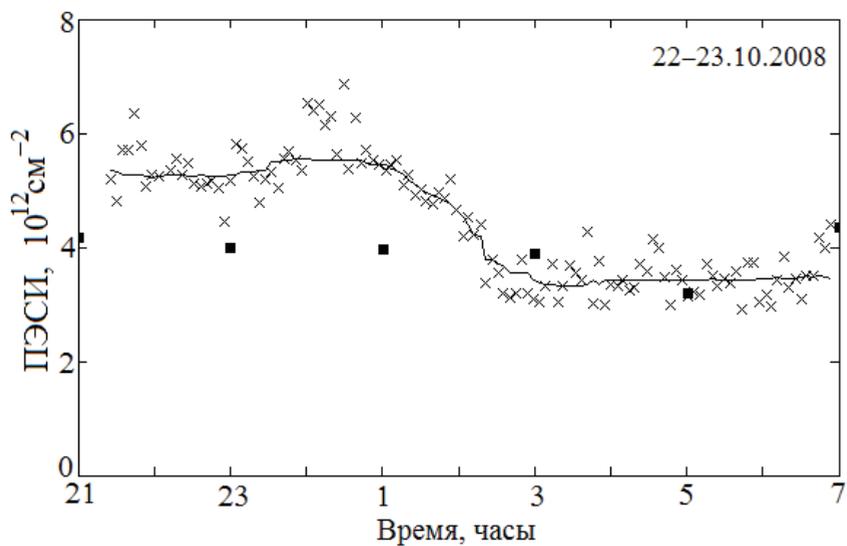


Рис.4

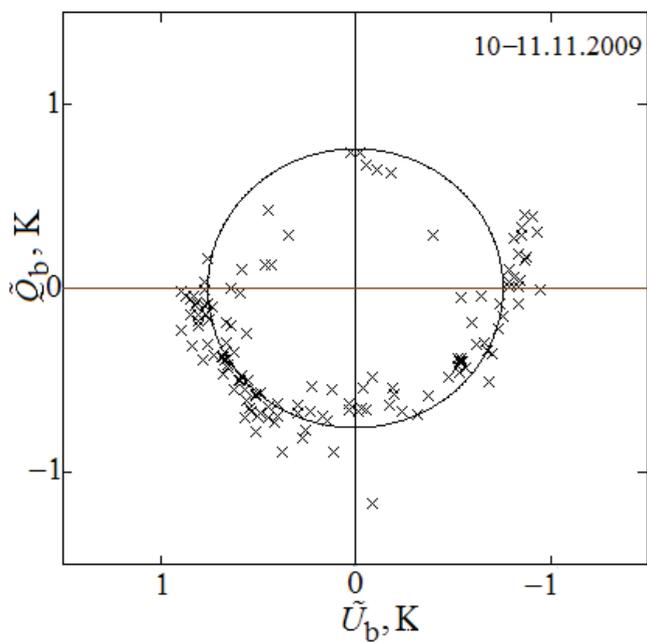


Рис.5

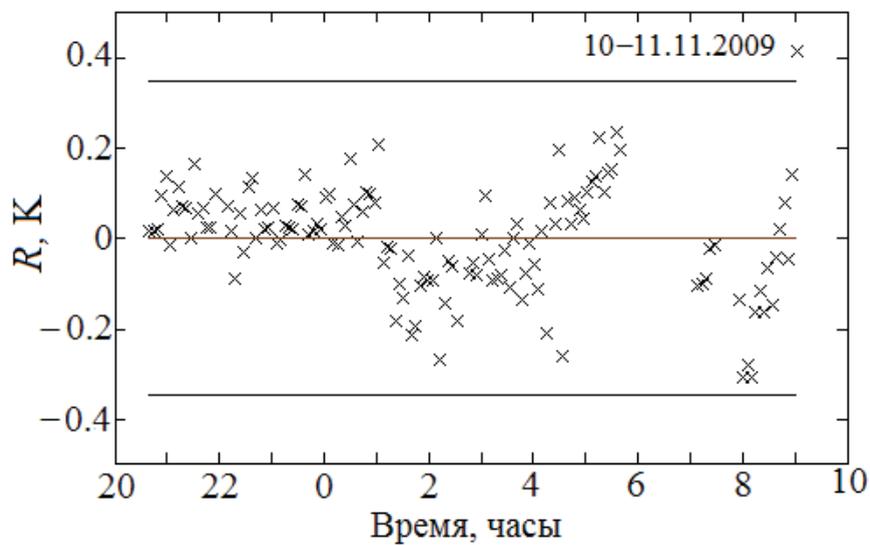
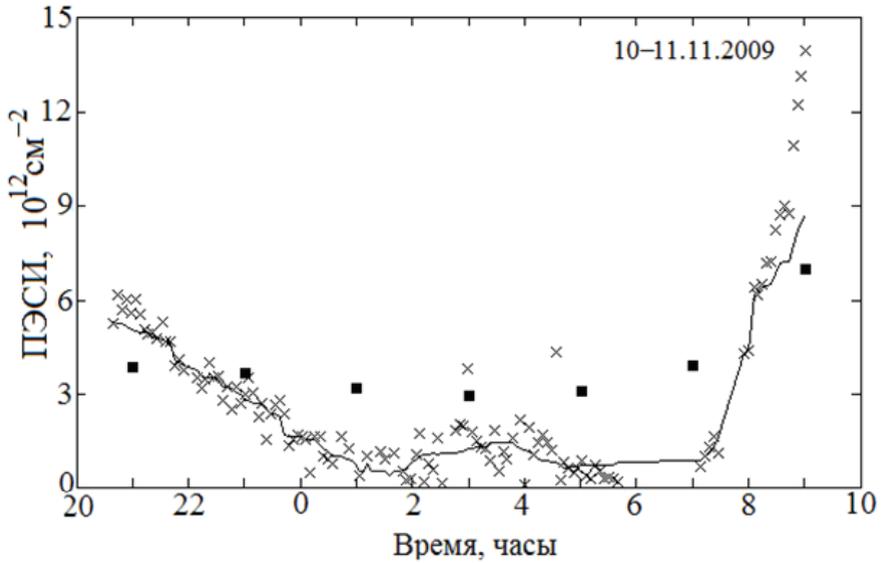


Рис.6



$\pm 1,85$ TECU . Для сравнения ошибка, обусловленная флуктуационным порогом чувствительности радиотелескопа, равна $\pm 0,25$ TECU .

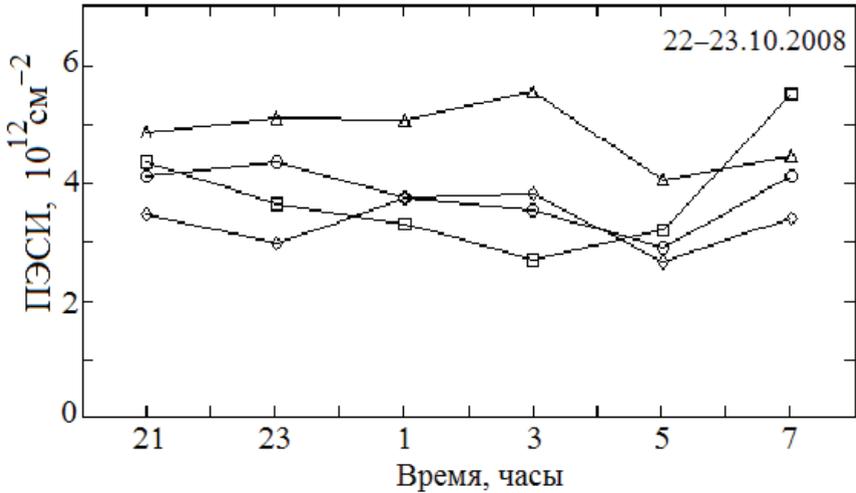


Рис.8. Значения ПЭСИ в подионосферной точке для СПМ, наблюдаемого в РАО СП, в единицах TECU по данным 4-х исследовательских центров из [18]. Квадратики – UPRG, треугольники – JPLG, ромбики – CODG и кружочки – ESAG

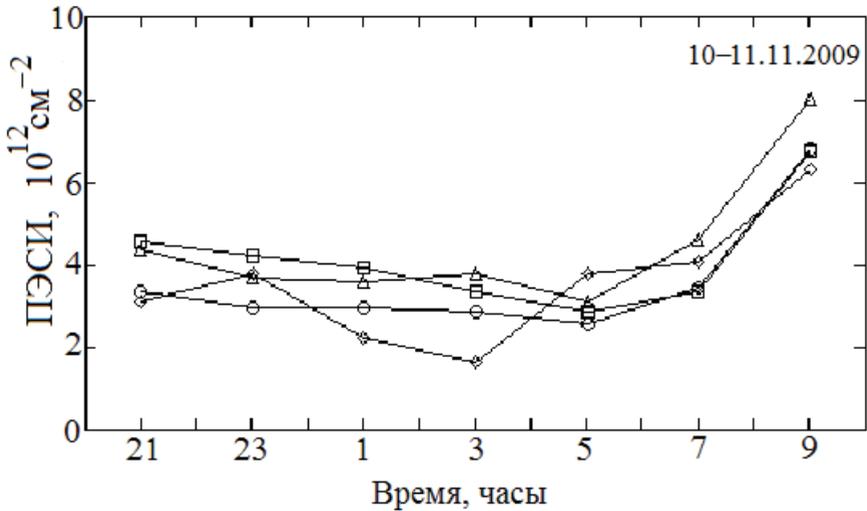


Рис.9. То же, что и на рис.8, но для другой даты

Следующая по значимости ошибка обусловлена неточностью учёта побочного поляризационного сигнала. Из рис.2, 3, 5 и 6 видно, что предположение о постоянстве ППС в течение сеанса измерений вряд ли оправдано, поскольку существуют систематические отклонения изображающей точки от окружности, вписанной методом наименьших квадратов. И, несмотря на то, что, как видно из рис.4 и 7, значения ПЭСИ настоящей работы и из [18] согласуются в пределах ошибок измерений [22], была выполнена обработка данных в предположении постоянности побочного сигнала в ходе сеанса измерений, результаты которой приведены в следующем разделе.

6. Результаты измерений полного электронного содержания ионосферы с учётом непостоянства побочного поляризованного сигнала в сеансе измерений

Предположим теперь, что параметры Стокса побочного поляризованного сигнала изменяются со временем в течение сеанса измерений. Каковы основания для предположения об изменчивости ППС?

Поскольку радиотелескоп во время измерений радиоизлучения области СПМ неподвижен, отсутствует изменение вклада частично линейно поляризованного собственного радиоизлучения земной поверхности в месте расположения радиотелескопа при изменении угла визирования антенны¹⁶. Изменением же этого вклада за 10–12 часов наблюдений области СПМ можно, по-видимому, пренебречь из-за отсутствия каких-либо резких изменений в физическом состоянии и температуре земной поверхности за время сеанса наблюдений. Вклад же частично

¹⁶ С этим, вероятнее всего, связано систематическое отклонение точек на плоскости параметров Стокса от окружности, аналогичное тому "обвинанию" окружности, которое видно на рис.2 и 5 данной работы, при наблюдениях области сильной поляризации с галактическими координатами $l=146^{\circ}47'$, $b=9^{\circ}03'$ на частоте 290 МГц. Пример Q , U – плоскости такого сеанса наблюдений, продолжительностью около трёх часов, данные которого обработаны в предположении постоянства побочного поляризованного сигнала, можно увидеть в [17] (figure 1) и в [23] (рис.1).

линейно поляризованного отраженного от земной поверхности космического радиоизлучения к концу сеанса наблюдений в осенний период времени возрастает, поскольку восходят над горизонтом более яркие области небосвода, близкие к центру Галактики.¹⁷ 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 изменения плотности потока радиоизлучения во время активных процессов. Не исключено и влияние слабых поляризованных помех от удалённых наземных радиоустройств. С другой стороны, отсутствуют какие-либо основания считать регистрируемую яркостную температуру линейно поляризованной компоненты галактического радиоизлучения непостоянной в сеансе наблюдений на частоте 290 МГц.

Вместо функции трёх параметров (11) будем теперь рассматривать функцию бóльшего числа параметров $F(a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, T'_p)$,

предположив, что $\tilde{Q}'_{\text{поб}} = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2$,
 $\tilde{U}'_{\text{поб}} = b_0 + b_1(t - t_0) + b_2(t - t_0)^2$ ($t - t_0$ – время, прошедшее с начала данного сеанса измерений),¹⁸

$$F(a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, T'_p) = \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \sqrt{\left[\left(\tilde{Q}'_{\Sigma} \right)_n - a_0 - a_1(t - t_0)_n - a_2(t - t_0)_n^2 \right]^2 + \left[\left(\tilde{U}'_{\Sigma} \right)_n - b_0 - b_1(t - t_0)_n - b_2(t - t_0)_n^2 \right]^2} - T'_p \right\}^2 \quad (21)$$

¹⁷ Эти качественные соображения было бы неплохо подтвердить расчётами, что, впрочем, является непростой задачей в силу неоднородности по азимуту местности, окружающей радиотелескоп.

¹⁸ Учёт изменения ППС в сеансе наблюдения путём аппроксимации полиномом второй степени выполнялся автором ещё в работе [24]. В [24] при наблюдениях поляризации галактического диффузного радиоизлучения на частоте 8300 МГц в избранных областях небосвода с помощью 32-метрового радиотелескопа в Медине (Италия) применялся метод сопровождения. ППС в тех наблюдениях был много больше полезного.

Решение системы уравнений, аналогичной (12), даёт искомые значения рассматриваемых параметров $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ и T'_p .

Результаты обработки всех семи сеансов наблюдений показаны на рис.10–30. На рис. 10, 13, 16, 19, 22, 25 и 28 косыми крестиками (каждый крестик соответствует, как и на рис.2, 5, n -у периоду вращения облучателя $n = 0, 1 \dots N-1$) показаны значения параметров Стокса \tilde{Q}_b , \tilde{U}_b , полученные в предположении постоянства ППС в течение сеанса измерений. Все значения параметров Стокса на этих рисунках прокалиброваны согласно (19а) в градусах Кельвина яркостной температуры. Красным цветом показаны окружности, полученные решением системы уравнений (12), то есть в предположении постоянства ППС в течение сеанса измерений. Радиус этих окружностей равен яркостной температуре поляризованной компоненты галактического радиоизлучения из области СПМ, полученной в этом предположении. Синими сплошными кривыми показаны окружности с движущимся в ходе сеанса центром, что отвечает изменению во времени ППС. Эти кривые получены из решения системы уравнений, аналогичной (12) (см. (21)). На рис. 16 и 22 пунктирной синей линией показаны траектории остаточного ППС, то есть за вычетом параметров Стокса ППС, определённого в предположении его постоянства. Траектория остаточного ППС на других пяти рисунках (рис. 10, 13, 19, 25 и 28) есть отрезок прямой линии, соединяющий зелёный и красный прямые крестики. На рис. 10, 13, 16, 19, 22, 25 и 28 зелёным прямым крестиком показано начальное значение остаточного ППС, красным прямым крестиком – его конечное значение. Остаточный ППС на всех рассматриваемых рисунках показан в той же шкале яркостных температур, что и полезный сигнал. Ко всем сеансам, кроме сеансов 10–11.09.2009 и 11–12.09.2009, применялась линейная аппроксимация изменения параметров Стокса ППС. К этим же двум сеансам (самым продолжительным) применялась аппроксимация в виде полинома второй степени от времени. На всех рисунках зелёным квадратиком показано начало сеанса, красным его окончание.

На рис.11, 14, 17, 20, 23, 26 и 29 – красными кружочками показаны отклонения $R = \sqrt{(\tilde{Q}_b)_n^2 + (\tilde{U}_b)_n^2} - T_{bp}$ значений яркостной поляриционной температуры в области СПМ, измеренных в каждом периоде, от значения радиуса T_{bp} наилучшей окружности в предположении постоянства ППС. Синими косыми крестиками на тех же рисунках показаны отклонения

$$R = \frac{A}{V_{CasA1}} \sqrt{\left(\left(\tilde{Q}'_n - a_0 - a_1(t-t_0)_n - a_2(t-t_0)_n \right)^2 + \left(\tilde{U}'_n - b_0 - b_1(t-t_0)_n - b_2(t-t_0)_n \right)^2 \right) - T_{bp}}$$

от величины T_{bp} в предположении изменения ППС согласно полиному первой или второй степени от времени $t - t_0$. Красными пунктирными прямыми, параллельными оси абсцисс, показаны уровни $\pm 3\sigma$

$$\left(\sigma = \frac{A}{V_{CasA1}} \sqrt{F(\tilde{Q}'_{поб}, \tilde{U}'_{поб}, T'_p) / N} \right), \text{ синими сплошными линиями показаны уровни } \pm 3\sigma_V$$

$$\left(\sigma_V = \frac{A}{V_{CasA1}} \sqrt{F(a_0, a_1, b_0, b_1, T'_p) / N} \quad \text{или} \quad \sigma_V = \frac{A}{V_{CasA1}} \sqrt{F(a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, T'_p) / N} \right).$$

Во всех сеансах наблюдается уменьшение разброса точек относительно окружности с перемещающимся центром по сравнению с разбросом относительно окружности с фиксированным центром (т.е. во всех случаях $\sigma_V < \sigma$).

Наконец, на рис.12, 15, 18, 21, 24, 27 и 30 косыми синими крестиками показаны значения ПЭСИ в единицах TECU, полученные в предположении переменности ППС в ходе сеанса измерений. Синими кривыми показано медианное двухчасовое сглаживание этих значений, а красными линиями показано такое же сглаживание, но уже значений ПЭСИ, полученных в предположении постоянства ППС за время сеанса измерений. Из этих рисунков видно, что разница между синей и красной кривыми доходит местами до нескольких единиц TECU. Чёрными

сплошными квадратами на рис.12, 15, 18, 21, 24, 27 и 30 показаны значения ПЭСИ из [18], средние по 4-м указанным выше исследовательским центрам. Из рассматриваемых рисунков и табл.1 видно, что во всех без исключения сеансах среднеквадратичная разница

$$\text{СКР} = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} [(N_{\text{etot}}^{\text{РАПФМ}})_n - (N_{\text{etot}}^{\text{GPS}})_n]^2}{N}}$$

меньше при учёте дрейфа ППС по сравнению с её значением, полученным в предположении постоянства ППС.

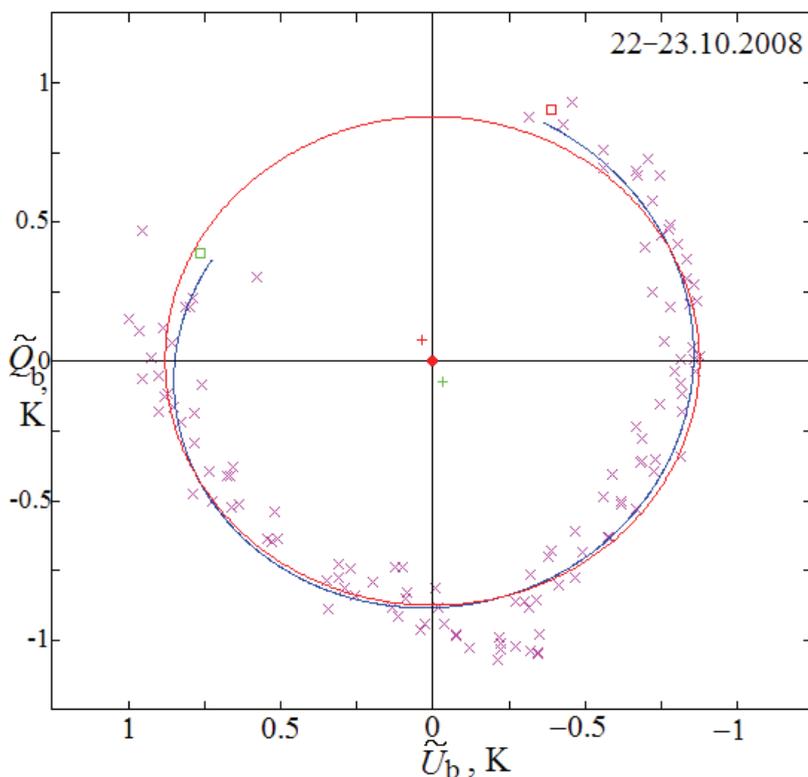


Рис.10

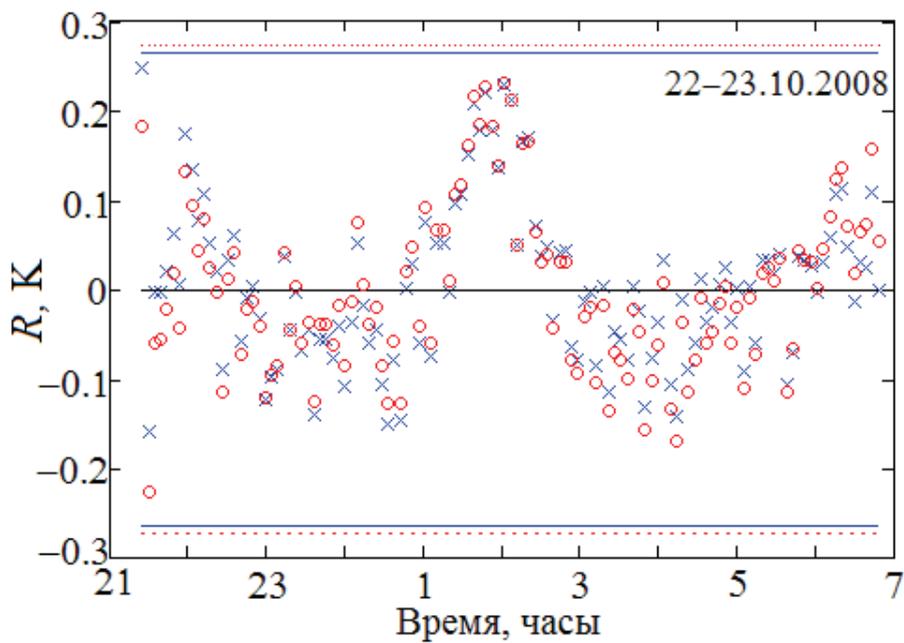


Рис.11

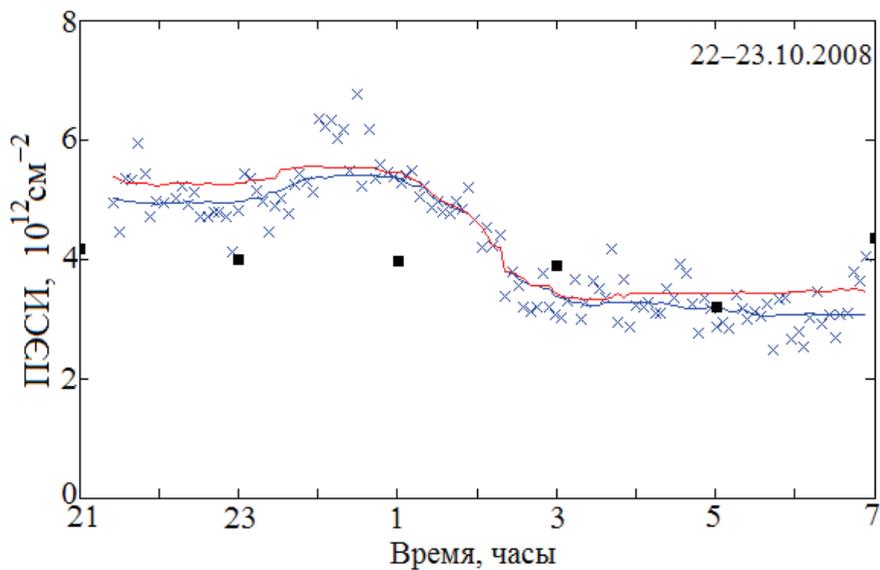


Рис.12

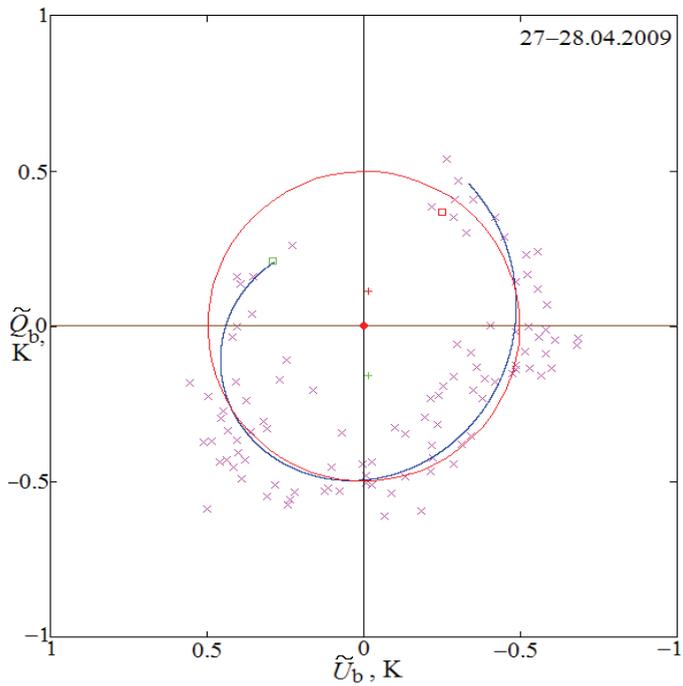


Рис.13

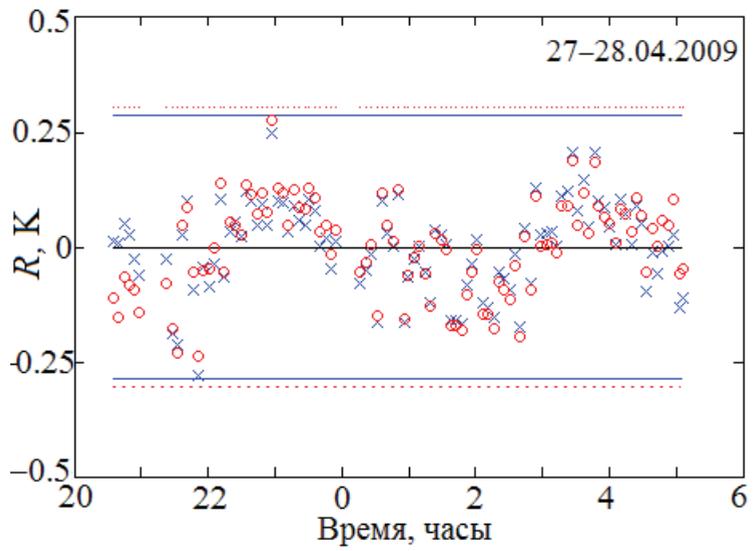


Рис.14

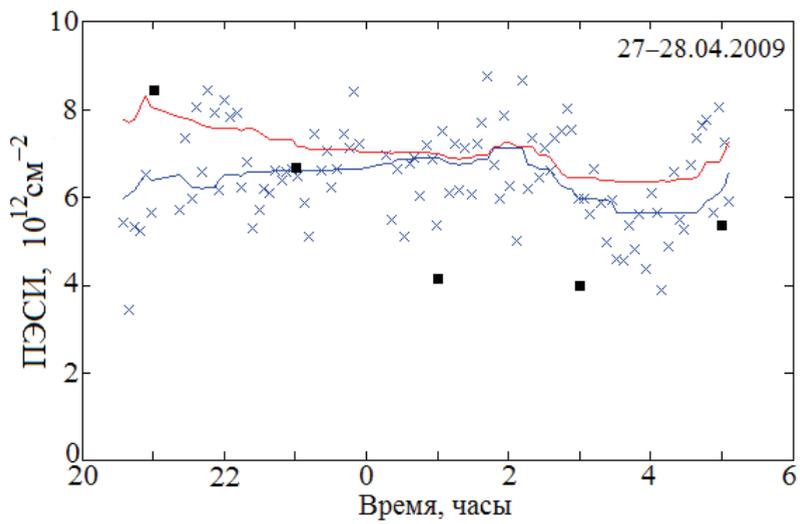


Рис.15

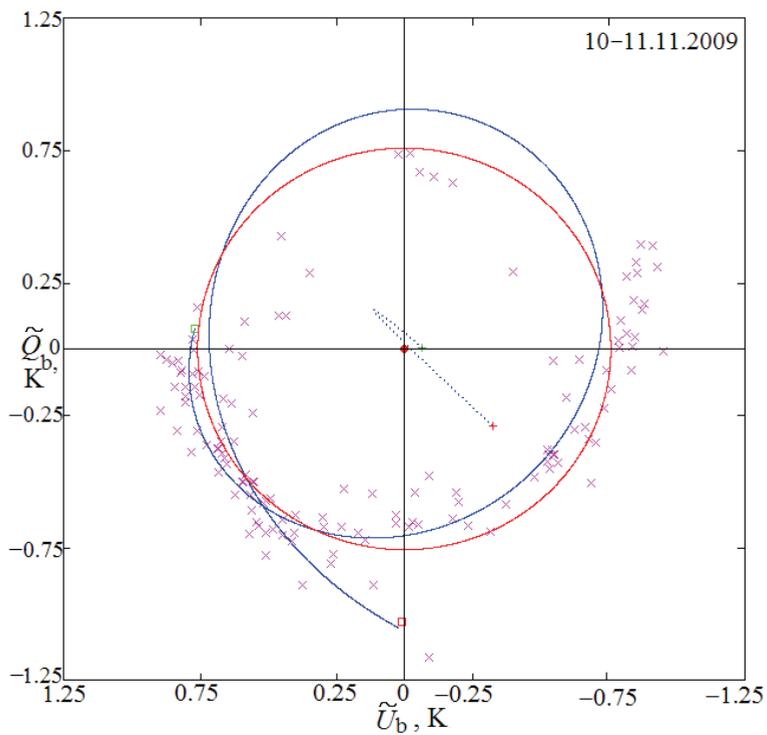


Рис.16

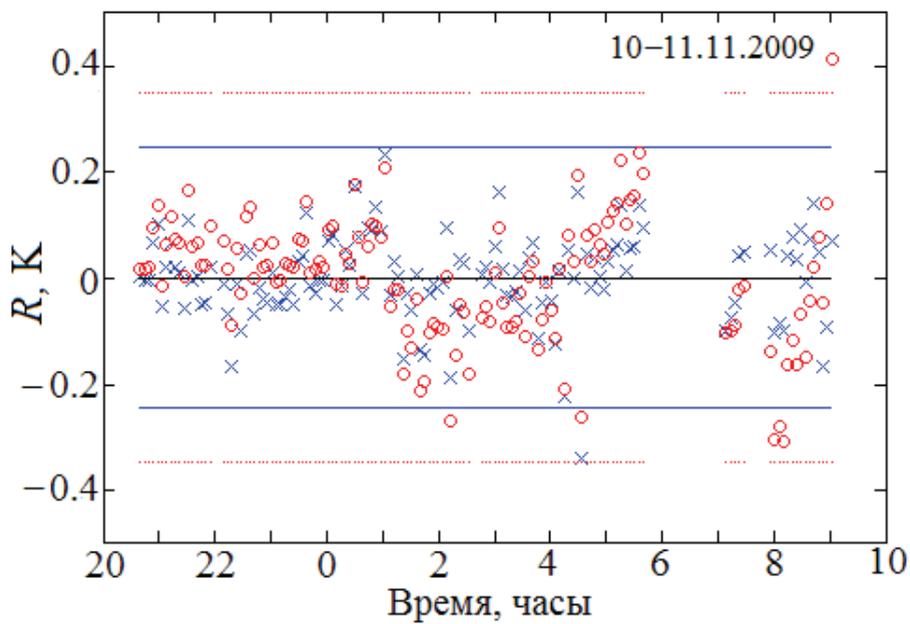


Рис.17

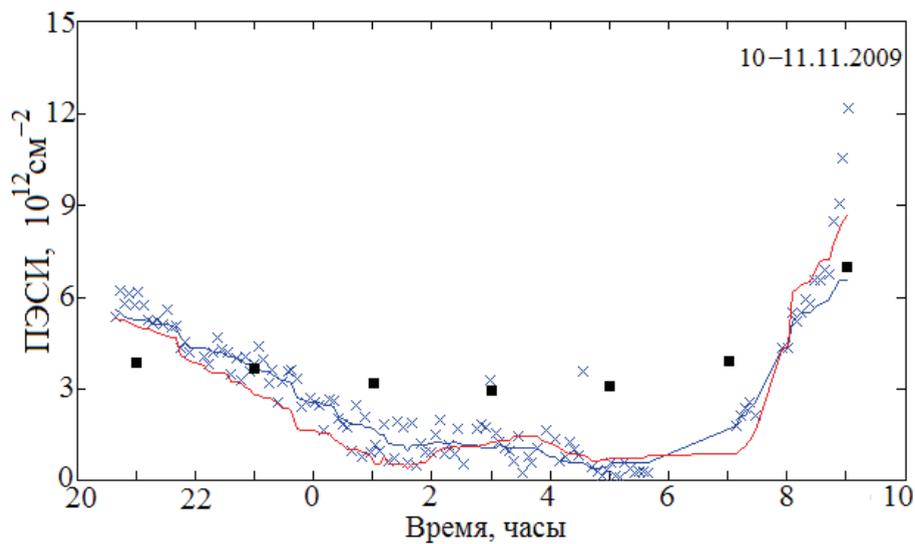


Рис.18

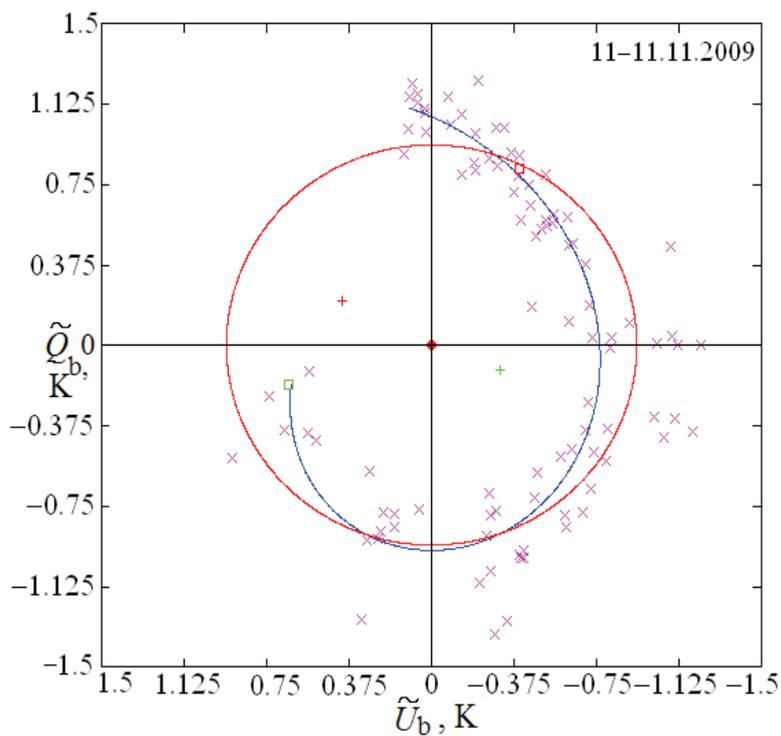


Рис.19

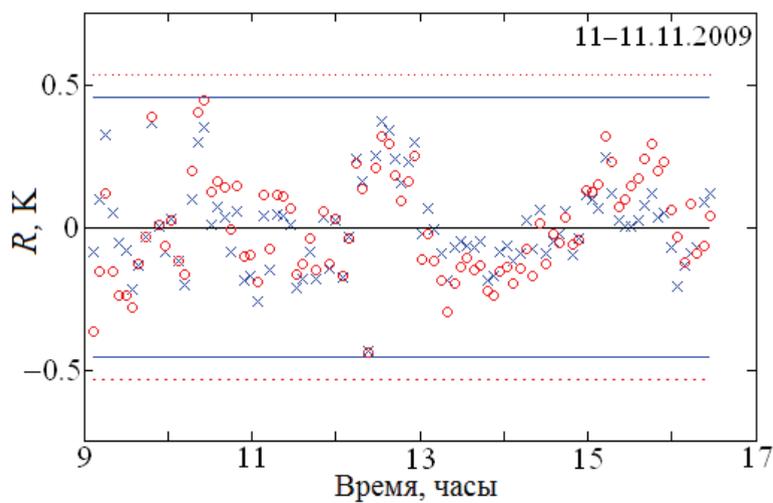


Рис.20

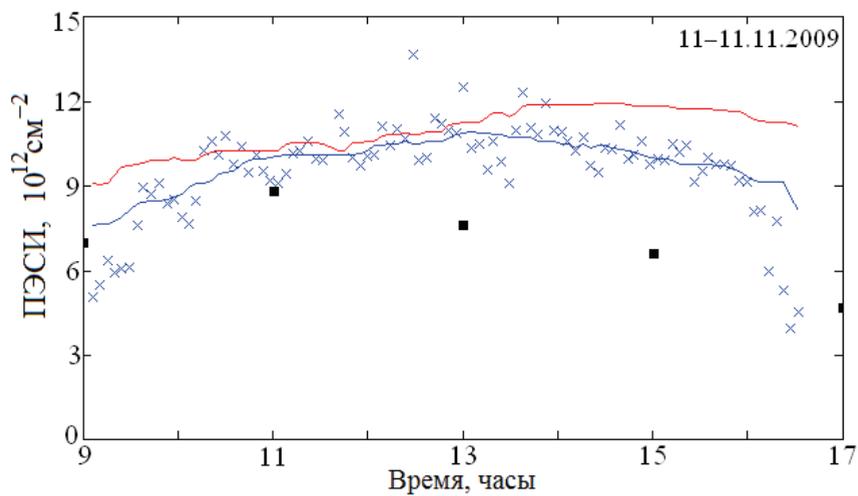


Рис.21

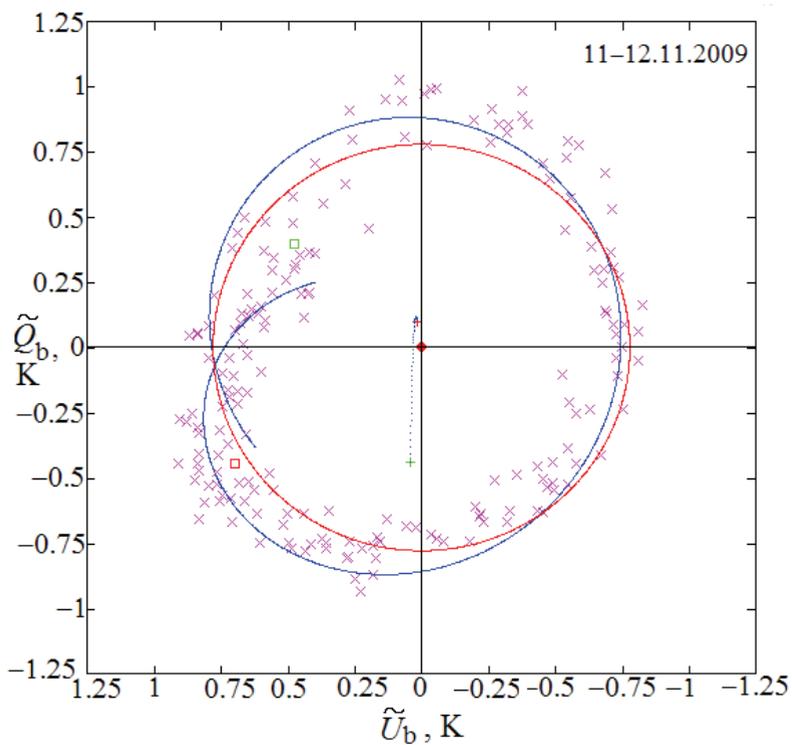


Рис.22

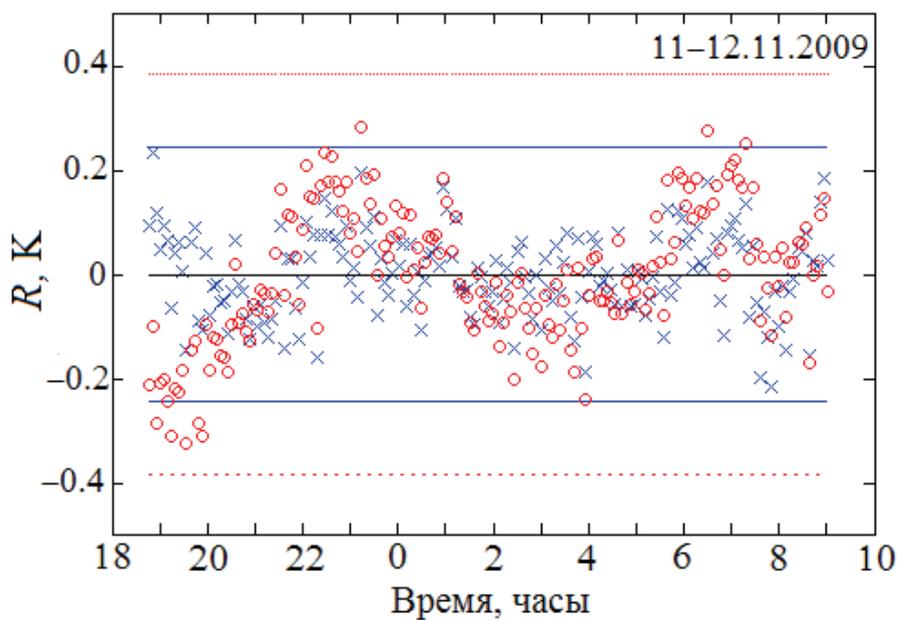


Рис.23

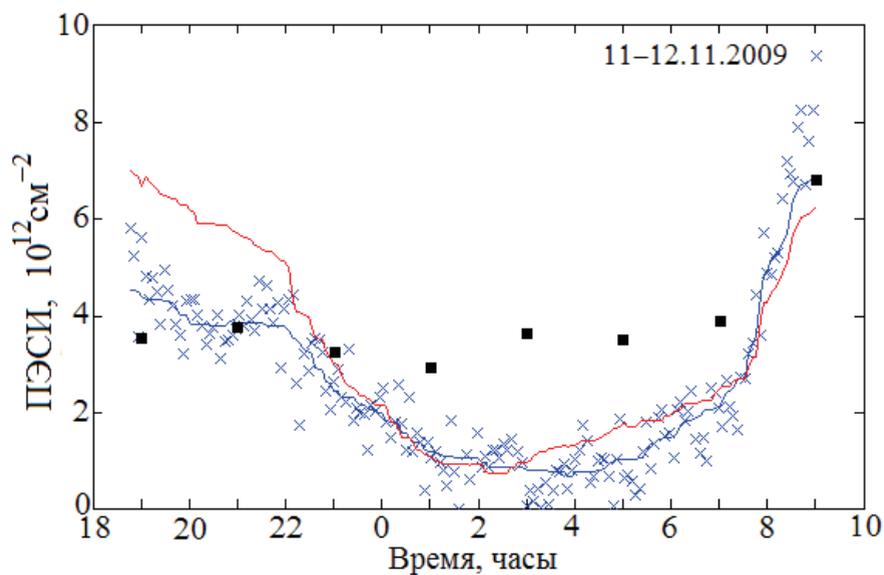


Рис.24

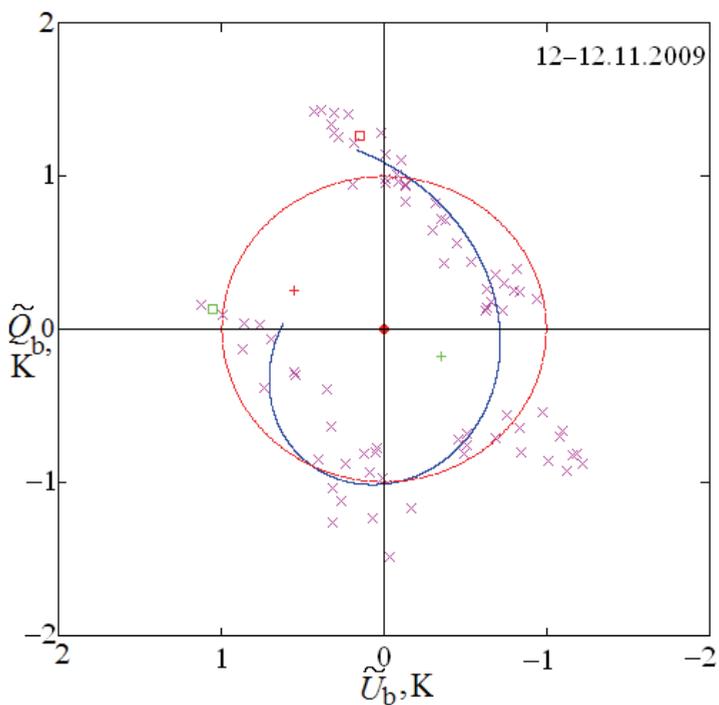


Рис.25

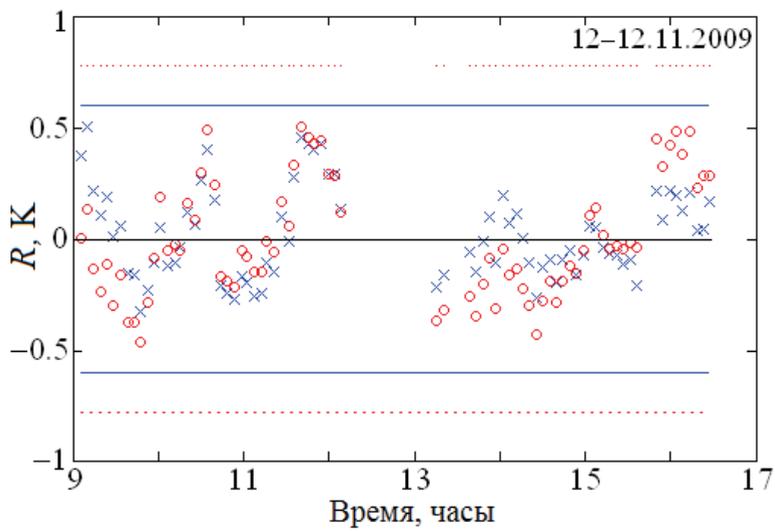


Рис.26

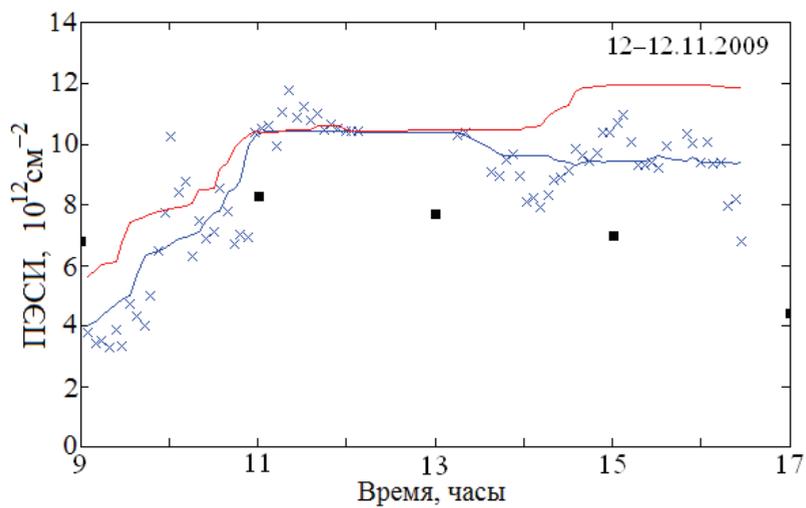


Рис.27

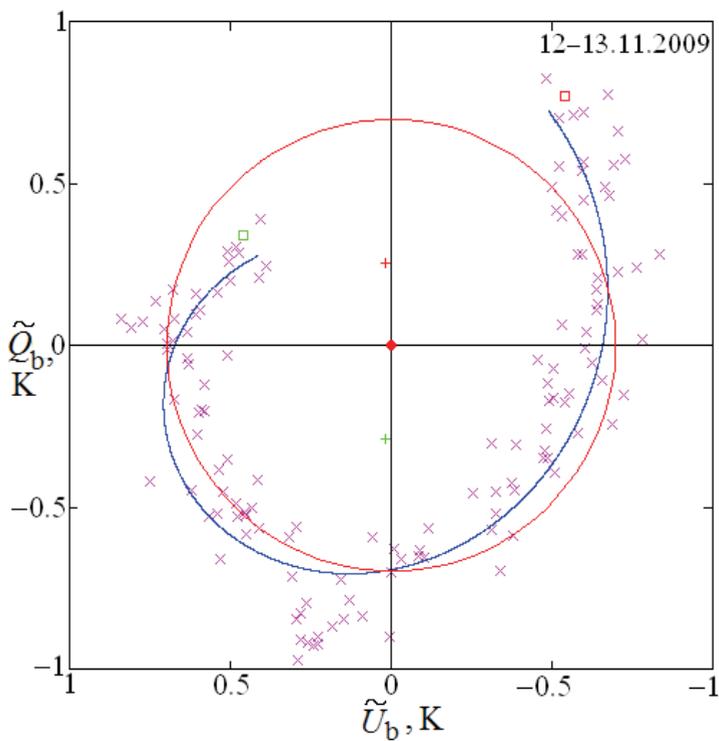


Рис.28

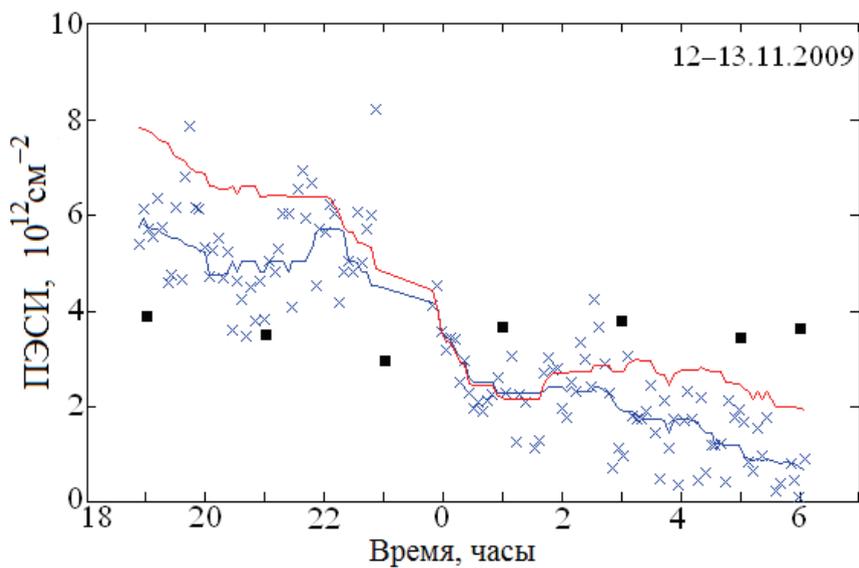
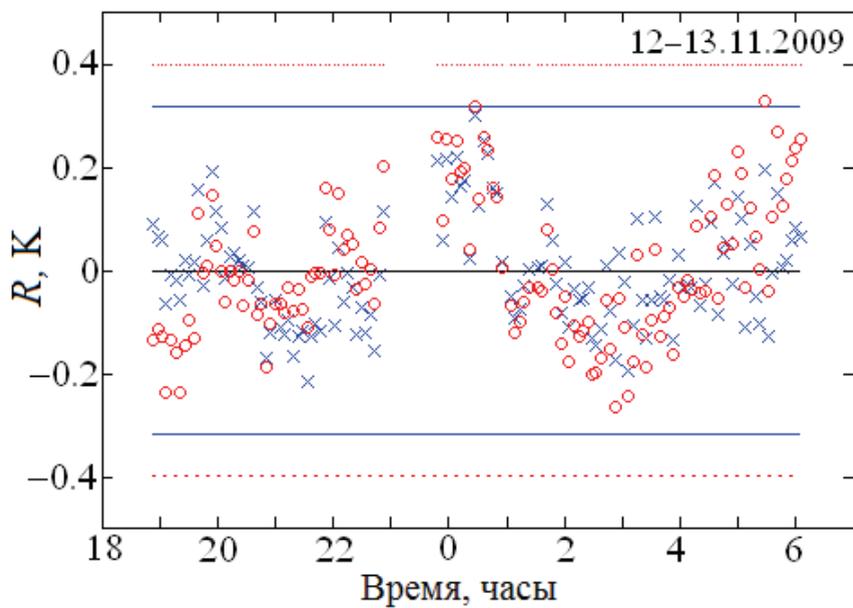


Таблица 1

Дата	$T_{br} \pm \sigma$, К при ППС= =const	$T_{br} \pm \sigma_V$, К при пере- менном ППС	Средняя за сеанс раз- ность ПЭСИ (РАПФМ) – ПЭСИ (GPS) при ППС=const, TECU	Средняя за сеанс раз- ность ПЭСИ (РАПФМ) –ПЭСИ (GPS) при ППС(t), TECU	СКР при ППС= =const, TECU	СКР при ППС(t), TECU
22-23. 10.08	0,88±0,09	0,88±0,09	0,46	0,23	1,02	0,95
27-28. 04.09	0,50±0,10	0,47±0,095	1,415	0,70	1,86	1,82
10-11. 11.09	0,76±0,115	0,84±0,08	–1,08	–1,03	2,04	1,67
11-11. 11.09	0,93±0,18	0,95±0,15	3,72	2,19	4,12	2,45
11-12. 11.09	0,78±0,13	0,78±0,08	–0,40	–1,05	1,91	1,63
12-12. 11.09	0,995±0,26	0,995±0,20	3,23	1,56	4,33	2,73
12-13. 11.09	0,70±0,13	0,69±0,105	0,54	–0,54	2,27	1,96
Сред- нее по всем сеан- сам	0,75 ± 0,05	0,81 ± 0,04	1,0	0,15	2,63	1,91

На рис.31 объединены рис.18, 21, 24, 27 и 30 с целью более наглядного показа суточного хода ПЭСИ в течение примерно двух с половиной суток с 10-го по 13-е ноября 2009 г. (на рис.31 нет красной кривой, соответствующей предположению постоянного ППС). В отличие от рис.18, 21, 24, 27 и 30 на рис.31 экспериментальные точки (косые

крестики) показаны чёрным, а не синим цветом, чтобы лучше была видна кривая синего цвета, соответствующая сглаживанию измеренных значений ПЭСИ временным двухчасовым окном.

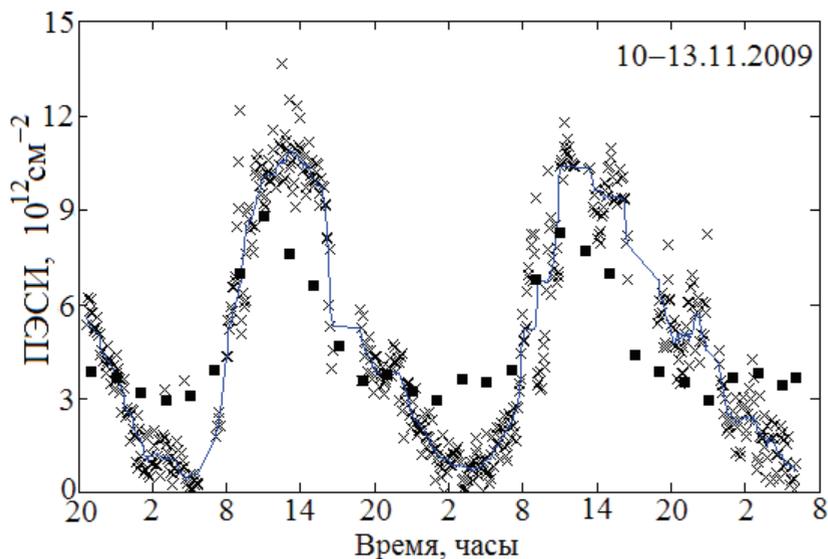


Рис.31

Из рис.31 видно, что "радиоастрономическая" кривая ПЭСИ (синего цвета) имеет более глубокие ночные минимумы и более высокие дневные максимумы, чем по данным из [18] (чёрные сплошные квадратики). Кроме того, минимумы и максимумы сдвинуты относительно таковых, получаемых по данным из [18], вправо по оси времени. По мнению автора, для фиксированной точки (в данном случае это Радиоастрономическая обсерватория ФГБНУ НИРФИ "Старая Пустынь") следует отдать предпочтение РАПФ данным по сравнению с данными из глобальных ионосферных карт [18] для той же точки, поскольку последние получены путём усреднения по большим территориям и интерполяции, и в них не разделяются временные (в масштабе менее двух часов) и пространственные вариации. Кроме того, наклонение орбит большинства спутников GPS равно 55° и для определения ПЭСИ на

географических широтах больше 55° (в том числе в РАО СП) требуется уже не интерполяция, а экстраполяция данных, полученных с большинства спутников данной системы. В этом смысле удобнее использовать спутники “ГЛОНАСС”, наклонение орбит которых равно примерно 65° .

7. Влияние учёта переменности побочного поляризованного сигнала в сеансе измерений на результаты измерений яркостной температуры поляризованной компоненты галактического радиоизлучения

Выше мы уже убедились в том, что учёт дрейфа вектора побочного поляризованного сигнала на плоскости регистрируемых параметров Стокса \tilde{Q}'_Σ , \tilde{U}'_Σ в течение сеанса измерений приводит к изменению видимых значений позиционного угла плоскости поляризации поляризованной компоненты галактического радиоизлучения. Последнее отражается на изменении значений ПЭСИ по сравнению с получаемыми в предположении постоянства ППС. В данном разделе проанализируем этот вопрос по отношению к измерению яркостной температуры поляризованной компоненты галактического радиоизлучения.

В предыдущем разделе уже отмечалось, что разброс точек относительно окружности с дрейфующим центром меньше, чем относительно окружности, во всех проведённых сеансах измерений. Проанализируем этот вопрос подробнее на примере самого длинного сеанса 11-12.11.2009. Для этого сеанса была выполнена обработка в предположении постоянного побочного поляризационного сигнала и ППС, изменяющегося согласно полиному второй степени от времени (см. рис.22 и 23 и табл.1) и согласно полиномам первой и третьей степеней. Результат для ППС, изменяющегося согласно полиному третьей степени, показан на рис.32 и 33. В табл.2 сведены результаты для всех четырёх аппроксимаций.

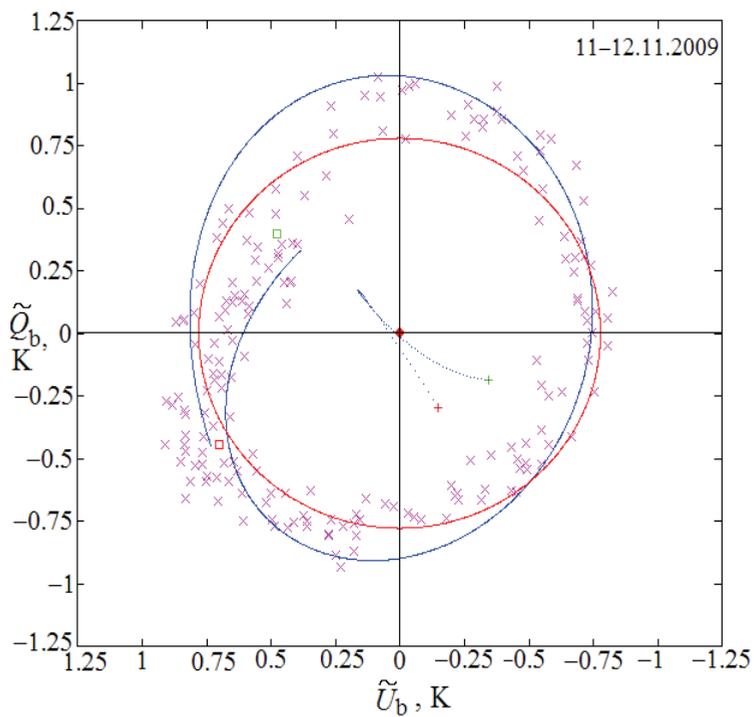


Рис.32

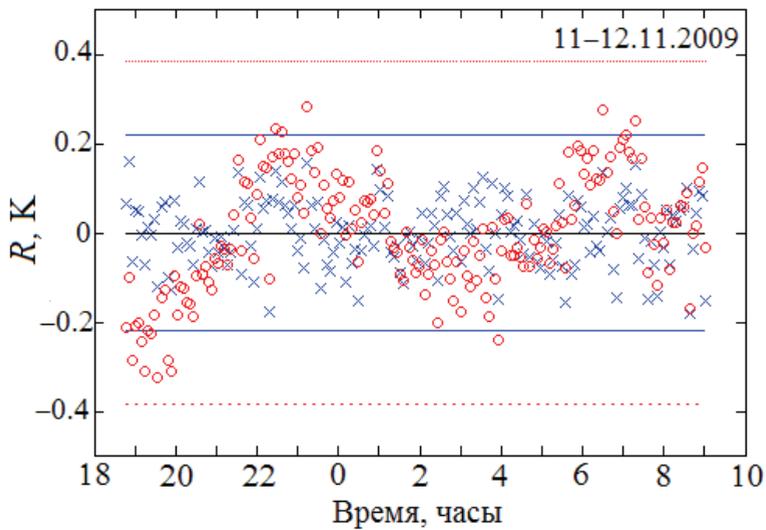


Рис.33

Таблица 2

Сте- пень поли- нома p	T_{bp}, K	$\frac{A}{V_{CasA1}} \sqrt{F(a_0, \dots, a_p, b_0, \dots, b_p, T'_p) / N}, K$	$\sqrt{F(a_0, \dots, a_p, b_0, \dots, b_p, T'_p) / N} / T'_p, \%$
0	0,779	0,128	16,43
1	0,747	0,088	11,78
2	0,776	0,082	10,57
3	0,893	0,073	8,175

Из табл.2 (а также из табл.1 и рис.11, 14, 17, 20, 23, 26, 29 и 33) видно, что учёт дрейфа ППС приводит к увеличению точности определения яркостной температуры поляризованной компоненты галактического радиоизлучения, причём точность растёт с увеличением степени полинома, аппроксимирующего изменение ППС в ходе сеанса измерений. 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

$$T_{bp290MГц}^{NCP} = 0,81 \pm 0,06 K . \quad (22)$$

В (22) кроме ошибки $\pm 0,04$, указанной в табл.1, учтена ошибка $\approx 5\%$ в определении калибровочной постоянной A . Величина (22) уточняет значение $0,9 \pm 0,2 K$, полученное в [14] без учёта переменности ППС, хотя и согласуется с ним в пределах ошибок. Как уже указывалось выше, измерения ПЭСИ в данной работе выполнены в годы минимальной активности Солнца. Согласно [25], число Вольфа $W=0$ в даты 22.10.2008, 23.10.2008, 27.04.2009, 28.04.2009 и 12.11.2009, а в даты 10.11.2009, 11.11.2009 и 13.11.2009 $W=7$.

Что же касается определения позиционного угла χ плоскости поляризации, то из предшествующего рассмотрения влияния учёта дрейфа ППС в ходе сеанса измерений на величину ПЭСИ и из (17) следует, что возможна ошибка до 20° в значении χ для некоторых периодов сеанса, если такой учёт не проведён.

8. Заключение

В 2008 и 2009 гг., характеризующихся минимальной активностью Солнца, в РАО ФГБНУ НИРФИ “Старая Пустынь” с помощью 10-метрового радиотелескопа РТМ-10 выполнены радиоастрономические поляризационные измерения галактического радиоизлучения из области Северного полюса Мира на частоте 290 МГц.

В результате измерений уточнено значение яркостной температуры поляризованной компоненты галактического радиоизлучения в направлении Северного полюса Мира на частоте 290 МГц: $T_{\text{bp}290\text{МГц}}^{\text{NCP}} = 0,81 \pm 0,06 \text{ К.}$ ¹⁹

По данным этих же измерений определены зависимости от времени суток полного электронного содержания ионосферы.

Выполнено сопоставление измеренных значений ПЭСИ со значениями, взятыми из глобальных ионосферных карт ПЭСИ, полученных с помощью сигналов GPS.

В пределах ошибок измерений результаты измерений согласуются между собой.

Расхождение результатов уменьшается при обработке поляризационных данных с учётом изменения побочного поляризованного сигнала в каждом из сеансов измерений.

Выявлено практически полное совпадение среднего по всем проведённым сеансам радиоастрономических измерений значения ПЭСИ и

¹⁹ Напоминаем, что использовано определение яркостной поляризационной температуры, принятое Международным Астрономическим союзом.

соответствующего среднего значения по данным GPS; разница составляет всего лишь 0,15 TECU.

Амплитуда суточных изменений ПЭСИ в почти трёхсуточном радиоастрономическом наблюдении в ноябре 2009 г. заметно больше, чем по данным GPS.

Время наступления ночного минимума и дневного максимума ПЭСИ в том же трёхсуточном наблюдении по радиоастрономическим данным примерно на 2 часа позднее, чем по данным GPS и близко к обычным значениям.

Дальнейшее совершенствование радиоастрономического поляриционно-фарадеевского метода измерения ПЭСИ связано, в частности, с повышением временного разрешения с целью отслеживания более быстрых изменений ПЭСИ, чем те, которые возможно регистрировать с помощью существующего радиотелескопа РТМ-10. Для этого следует применять такую аппаратуру и методику измерений параметров Стокса Q , U , когда последние регистрируются одновременно и непрерывно или попеременно, но с достаточно коротким периодом. Это возможно путём применения корреляционного метода или метода электронного вращения линейной поляризации приёмной антенны.

Существенным является уменьшение величины побочного поляризованного сигнала и доведение его до величины много меньшей величины полезного сигнала в направлении Северного полюса Мира. Это возможно при уменьшении коэффициента рассеяния антенны путём совершенствования системы облучения РТМ-10 или установки её на антенну большего диаметра.

Радикальное уменьшение побочного сигнала позволило бы определять ПЭСИ в реальном времени, а не после сеанса измерений, как сделано в данной работе. Это весьма существенно для практических применений РАПФ метода в задачах навигации.

Регулярное применение РАПФ метода путём наблюдений, заранее прокалиброванных по позиционному углу плоскости линейной поляризации областей небосвода (в частности области Северного полюса Мира), является альтернативой метода GPS в измерениях ПЭСИ и, кроме

этого, позволяет получать текущие поправки на фарадеевское вращение плоскости линейной поляризации в ионосфере для наземных радиоастрономических поляризационных наблюдений.

Благодарю А.М.Пасеку и Б.С.Формозова за подготовку РТМ-10 к наблюдениям.

Литература

1. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. *Распространение радиоволн при космической связи*. М.: Связь, 1969. – 155 с.
2. Альперт Я.Л. *Распространение электромагнитных волн и ионосфера*. М.: Наука, 1972. –564 с.
3. Дэвис К. *Радиоволны в ионосфере*. М.: Мир, 1973. – 502 с.
4. Данилкин Н.П. *Системное радиозондирование – основа построения службы контроля состояния ионосферы// Ионосферно-магнитосферная служба*: Сб. ст. Л.: Гидрометеиздат, 1987. – с.46–78.
5. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. *Физика ионосферы*. М.: Наука, 1988. – 528 с.
6. Брюнелли Б.Е, Кочкин М.И., Пресняков И.Н. и др. *Метод некогерентного рассеяния радиоволн*. Л.: Наука, 1979. – 188 с.
7. Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. *GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли*. Иркутск: Институт солнечно-земной физики, 2006. – 479 с.
8. Garriott O.K., da Rosa A.V., Ross W.J. *Electron content obtained from Faraday rotation and phase path length variations// J. Atmos. Terr. Phys.*, 1970, v.32, n.4, p.705.
9. Романов А.А., Новиков А.В., Романов А.А. *Измерение полного электронного содержания ионосферы Земли с помощью многочастотного когерентного зондирующего сигнала// Вопросы электро-механики*, 2009, т.111, с.31.
10. Эванс Ф. и др. *Изменения интегральной электронной концентрации в ионосфере, установленные по измерению фарадеевского вращения при радиолокации Луны и передачах со спутников// В кн. “Распре-*

деление электронной концентрации в ионосфере и экзосфере”. М.: Мир, 1964, с.283–300.

11. Разин В.А. *Поляризация космического радиоизлучения на волнах 1,45 и 3,3 м*// Астрон. ж., 1958, т.35, с.241.
12. Разин В.А., Теплых А.И., Косолапенко В.И., Боголюбов А.А., Добрушский Л.А., Кряжев В.А., Строков А.Ю., Формозов Б.С., Черемный В.А. *Комбинированный метод измерения пространственно-временного распределения полного электронного содержания в полярной ионосфере*// Геомагнетизм и аэрономия, 1988, т. 28, №6, с.1027.
13. Brouw W.K., Berkhuijsen E.M. *A new method of determining the electron content of the ionosphere*// Nature, 1962, v.196, p.757.
14. Виняйкин Е.Н., Кузнецова И.П., Пасека А.М., Разин В.А., Теплых А.И. *О спектре поляризованной компоненты галактического радиоизлучения в направлении Северного полюса Мира на дециметровых и метровых волнах*// Письма в Астрон. ж., 1996, т.22, с.652.
15. Разин В.А., Хрулев В.В., Федоров В.Т., Волохов С.А., Мельников А.А., Пасека А.М., Пупышева Л.В. *Наблюдения поляризации космического радиоизлучения вблизи антицентра Галактики на волнах 70, 60 и 40 см*// Изв. вузов Радиофизика, 1968, т.11, с.1461.
16. Пасека А.М., Попова Л.В., Разин В.А. *Яркое пятно линейно-поляризованного излучения Галактики на $\lambda = 1$ м*// Астрон. ж., 1976, т.53, с.286.
17. Vinyajkin E.N., Razin V.A. *Low frequency polarization observations of the Galactic radio emission*// In *Astrophysical polarized backgrounds. Workshop on Astrophysical polarized backgrounds, Bologna, Italy, 9–12 October 2001*. New York: American Institute of Physics, AIP conference proceedings, Melville, 2002, v.609, p. 26–31.
18. <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex>
19. Виняйкин Е.Н. *Эволюция спектра радиоизлучения Кассиопеи А по многолетним наблюдениям. Наблюдения на частотах 290 и 927 МГц*// Астрон. ж., 2007, т.84, с.105.
20. Виняйкин Е.Н. *Математическое описание поляризации космического радиоизлучения. I. Декартовый поляризационный базис*// Пре-

принт №534. Нижний Новгород: ФГНУ НИРФИ, 2010. – 67 с.
<http://nirfi.ru>

21. Гоноровский И.С. *Радиотехнические цепи и сигналы. Часть I. Сигналы, линейные системы с постоянными и переменными параметрами*. М.: Советское радио, 1966. – 438 с.
22. Виняйкин Е.Н. *Результаты научной деятельности ФГНУ НИРФИ за 2009-2010 годы*// Препринт №537. Нижний Новгород: ФГНУ НИРФИ, 2011, с.73–74.
23. Виняйкин Е.Н., Пасека А.М., Теплых А.И. *Спектры яркостной температуры линейно поляризованной компоненты фонового радиоизлучения Галактики*// Изв. вузов Радиофизика, 2002, т.45, вып.2, с.113–120.
24. Vinyajkin E.N., Carretti E., Cortiglioni S., Poppi S. *Observations of linear polarization of background Galactic radio emission in selected directions at 8.3 GHz*// In “Astrophysical polarized backgrounds”. Workshop on Astrophysical polarized backgrounds, Bologna, Italy, 9–12 October 2001. New York: American Institute of Physics, AIP conference proceedings, Melville, 2002, v.609, p.287–290.
25. Van der Linden R. A. M. and the SIDC team, *online catalogue of the sunspot index*// <http://sidc.oma.be/html/sunspot.html>

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1. Введение	3
2. Методы измерений полного электронного содержания ионосферы	3
3. Радиоастрономические измерения полного электронного содержания ионосферы в зависимости от времени суток в период минимальной активности Солнца.....	9
4. Редукция данных измерений полного электронного содержания ионосферы	11
5. Результаты измерений полного электронного содержания ионосферы в предположении постоянства побочного поляризованного сигнала в сеансе измерений	20
6. Результаты измерений полного электронного содержания ионосферы с учётом непостоянства побочного поляризованного сигнала в сеансе измерений	27
7. Влияние учёта переменности побочного поляризованного сигнала в сеансе измерений на результаты измерений яркостной температуры поляризованной компоненты галактического радиоизлучения	44
8. Заключение.....	47
Литература	49

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ
ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ
РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ
И С ПОМОЩЬЮ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВ GPS

Виняйкин Евгений Николаевич

Оригинал-макет подготовлен
в Отделе методов обработки научной информации ФГБНУ НИРФИ

Подписано в печать 01.11.11. Формат 60x84/16
Бумага писчая. Объем 2 усл.п.л.
Тираж 50. Заказ 5608

Отпечатано в ФГБНУ НИРФИ.
603950 Н.Новгород, ул. Б.Печерская, 25/12а