

**Исследование параметров
среднеширотных неоднородностей
в F-области ионосферы
методами
радиопросвечивания и радиолокации**

¹ Полярный геофизический институт, г. Мурманск (Россия)

² Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва (Россия)

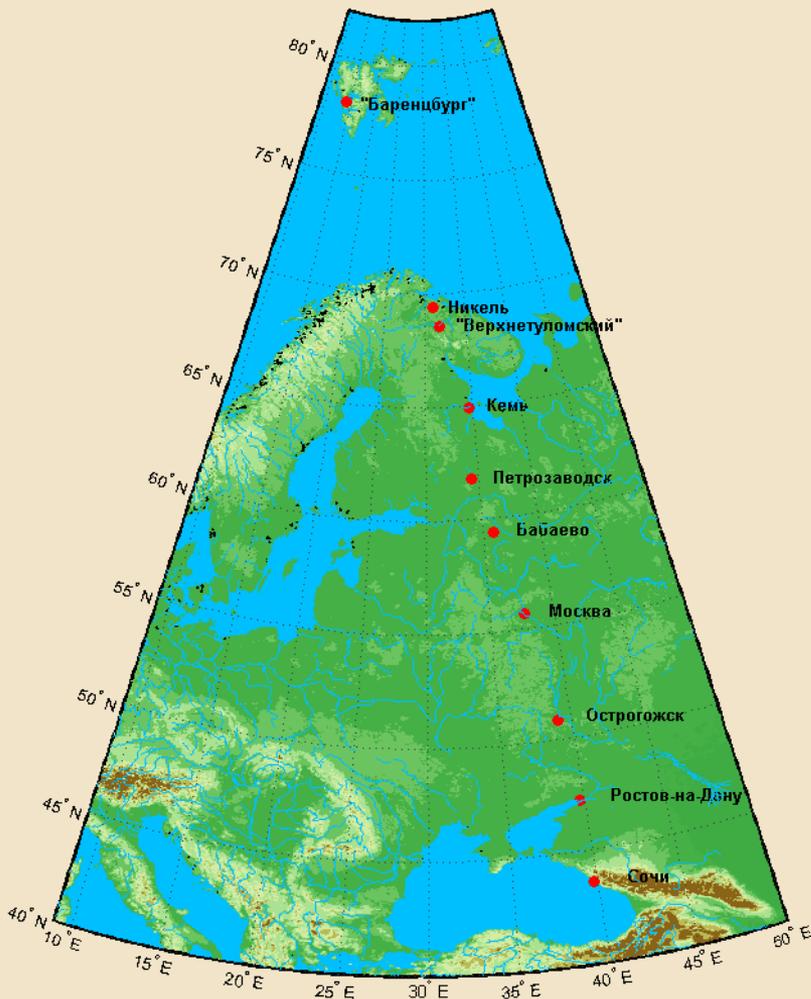
³ НИИ физики южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону (Россия)

XX международная конференция

«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»

г. Москва - 2022

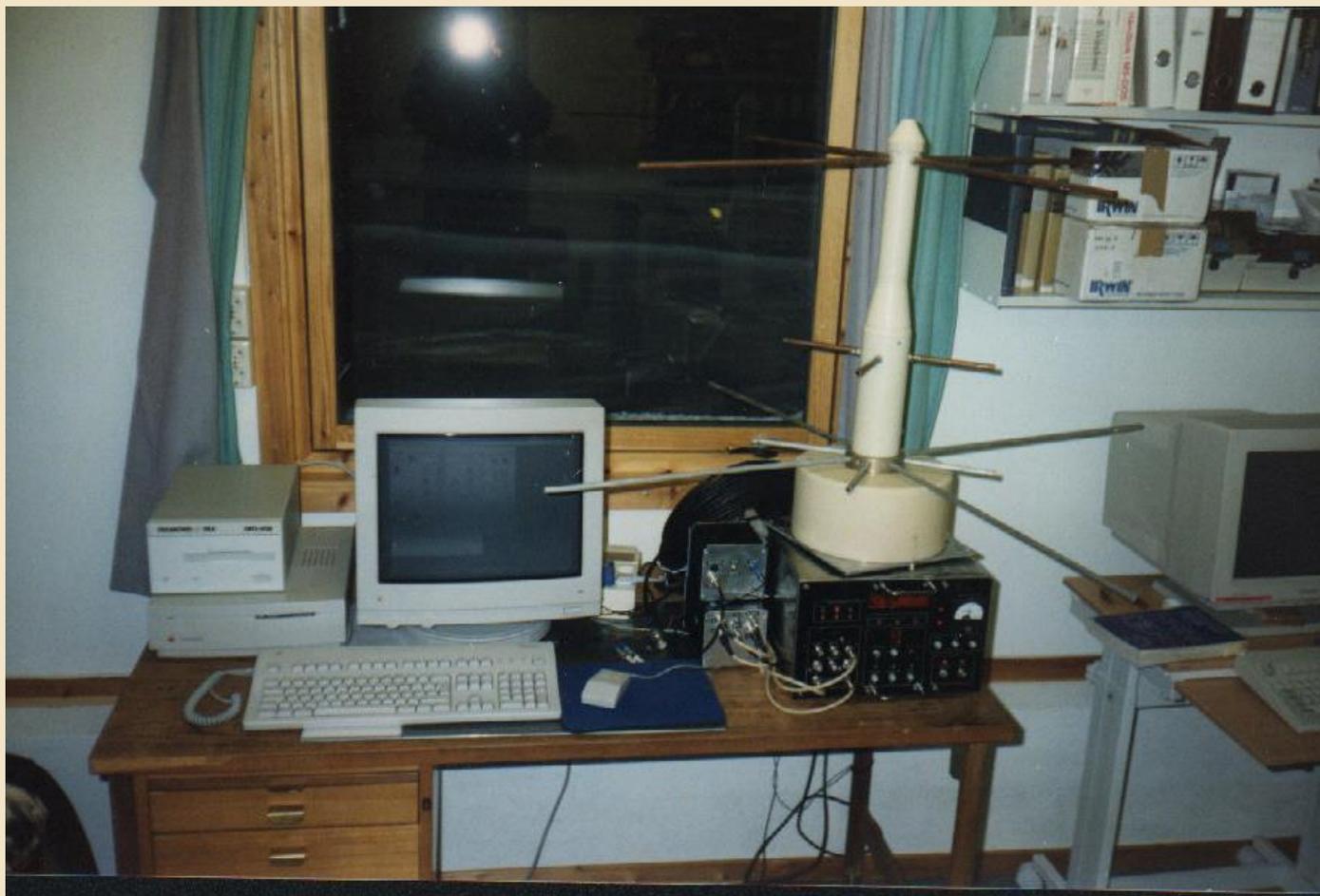
Радиотомографическая установка* ПГИ: г. Москва – центр томографической цепочки с октября 2008 г. по март 2012 г.



Станция	С. Ш.	В. Д.
п. Баренцбург (арх. Шпицберген)	78.10°	14.21°
г. Никель	69.40°	31.01°
п. Верхнетуломский	68.59°	31.76°
г. Кемь	64.95°	34.57°
г. Петрозаводск	61.78°	34.37°
г. Бабаево	59.37°	35.93°
г. Москва	55.67°	37.63°
г. Острогожск	50.87°	39.06°
г. Ростов-на-Дону	47.21°	39.70°
г. Сочи	43.58°	39.77°

* Терещенко Е.Д., Юрик Р.Ю., Григорьев В.Ф., Романова Н.Ю. Радиотомографическая установка Полярного геофизического института КНЦ РАН (РТУ ПГИ КНЦ РАН) // Сб. трудов конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», 19–23 сентября 2016, г. Мурманск, Россия. С. 129–132. 2016.

**Первопроходцы: стабильность и мобильность !
Томографический приёмник, антенна и компьютер -
всё необходимое для автономной работы умещается на одном столе.**



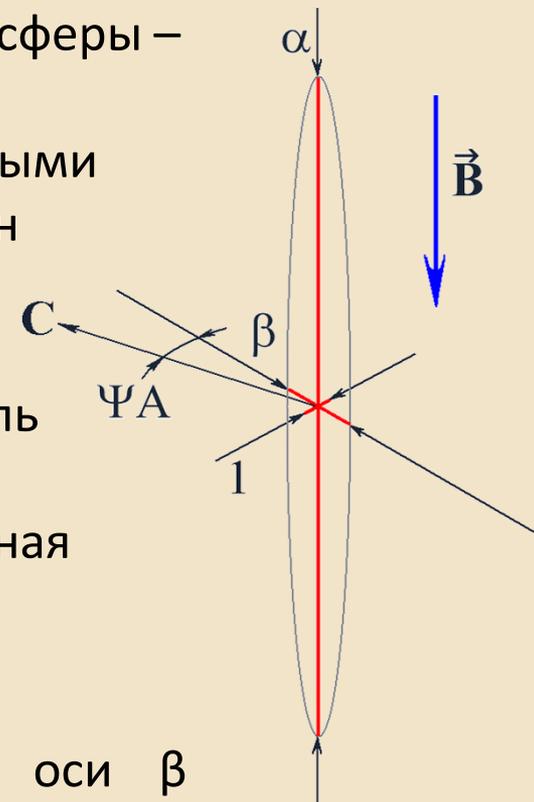
** Терещенко Е.Д., Юрик Р.Ю., Григорьев В.Ф., Романова Н.Ю. Радиотомографическая установка Полярного геофизического института КНЦ РАН (РТУ ПГИ КНЦ РАН) // Сб. трудов конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», 19–23 сентября 2016, г. Мурманск, Россия. С. 129–132. 2016.*

Мелкомасштабные неоднородности F-области ионосферы – неоднородности электронной плотности с поперечными геомагнитному полю размерами от нескольких сотен метров до нескольких километров.

Неоднородности анизотропны: более вытянуты вдоль геомагнитного поля (α – продольная анизотропия) и менее вытянуты перпендикулярно ему (β – поперечная анизотропия), причём $\alpha > \beta > 1$

В разных геофизических условиях ориентация оси β различна. Поэтому она получила термин и буквенное обозначение:

Ψ_A – ориентация поперечной анизотропии

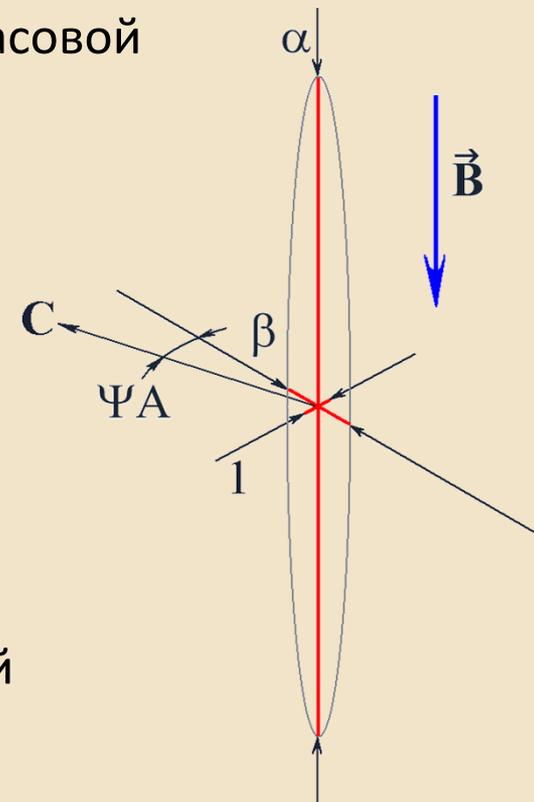


Ψ_A – угол, измеряется в градусах и отсчитывается от направления на географический север по часовой стрелке.

Ориентацию поперечной анизотропии Ψ_A можно определить с точностью в несколько градусов.

Она соответствует:

- направлению дрейфа плазмы в F-области высокоширотной ионосферы*;
- направлению горизонтального ветра в F-области среднеширотной ионосферы (по данным станций Острогжск – Ростов-на-Дону – Сочи)**;



*Козлова М.О. Исследование неоднородностей километрового масштаба в F-области высокоширотной ионосферы по данным о мерцаниях спутниковых радиосигналов: Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Мурманск: изд-во ПГИ КНЦ РАН. 2002. 30 с.

**Романова Н.Ю. Взаимосвязь между направлением горизонтального ветра и ориентацией поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в F-области среднеширотной ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 57. № 4. С. 463–471. 2017. DOI: 10.7868/S0016794017040150

- Разработанным в ПГИ методом радиопросвечивания* численно определить значения ориентации поперечной анизотропии Ψ_A мелкомасштабных неоднородностей в F-области ионосферы над Москвой в период октябрь 2008 – март 2012 гг.
- Разработанной в НИИ физики ЮФУ программой LocalDrift** численно определить направление дрейфа среднемасштабных неоднородностей (от 5-10 км до 50-100 км, в зависимости от высоты отражения и частоты зондирования) в тех же областях ионосферы и в то же время суток.
- Сопоставить значения, полученные обоими методами, с целью исследования предполагаемой связи дрейфа и поперечной вытянутости мелкомасштабных неоднородностей.

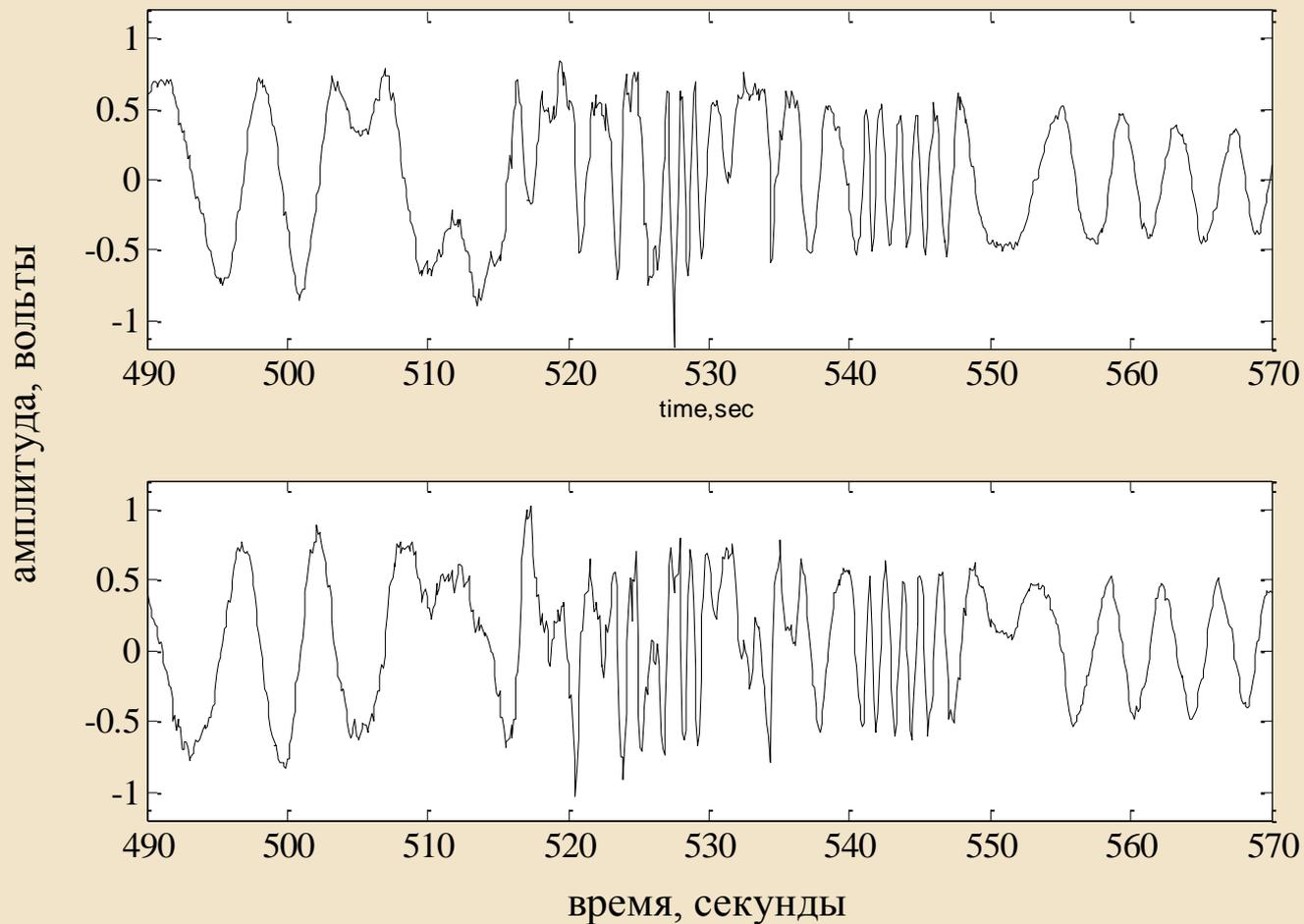
* Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы // М.: Физматлит, 336 с. 2007.

Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D. Ionospheric Tomography // Springer, 260 p. 2003.

** Zhabankov G.A., Telegin V.A., Panchenko V.A., Maltseva O.A. Updating DPS-4 ionosonde by ionospheric drift measurements: the LocalDrift software package // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves RSEMW (RSEMW-2021). (Divnomorskoe, 2021). doi: 10.1109/RSEMW52378.2021.9494072

на примере спутникового сеанса 09/02/2012 г. с началом в 23:09 UT

09/02/2012 начало записи в 23:09 UT



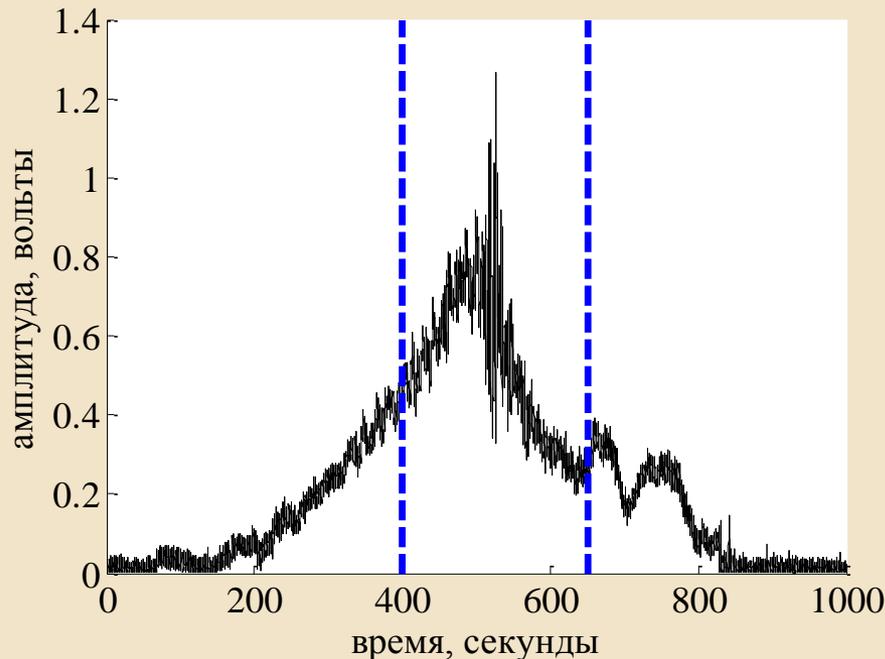
Участок записи квадратур первичного радиосигнала на частоте ~ 150 МГц, содержащий флуктуации амплитуды с ~ 500 с по ~ 550 с.

на примере спутникового сеанса 09/02/2012 г. с началом в 23:09 UT

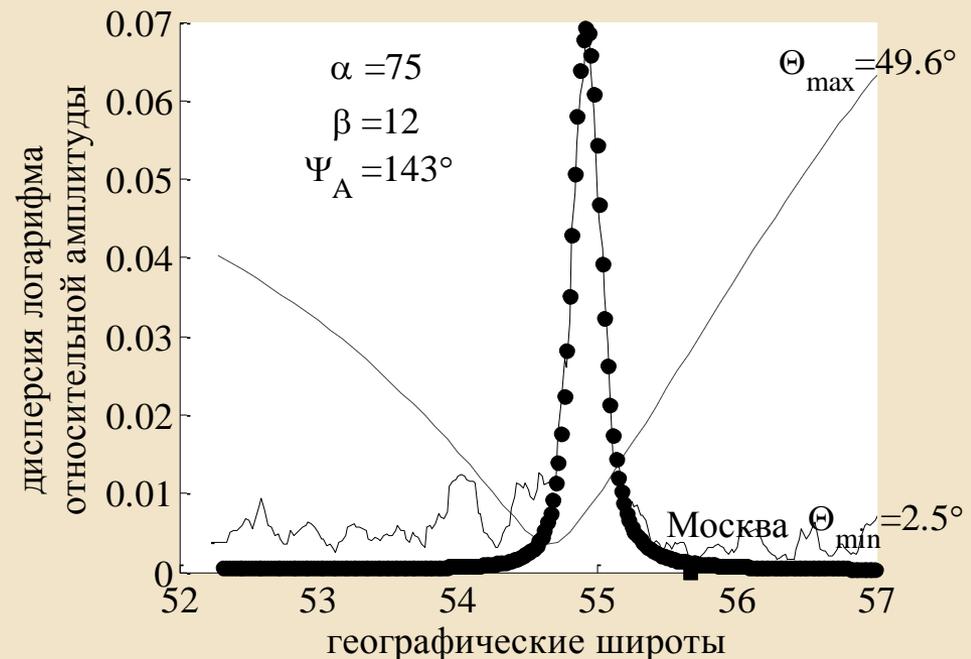
В графике амплитуды радиосигнала (рис. слева) выделяется интервал, содержащий флуктуации, для его дальнейшего исследования. Рассчитывается спутниковая траектория и выделенный интервал проецируется на высоту F-слоя. В интервале вычисляется (рис. справа) дисперсия логарифма относительной амплитуды (чёрная кривая), максимум которой аппроксимируется теоретической кривой (черные кружки) – моделью мелкомасштабных неоднородностей.

Результатом аппроксимации является численное определение величин α , β и Ψ_A . Пунктиром показан график значений углов между перемещающимся спутником и магнитным полем в точке наблюдения. При $Q_{min} > 2^\circ$ точность определения величины Ψ_A составляет несколько градусов. В данном примере $\Psi_A = 143^\circ$ означает, что неоднородности внутри области, ограниченной максимумом, вытянуты в юго-восточном направлении.

09.02.2012 23:09 UT



09.02.2012 23:09 UT

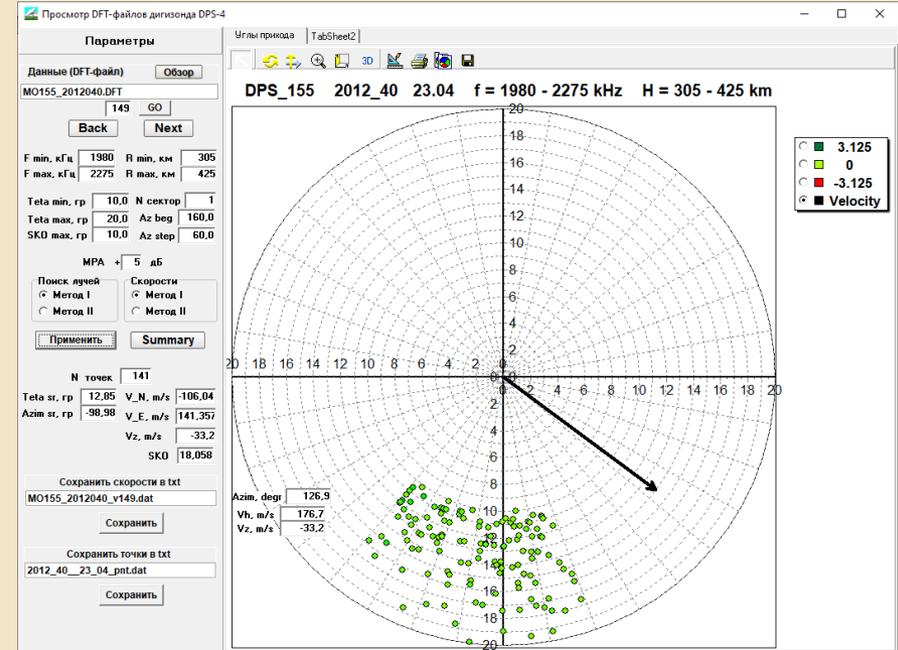
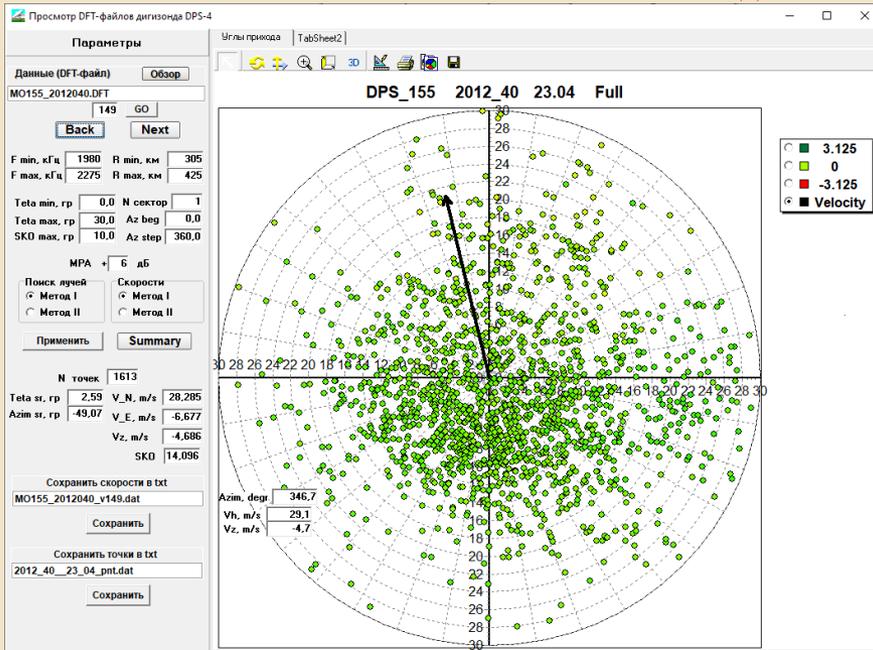


МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ДРЕЙФА ИОНОЗОНДОМ DPS-4 И ПРОГРАММАМИ DriftExplorer и LocalDrift на примере 09/02/2012 г. в 23:08 UT

«Карты неба» ионозонда DPS-4. Точки – ионосферные отражатели (среднемасштабные неоднородности), вектор – результирующее направление дрейфа, вычисленное по перемещающимся ионосферным отражателям.

Программа DriftExplorer (рис. слева), поставляемая вместе с DPS-4, рассчитывает направление дрейфа, усредненное по всем отражателям карты неба: $\Psi_D = 347^\circ$

Программа LocalDrift* (рис. справа), разработанная Г.А. Жбанковым, рассчитывает направление дрейфа только в выделяемой области ионосферы, которая охватывает область наблюдения мелкомасштабных неоднородностей: $\Psi_D = 127^\circ$

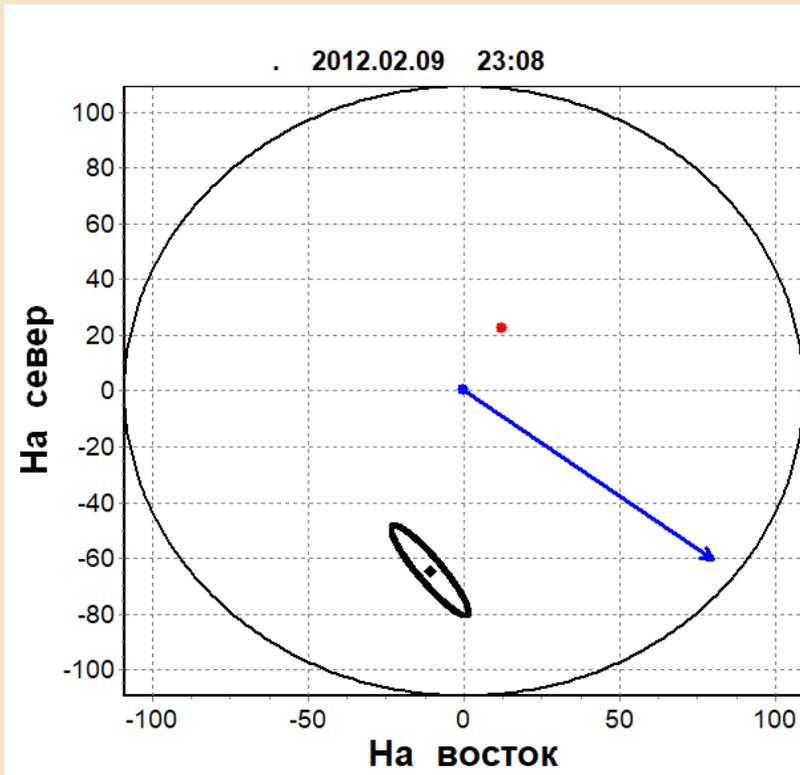


СОПОСТАВЛЕНИЕ
ОРИЕНТАЦИИ ПОПЕРЕЧНОЙ АНИЗОТРОПИИ Ψ_A
С НАПРАВЛЕНИЕМ ДРЕЙФА Ψ_D :
анализ этих величин на примере 09/02/2012 в 23:08 UT

Вектор – направление дрейфа $\Psi_D = 127^\circ$, рассчитанное программой LocalDrift.

Эллипс – схематичное изображение ориентации поперечной анизотропии $\Psi_A = 143^\circ$ мелкомасштабных неоднородностей в области, ограниченной максимумом.

Точка в центре эллипса – положение вершины максимума.



Различие $\Psi_A - \Psi_D$ составляет $\Delta\Psi = 16^\circ$. Эта величина, интерпретируемая как малая, свидетельствует, что мелкомасштабные неоднородности вытянуты вдоль направления дрейфа среднесмасштабных неоднородностей.

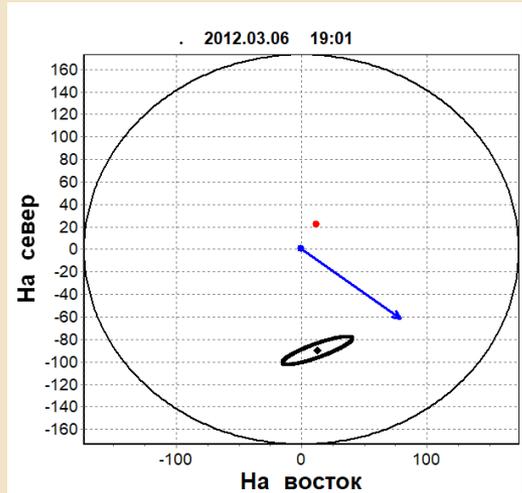
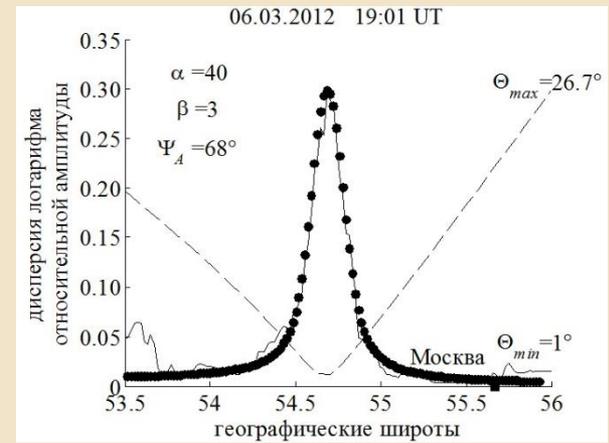
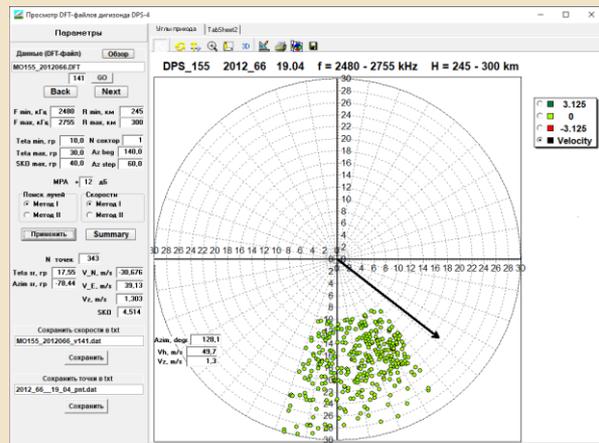
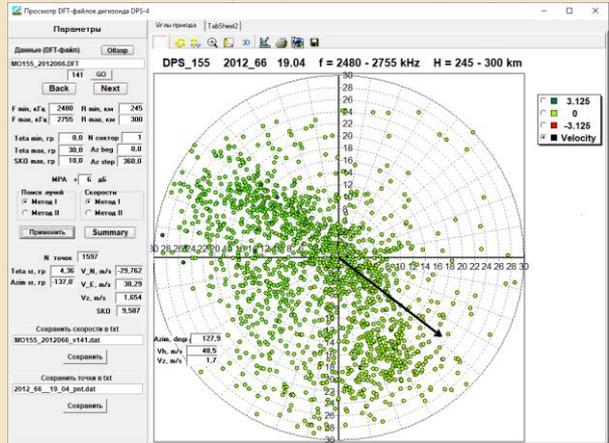
Величина $\Psi_D = 347^\circ$, рассчитанная программой DriftExplorer, приводит к большему различию $\Psi_A - \Psi_D$: $\Delta\Psi = -24^\circ$.

$\Psi_A = 143^\circ \equiv 323^\circ$, поскольку поперечная анизотропия – ось.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ПОПЕРЕЧНОЙ АНИЗОТРОПИИ Ψ_A С НАПРАВЛЕНИЕМ ДРЕЙФА Ψ_D :

анализ различия этих величин на примере 06/03/2012 в 19:01 UT

DriftExplorer и LocalDrift: направление дрейфа $\Psi_D = 128^\circ$
Ориентация поперечной анизотропии $\Psi_A = 68^\circ$



Большое различие между Ψ_A и Ψ_D , составляющее $\Delta\Psi = -60^\circ$, объясняется тем, что это т.н. «зенитный пролёт» спутника: минимальный угол зрения «спутник-приёмник» с магнитным полем $Q_{min} = 1^\circ$.

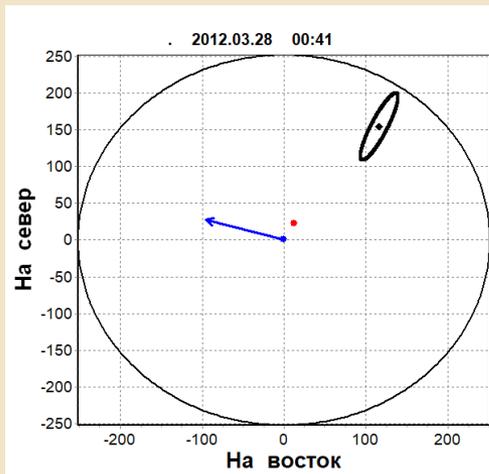
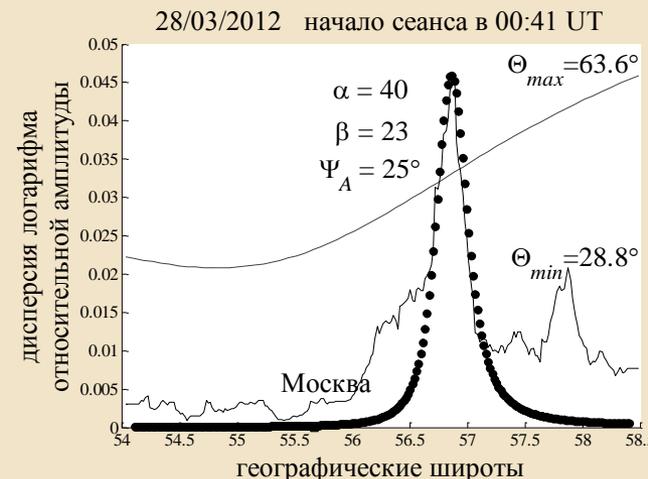
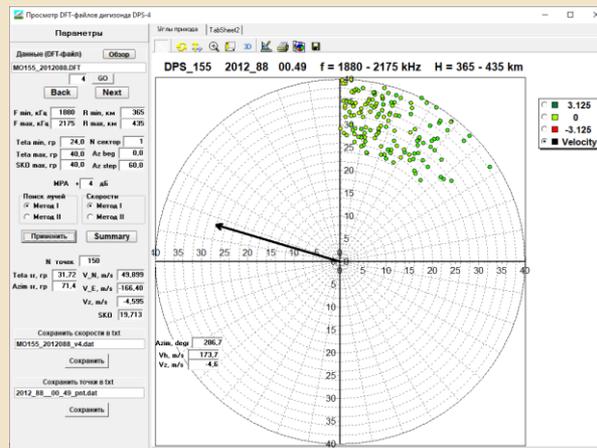
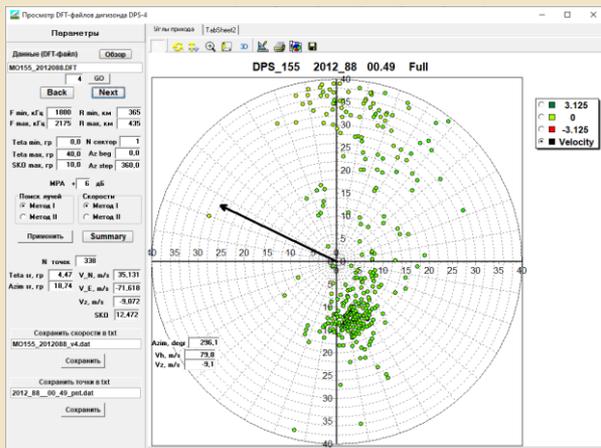
При $Q_{min} = 1^\circ$ доверительный интервал определения величины Ψ_A составил $\pm 35^\circ$, в то время как при $Q_{min} > 2^\circ$ (как в предыдущем примере 09.02.2012 в 23:09 UT) он не превышает нескольких градусов.

Направление дрейфа:

$\Psi_D = 296^\circ$ (DriftExplorer) и $\Psi_D = 287^\circ$ (LocalDrift)

Ориентация поперечной

анизотропии: $\Psi_A = 25^\circ \equiv 205^\circ$



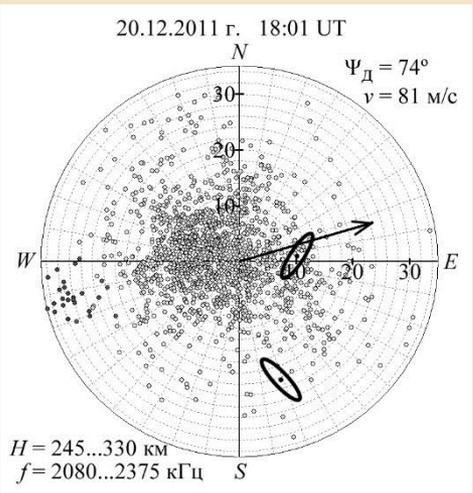
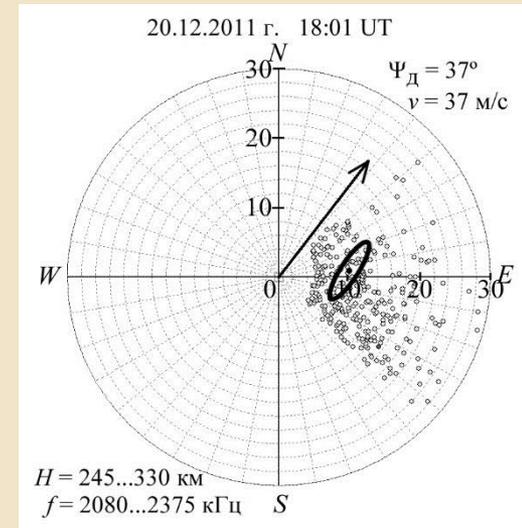
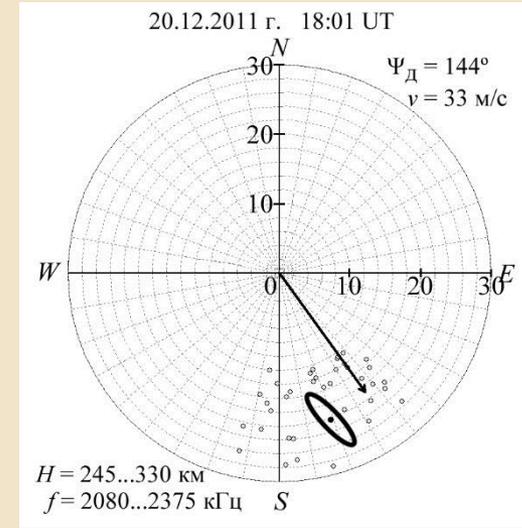
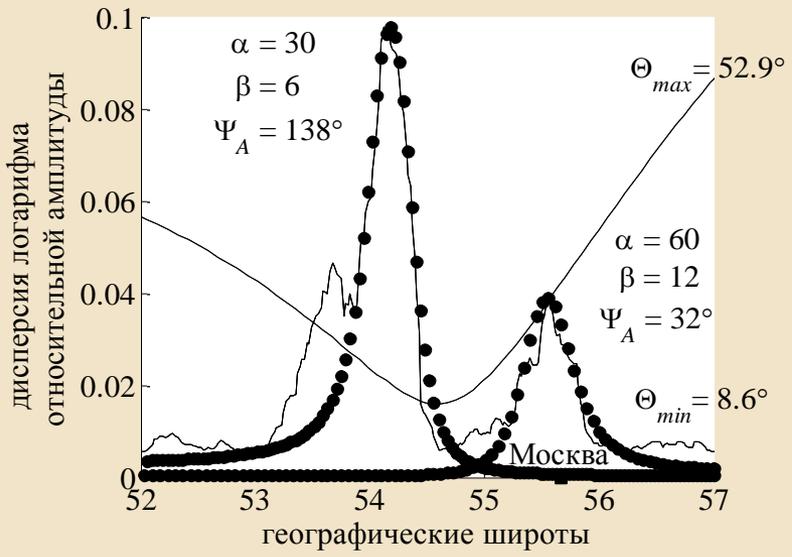
Большое различие $\Psi_A - \Psi_D$, равное $\Delta\Psi = -80^\circ$, объясняется тем, что максимум флуктуаций находится далеко от наблюдателя. Наблюдения при $Q_{min} > 18-20^\circ$ означают, что траектория ИСЗ находится далеко от приемника, из-за чего луч зрения «приемник-спутник» проходит большой путь в ионосфере, нарушая условие постоянства дисперсии флуктуации электронной плотности вдоль луча зрения, заложенное при выводе соотношений, связывающих ее и параметры α , β и Ψ_A .

ОРИЕНТАЦИИ ПОПЕРЕЧНОЙ АНИЗОТРОПИИ Ψ_A

С НАПРАВЛЕНИЕМ ДРЕЙФА Ψ_D :

анализ совпадения величин на примере 20/12/2011 в 18:06 UT

20.12.2011 г. 18:06 UT



DriftExplorer: $\Psi_D = 74^\circ$, $\Delta\Psi_1 = 64^\circ$ и $\Delta\Psi_2 = -42^\circ$, это большое различие.

LocalDrift: $\Psi_{D1} = 144^\circ$, $\Psi_{D2} = 37^\circ$, $\Delta\Psi_1 = -6^\circ$ и $\Delta\Psi_2 = -5^\circ$, это практически совпадение.

Программа LocalDrift позволяет рассчитывать направление дрейфа среднемасштабных неоднородностей в интересующей пространственной области, нежели DriftExplorer, что позволяет физически корректно интерпретировать полученные результаты:

- Численное сопоставление значений Ψ_A и направления дрейфа показало, что мелкомасштабные неоднородности в F-области над московским регионом вытянуты вдоль направления дрейфа среднемасштабных неоднородностей.
- Случаи, когда при сопоставлении Ψ_A и направления дрейфа наблюдалось большое различие между ними, можно отнести к случаям, когда один из методов (радиолокация или радиопросвечивание) не мог быть применен из-за собственных ограничений.

Авторы благодарят инженеров лаборатории радиопросвечивания ПГИ за проведение экспериментальных работ и сотрудников кафедры физики атмосферы физического факультета МГУ им М.В. Ломоносова за размещение приемного оборудования и обеспечение непрерывных наблюдений.