

## Спектральные особенности КВ сигнала нагревного стенда EISCAT в Европе и Антарктике

А. В. Зализовский, С. Б. Кашцев, Ю. М. Ямпольский, В. Г. Галушко, В. С. Белей<sup>1</sup>, Б. Айшем<sup>2</sup>, М. Т. Ритвелд<sup>3</sup>, С. Ла Хоз<sup>1</sup>, А. Брекке<sup>1</sup>, Н. Ф. Благовещенская<sup>4</sup>, В. А. Корниенко<sup>4</sup>

*Радиоастрономический институт НАН Украины,  
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4*

*<sup>1</sup>University of Tromsø, N-9037 Tromsø, Norway*

*<sup>2</sup>EISCAT Scientific Association, Postboks 432, N-9071 Longyearbyen, Norway*

*<sup>3</sup>EISCAT Scientific Association, N-9027 Ramfjordmoen, Norway*

*<sup>4</sup>Арктический и Антарктический институт (ААНИИ),  
Россия, 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38*

*Статья поступила в редакцию 3 марта 2004 г.*

Рассмотрены особенности распространения сигналов нагревного стенда EISCAT (г. Тромсё), принятых в трех пунктах в Европе и Антарктике во время международной измерительной кампании 26-30 октября 2002 года. В спектрах сигналов выделены две компоненты с различными характеристиками – “зеркальная” и “рассеянная”. Объяснена природа их появления. Отмечена высокая корреляция вариаций интенсивности и доплеровского смещения частоты рассеянной компоненты в приемных пунктах, разнесенных на большие расстояния. Показано, что вариации частоты могут быть связаны как с физическими скоростями движения внутри рассеивающей области, так и с вариациями плотности плазмы под ней. Восстановлена пространственная структура дрейфа плазменных неоднородностей.

Розглянуто особливості поширення сигналів нагрівного стенду EISCAT (м. Тромсе), прийнятих у трьох пунктах в Європі та Антарктиці під час міжнародної виміральної кампанії 26-30 жовтня 2002 року. У спектрах сигналів виділено дві компоненти з різними характеристиками – “дзеркальну” та “розсіяну”. Пояснено природу їх виникнення. Відзначено високу кореляцію варіацій інтенсивності та доплерівського зміщення частоти розсіяної компоненти в приймальних пунктах, рознесених на велику відстань. Показано, що варіації частоти можуть бути пов'язані як з фізичними швидкостями всередині області розсіювання, так і з варіаціями щільності плазми під нею. Відновлено просторову структуру дрейфу плазмових неоднорідностей.

### Введение

Мощные коротковолновые (КВ) нагревные стенды активно используются в США, Европе и России для проведения контролируемых модификаций земной ионосферы.

Основная научная направленность этих экспериментов состоит в использовании околоземной среды как “природной плазменной лаборатории” [1], в которой можно стимулировать ряд геофизических явлений в заданное время и в известном месте.

Одним из основных проявлений взаимодействия мощного КВ излучения с плазмой является развитие искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ), которая во многих радарных экспериментах выполняет роль естественной “цели” с распределенными параметрами. Отслеживая динамику ИИТ, пространственное распределение неоднородностей, их взаимодействие с внешними ионосферными и магнитосферными процессами, можно получать уникальную информацию как о самой турбулентности, так и о фоновых, “невозмущенных” свойствах плазменного окружения Земли [2-5]. Сегодня в мире активно работают три нагревных стенда: “Сура” (г. Нижний Новгород, Россия), EISCAT (г. Тромсё, Норвегия) и HAARP (Аляска, США). Большинство работ по радиозондированию области ИИТ основано на локальной диагностике возмущений в непосредственной близости от нагревного стенда или при сравнительно небольших удалениях от него [6-9] (см. также библиографию обзора [10]). В настоящей работе предпринята попытка радиодиагностики области нагрева на сверхдальних радиоперелиниях с применением в качестве зондирующего сигнала излучения самого нагревного стенда.

В октябре 2002 года в Радиоастрономическом институте НАНУ была организована и проведена международная измерительная кампания по исследованию воздействия КВ электромагнитного нагрева на ионосферную плазму. Одной из основных ее целей являлось обнаружение эффекта обогащения спектра сигнала накачки в различных геофизических условиях. Сигнал излучался нагревным стендом (НС), расположенным вблизи г. Тромсё (Норвегия), и состоял из двух гармоник, частоты которых  $f_1$  и  $f_2$  отстояли друг от друга на 19 или 22 Гц. Три разнесенные приемные позиции располагались в Антарктике на Украинской антарктической станции (УАС) “Академик Вернадский”, в Украине – в Харьковской области, и в России – вблизи Санкт-Петербурга (рис. 1). Регистрация сигналов велась как на основных частотах НС, так и вблизи высших гармоник  $nf_1$ ,  $nf_2$  и  $n(f_1 + f_2)$ . В Антарктике и

в Украине проводилась также регистрация сигналов в сверхнизкочастотном диапазоне в окрестности разностной частоты  $f_1 - f_2$ , которая могла возникать за счет нелинейного преобразования мощных исходных сигналов в области нагрева [11].

Цель настоящей работы состоит в анализе и интерпретации спектральных характеристик сигналов первой гармоники частоты накачки, принятых в различных пунктах, а также в установлении взаимосвязи этих характеристик с физическими процессами внутри области, облучаемой нагревным стендом.

## 1. Постановка эксперимента

Излучение высокочастотного сигнала осуществлялось с помощью нагревного стенда EISCAT, расположенного в точке с координатами  $69.7^\circ$  с. ш.,  $19.0^\circ$  в. д. (на рис. 1 он обозначен как “Тромсё”). Максимум диаграммы направленности передающей антенны был направлен вдоль силовых линий магнитного поля Земли под углом  $78^\circ$  к горизонту. Частоты сигналов выбирались таким образом, чтобы они не превосходили критическую частоту области  $F2$ . Значение критической частоты в ходе экспериментов контролировалось радаром некогерентного рассеяния и ионозондом в обсерватории EISCAT. Рабочие частоты НС варьировались от 4040 кГц до 7953.717 кГц в зависимости от текущих ионосферных условий.

Измерительная кампания проводилась в такое время года, когда солнечный терминатор на ионосферных высотах одновременно проходил через область нагрева и наиболее удаленный приемный пункт, расположенный в Антарктике. Излучение сигналов проводилось с 2 до 8 ч UT 26-29.10.2002 и с 4 до 12 ч 30.10.2002. Первые 55 минут каждого часа излучалась полная мощность, в последние пять минут мощность излучения либо снижалась и составляла 10 % от максимального уровня, либо НС отключался.

Регистрация сигналов велась в трех приемных пунктах (геометрия эксперимента показана на рис. 1). Первый пункт находился в Антарктике в точке с координатами

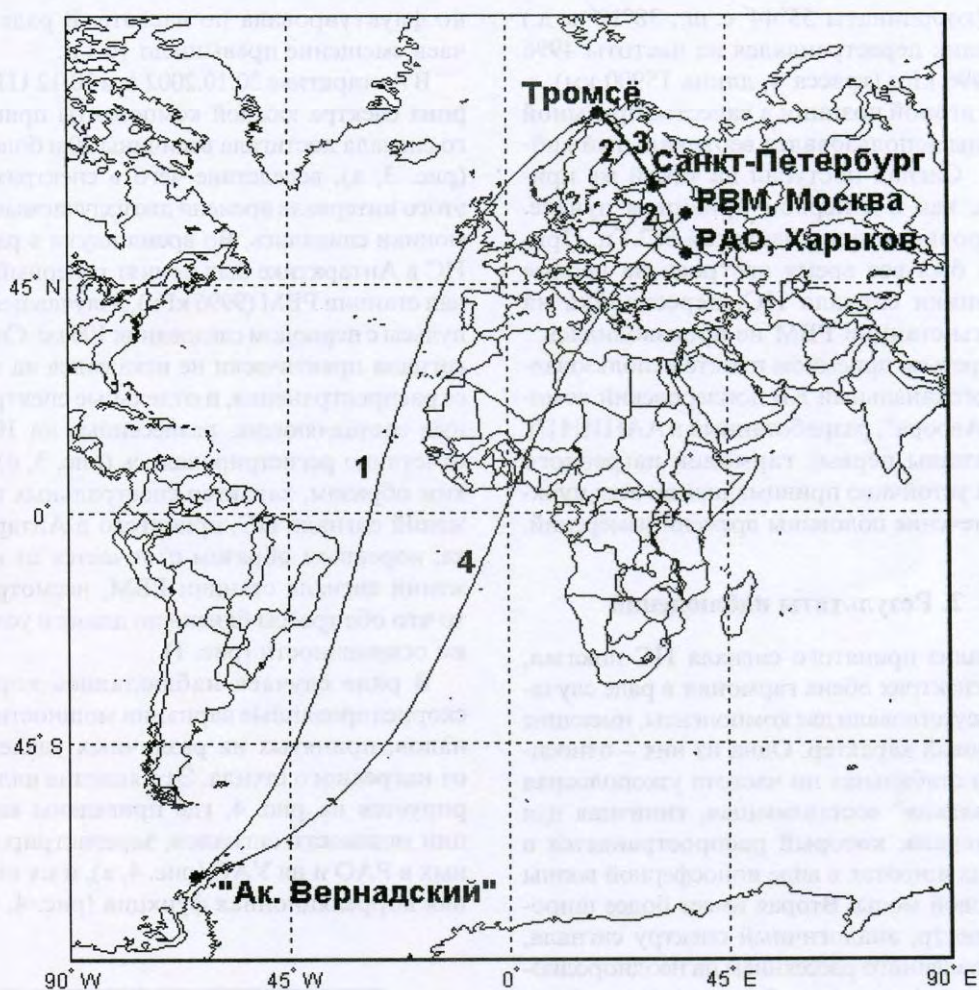


Рис. 1. Схема эксперимента

65°15' ю. ш., 64°16' з. д. (трасса 1, длина 16300 км). Вторая приемная позиция располагалась в Радиоастрономической обсерватории (РАО) Радиоастрономического института НАН Украины (координаты 49°40' с. ш., 36°50' в. д., трасса 2, длина 2400 км). Третий пункт (трасса 3, длина 1200 км) был организован Арктическим и Антарктическим институтом вблизи Санкт-Петербурга (координаты 59.95° с. ш., 30.7° в. д.).

Прием сигнала на УАС осуществлялся с помощью горизонтального диполя, диаграмма направленности которого была ориенти-

рована в направлении НС. Далее в одноканальном когерентном радиоприемном устройстве с высокостабильными гетеродинами сигнал преобразовывался к промежуточной частоте и фильтровался в полосе пропускания 300 Гц. Затем сигнал поступал на АЦП с динамическим диапазоном 72 дБ, частота оцифровки составляла 700 Гц. Дальнейшая обработка сигнала проводилась программными средствами. В последние 5 минут каждого часа для проведения сравнения с реперными сигналами Московской станции Службы точного времени и частоты

РВМ (координаты 55°44' с. ш., 38°12' в. д.) приемник перестраивался на частоты 4996 или 9996 кГц (трасса 4, длина 15900 км).

На второй позиции в качестве приемной антенны использовался вертикальный вибратор. Сигнал поступал на такой же приемник, как и в первом приемном пункте. Оцифровка велась с частотой 682 Гц. Приемник был все время настроен на первые гармоники сигнала НС, перестройка на частоты станции РВМ не производилась.

В третьем приемном пункте использовался многоканальный КВ доплеровский комплекс "Аврора", разработанный в ААНИИ [7].

Сигналы первых гармоник нагревного стенда устойчиво принимались во всех пунктах в течение половины времени измерений.

## 2. Результаты наблюдений

Анализ принятого сигнала НС показал, что в спектрах обеих гармоник в ряде случаев присутствовали две компоненты, имеющие различный характер. Одна из них – относительно стабильная по частоте узкополосная "зеркальная" составляющая, типичная для КВ сигнала, который распространяется в средних широтах в виде ионосферной волны скачковой моды. Вторая имеет более широкий спектр, аналогичный спектру сигнала, обусловленного рассеянием на неоднородностях ионосферы при работе на частоте выше максимально применимой для данной радиотрассы. Эту составляющую будем называть "рассеянной" компонентой [12]. В качестве примера на рис. 2 приведен амплитудный спектр сигнала, принятого в РАО. Во время рассматриваемого сеанса НС излучал две гармоники, смещенные относительно друг друга на 19 Гц (частоты  $f_1 = 7953717$  Гц и  $f_2 = 7953698$  Гц). Они отчетливо видны в спектре сигнала на частотах 0 и -19 Гц. Ниже по частоте наблюдаются две рассеянные спектральные компоненты (спектральные максимумы на частотах -12 и -31 Гц, соответственно). В отличие от сигнала, рассеянного естественными ионосферными неоднородностями в средних широтах [12], в нашем случае рассеянная компонента силь-

но флуктуировала по частоте. В ряде случаев смещение превышало 10 Гц.

В Антарктике 30.10.2002 г. в 10-12 UT ширина спектра каждой компоненты принятого сигнала достигала величины 20 и более Гц (рис. 3, а), вследствие чего в спектрах для этого интервала времени две излучаемые гармоники сливались. Во время паузы в работе НС в Антарктике был принят реперный сигнал станции РВМ (9996 кГц), излучавшей импульсы с периодом следования 100 мс. Спектр сигнала практически не искажался на трассе распространения, и отдельные спектральные составляющие, разнесенные на 10 Гц, отчетливо регистрировались (рис. 3, б). Таким образом, характер спектральных искажений сигнала НС, принятого в Антарктике, коренным образом отличается от искажений сигнала станции РВМ, несмотря на то что обе трассы близки по длине и условиям освещенности (рис. 1).

В ряде случаев наблюдались хорошо скоррелированные вариации мощности сигналов, принятых на различных удалениях от нагревного стенда. Это явление иллюстрируется на рис. 4, где приведены вариации мощности сигналов, зарегистрированных в РАО и на УАС (рис. 4, а), и их взаимная корреляционная функция (рис. 4, б).

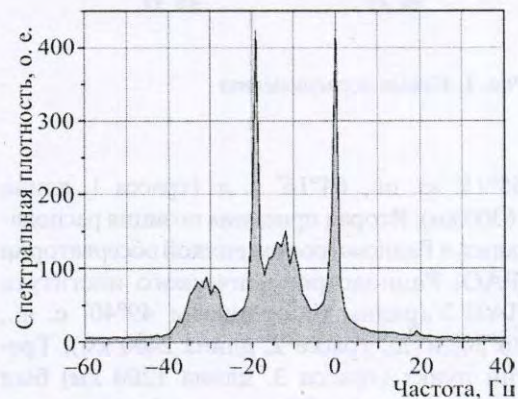
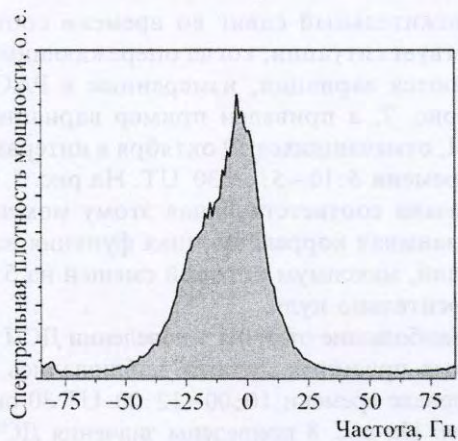
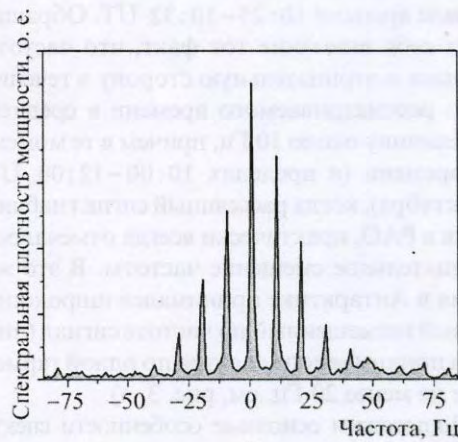


Рис. 2. Амплитудный спектр сигнала НС, принятого в РАО в 11:03:30–11:04:00 UT 30 октября 2002 г. Верхняя несущая частота  $f = 7953717$  Гц, частотное разрешение 1 Гц



а)

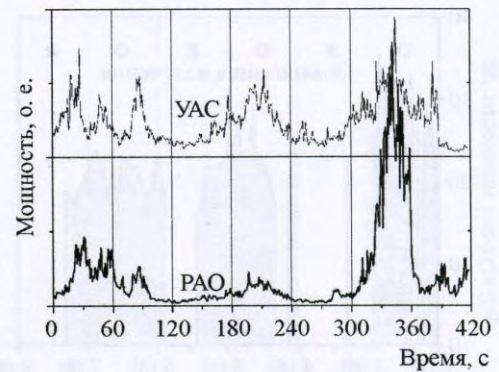


б)

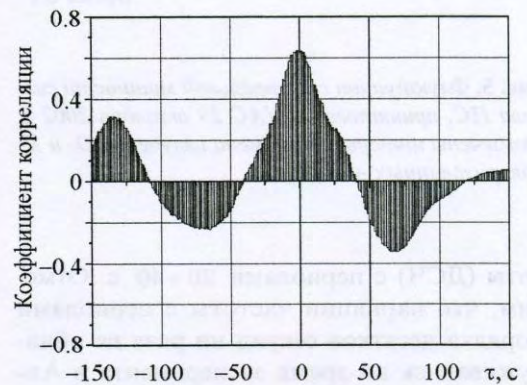
**Рис. 3.** а) Спектр мощности принятого в Антарктике сигнала НС, усредненный за время 10:03–10:07 UT 30 октября 2002 г. с частотным разрешением 1 Гц.

б) Спектр мощности принятого в Антарктике сигнала станции РВМ, излучавшей импульсы с частотой 10 Гц на частоте 9996 кГц, усредненный за время 9:55:30–9:59:30 UT 30 октября 2002 г. с частотным разрешением 1 Гц

Во время экспериментов было отмечено, что мощность рассеянной компоненты принятого сигнала зависит от поляризации излучения (рис. 5). На рисунке выделены временные интервалы излучения О- и Х-моды. Видно, что сигнал О-моды в Антарктике принимался устойчивее и



а)



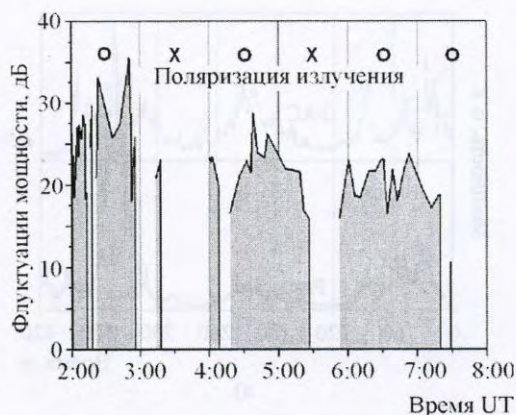
б)

**Рис. 4.** а) Вариации спектральной мощности сигналов НС в полосе 40 Гц, принятых в РАО и УАС 2:04–2:11 UT 29 октября 2002 г.

б) Взаимная корреляционная функция спектральных мощностей сигналов, принятых в РАО и УАС 2:04–2:11 UT 29 октября 2002 г.

его уровень был существенно выше уровня Х-моды.

Достаточно часто во всех приемных пунктах наблюдались квазипериодические вариации частоты рассеянных компонент обеих гармоник сигнала с периодами от десяти секунд до нескольких минут и девиациями частоты до 10 Гц. К примеру, в динамических спектрах сигналов, принятых одновременно в Антарктике, РАО и Санкт-Петербурге 29.10.2002 г. в 4:34–4:37 UT (рис. 6, а-в соответственно), отчетливо просматриваются вариации доплеровского смещения час-



**Рис. 5.** Флуктуации спектральной мощности сигнала НС, принятого на УАС 29 октября 2002 г. Отмечены интервалы времени излучения O- и X-поляризованных волн

тоты (ДСЧ) с периодами  $20 \div 40$  с. Отметим, что вариации частоты с периодами порядка десятков секунд ни разу не обнаруживались во время эксперимента в Антарктике в сигналах станции РВМ.

В большинстве случаев квазипериодические вариации ДСЧ в приемных пунктах практически совпадают как по амплитудам, так и по фазам. Однако 29 октября после 4 UT в вариациях ДСЧ отмечались отличия. В таблице приведены периоды квазипериодических вариаций  $T$ , временной сдвиг между вариациями  $\tau$ , полученный по смещению максимума взаимной корреляционной функции, и амплитуды вариаций ДСЧ в РАО ( $\delta F_R$ ) и УАС ( $\delta F_V$ ).

**Таблица.** Параметры квазипериодических вариаций ДСЧ сигналов НС, принятых в РАО и на УАС “Академик Вернадский” 29 октября 2002 г.

Время, UT	Период, с	$\tau$ , с	$\delta F_R$ , Гц	$\delta F_V$ , Гц
2:23 – 2:26	60	0	3	3
4:34 – 4:37	30	3	1.8	2.4
5:04 – 5:06	30	7	4	1.5
5:10 – 5:13:30	40	5	3.5	1.5

Положительный сдвиг во времени соответствует ситуации, когда опережающими являются вариации, измеренные в РАО. На рис. 7, а приведен пример вариаций ДСЧ, отмечавшихся 29 октября в интервале времени 5:10 – 5:13:30 UT. На рис. 7, б показана соответствующая этому моменту взаимная корреляционная функция вариаций, максимум которой смещен на 5 с относительно нуля.

Наибольшие отличия в поведении ДСЧ в разных приемных пунктах наблюдались в интервале времени 10:00 – 12:00 UT 30 октября. На рис. 8 приведены значения ДСЧ сигнала, принятого в РАО 30 октября в интервале времени 10:25 – 10:32 UT. Обращает на себя внимание тот факт, что частота смещена в отрицательную сторону в течение всего рассматриваемого времени в среднем на величину около 10 Гц, причем в те моменты времени (в пределах 10:00 – 12:00 UT 30 октября), когда рассеянный сигнал наблюдался в РАО, практически всегда отмечалось отрицательное смещение частоты. В это же время в Антарктике принимался широкополосный несмещенный по частоте сигнал (ширина принимаемого спектра по одной гармонике не менее 20 Гц, см. рис. 3, а).

Подытожим основные особенности спектральных характеристик сигналов НС, зарегистрированных в ходе измерительной кампании:

1. Спектр сигнала, как правило, состоит из зеркальной и рассеянной компонент.
2. Уровень мощности рассеянных компонент принимаемых сигналов зависит от поляризации излучения НС.
3. Флуктуации интенсивности и частоты

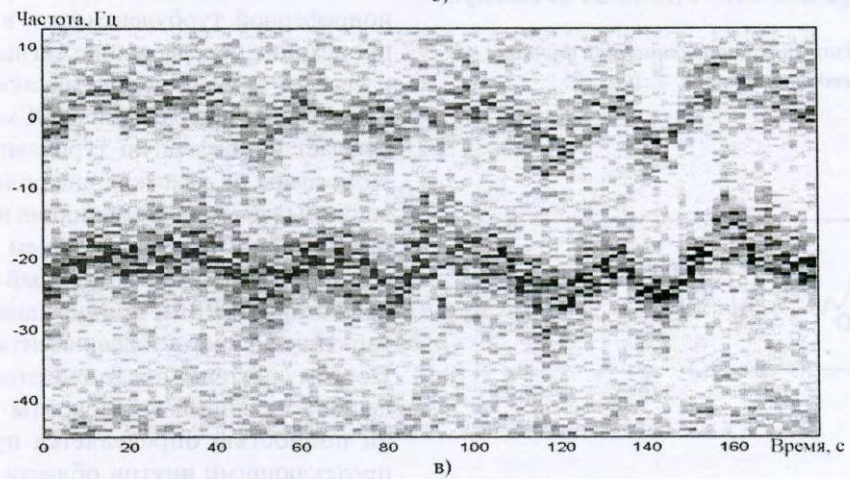
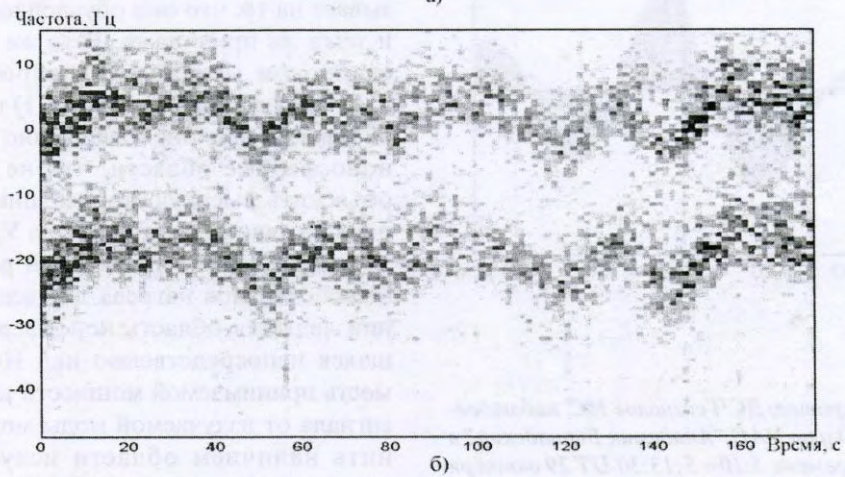
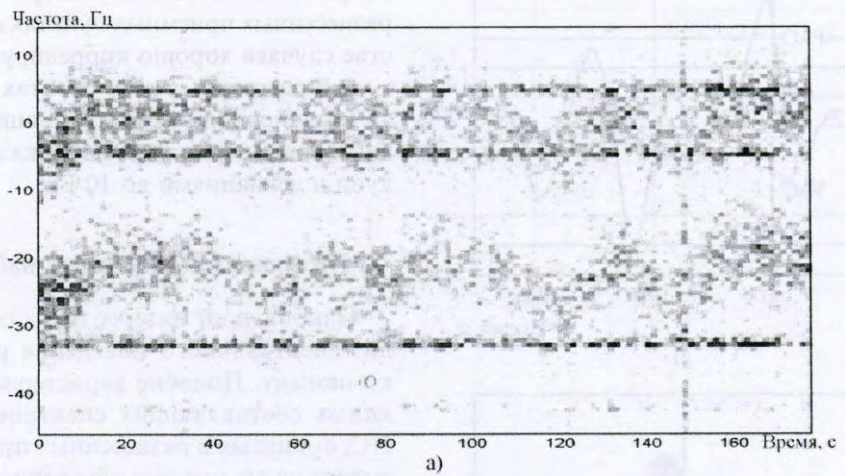
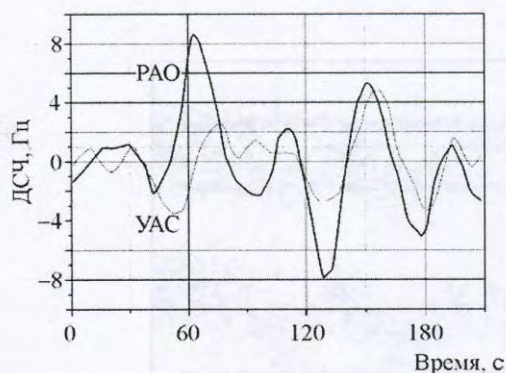
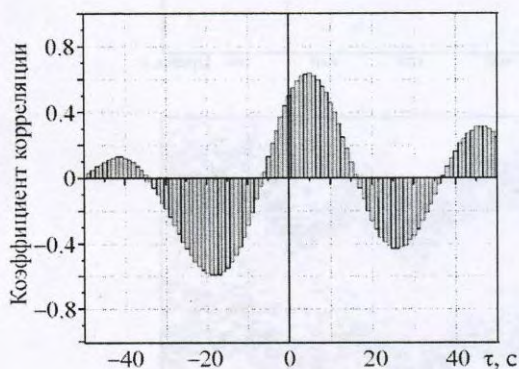


Рис. 6. Спектрограммы сигнала НС, принятого в 4:34–4:37 UT, 29.10.2002 г.:  
а) в Антарктике на УАС “Академик Вернадский”, б) в РАО РИ НАНУ, в) вблизи Санкт-Петербурга



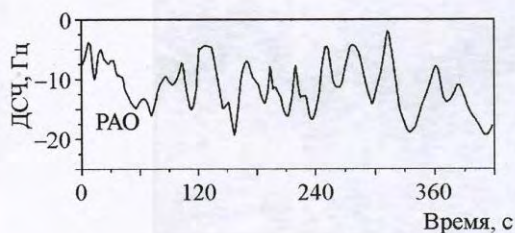
а)



б)

**Рис. 7. а)** Вариации ДСЧ сигналов НС, наблюдавшиеся в РАО и на УАС “Академик Вернадский” в интервале времени 5:10–5:13:30 UT 29 октября 2002 г.

**б)** Взаимная корреляционная функция вариаций, приведенных на рис. 7, а



**Рис. 8.** Доплеровское смещение частоты сигнала НС, принятого в РАО в 10:35–10:42 UT 30 октября 2002 г.

ты рассеянных частей спектра сигналов в разнесенных приемных пунктах в большинстве случаев хорошо коррелируют.

4. В рассеянных компонентах отмечаются квазипериодические вариации частоты сигналов с периодами порядка десятка секунд и девиациями до 10 Гц.

### 3. Интерпретация данных наблюдений

Наибольший интерес представляет анализ спектрального поведения рассеянных компонент. Подобие характеристик рассеянных составляющих спектров сигналов НС, принятых в разнесенных пунктах, указывает на то, что они обусловлены одними и теми же причинами. В то же время при скачковом механизме распространения вдоль радиотрасс 1 и 2 (рис. 1) на сигналы оказывают влияние совершенно различные ионосферные области, что не позволяет объяснить высокую корреляцию параметров рассеянных компонент на УАС и РАО.

Общей частью траекторий распространения сигналов нагрева для всех радиополучателей является область ионосферы, находящаяся непосредственно над НС. Зависимость принимаемой мощности рассеянного сигнала от излучаемой моды можно объяснить наличием области искусственной ионосферной турбулентности, в которой и происходит перераспределение сигнала НС (как известно, О-мода волны накачки намного эффективнее по сравнению с Х-модой и возбуждает ионосферную турбулентность [1]). Ионосфера на участках вне области нагрева оказывает меньшее влияние на параметры сигналов. Подтверждением этому служит практически неискаженный спектр сигнала станции РВМ, принимавшегося в Антарктике во время эксперимента (рис. 2, б). Поэтому логично предположить, что поведение рассеянной компоненты практически полностью определяется процессами, протекающими внутри области ИИТ.

С этой гипотезой хорошо согласуется также высокая корреляция вариаций интенсивности рассеянных сигналов, принятых в



разных приемных пунктах (рис. 4). Согласно теории однократного рассеяния [13], мощность рассеянного сигнала пропорциональна интенсивности неоднородностей  $\delta N/N$  (где  $\delta N$  – флуктуации, а  $N$  – среднее значение электронной концентрации). Наличие синхронных флуктуаций мощности сигналов во всех приемных пунктах может быть объяснено вариациями интенсивности ионосферных неоднородностей в области нагрева.

Еще одним доказательством определяющего влияния области ИИТ на поведение рассеянной компоненты сигналов НС является высокая пространственная корреляция квазипериодических вариаций частоты с характерными периодами порядка 10 с. В то же время в реперных сигналах станции РВМ аналогичные вариации отсутствуют.

Рассмотрим подробнее вариации частоты сигналов НС. В общем случае доплеровское смещение частоты рассеянного сигнала  $F_D$  за счет движения рассеивающих неоднородностей в двухпозиционном варианте можно выразить следующим образом [14]:

$$F_D = \frac{1}{2\pi} \vec{k}_s \vec{V}, \quad (1)$$

где  $\vec{V}$  – скорость движения рассеивающих неоднородностей,  $\vec{k}_s = \vec{k}_r - \vec{k}_i$  – вектор рассеяния. При этом векторы как падающей  $\vec{k}_i$ , так и рассеянной  $\vec{k}_r$  волн равны по модулю:  $|\vec{k}_i| = |\vec{k}_r| = nk_0$ , где  $n$  – коэффициент преломления волны в месте рассеяния;  $k_0 = 2\pi f/c$  – модуль волновых векторов падающей и рассеянной волн в свободном пространстве,  $f$  – частота сигнала,  $c$  – скорость света.

В нашем случае сигнал как до, так и после рассеяния распространялся в ионосферной плазме, влиянием которой пренебречь нельзя, поскольку коэффициент преломления в области рассеяния существенно меньше единицы.

ДСЧ ионосферного сигнала за счет флуктуаций плотности плазмы на трассе распространения можно выразить как

$$F_D = -\frac{f}{c} \frac{\partial}{\partial t} \int n(l) dl, \quad (2)$$

где интеграл представляет собой фазовый путь волны в плазме,  $l$  – координата вдоль траектории распространения волны  $L$ .

Очевидно, возможны две причины возникновения ДСЧ. Первая связана с перемещением плазменных неоднородностей, вторая – с флуктуациями фазового пути из-за изменений концентрации плазмы.

Если основной вклад в ДСЧ вносит изменение фазового пути сигнала на общей восходящей части траектории, вариации частоты в различных приемных пунктах должны быть всегда практически одинаковыми по амплитуде и синфазными.

Если ДСЧ связано с перемещением неоднородностей внутри области ИИТ, то в общем случае, при произвольных направлениях движений рассеивателей, вариации ДСЧ сигналов в разных приемных пунктах могут быть различными.

Для того чтобы выяснить, какая из причин определяла ДСЧ в том или ином случае, проанализируем отличия ДСЧ в сигналах НС, принимаемых в различных пунктах. Рассмотрим подробнее геометрию эксперимента (рис. 1). Азимут станции “Академик Вернадский” относительно Тромсё равен  $229^\circ$ , а РАО и Санкт-Петербурга –  $148^\circ$ . Угол между двумя направлениями составляет  $81^\circ$ . В угломестной плоскости волновой вектор волны накачки  $\vec{k}_i$  направлен почти вертикально, вдоль силовых линий магнитного поля. Сделанные оценки показывают, что во всех приемных пунктах угол места сигнала, рассеянного областью ИИТ, не превышает  $10^\circ$ , следовательно, направление волнового вектора рассеянной волны  $\vec{k}_r$  близко к горизонтальному, а вектор рассеяния  $\vec{k}_s = \vec{k}_r - \vec{k}_i$  в вертикальной плоскости ориентирован под углом приблизительно  $45^\circ$  (рис. 9).

Заметим, что любые движения в вертикальной плоскости, которой принадлежит биссектриса угла между направлениями из Тромсё на УАС и РАО, дают одинаковые

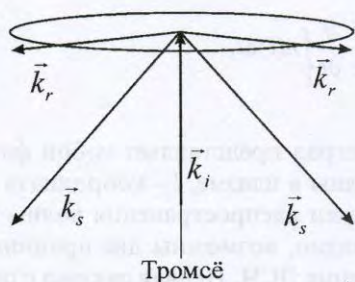


Рис. 9. Схема рассеяния в вертикальной плоскости

вклады в ДСЧ сигналов, регистрируемых в этих приемных пунктах. В нашем эксперименте эта плоскость ориентирована практически меридионально (смещение составляет  $8^\circ$  к востоку относительно направления на север). Склонение в Тромсё положительное и составляет величину около  $4^\circ$ , угол между магнитным меридианом и биссектрисой угла между направлениями на УАС и РАО равен  $4^\circ$ .

Таким образом, при горизонтальных дрейфах неоднородностей преимущественно в направлении магнитного меридиана или при переносе неоднородностей вдоль силовых линий магнитного поля Земли вариации ДСЧ во всех приемных пунктах будут одинаковыми. В этом случае невозможно экспериментально определить, является ДСЧ результатом перемещений рассеивателей или флуктуаций плотности плазмы. Можно лишь утверждать, что перенос неоднородностей поперек меридиональной плоскости отсутствует.

Отличия в амплитудах и фазах вариаций ДСЧ на УАС и РАО могут свидетельствовать о дрейфе неоднородностей в направлении, не лежащем в меридиональной плоскости. И чем больше угол между вектором скорости движения рассеивателей и меридиональной плоскостью, тем больше отличия в смещениях частоты. В рамках эксперимента наблюдались как одинаковые по амплитудам и фазам, так и существенно различные вариации ДСЧ рассеянных сигналов на разных радиолиниях.

Рассмотрим случаи различного поведения ДСЧ сигналов НС в РАО и на УАС. Как уже отмечалось выше, наибольшие отличия вариаций ДСЧ наблюдались в интервале времени 10:00–12:00 UT 30.10.2002 г. В это время НС излучал сигналы с частотами  $f_1 = 7953717$  Гц и  $f_2 = 7953698$  Гц, отрицательное смещение частоты отмечалось только в РАО, в то время как на УАС наблюдался сигнал со средним нулевым ДСЧ. Смещение частоты в одну сторону в течение длительного времени вряд ли можно объяснить изменением длины фазового пути сигнала, поскольку, как следует из (2), скорость ее увеличения при среднем ДСЧ  $F_D = -10$  Гц составляет около 400 м/с, и за время около 20 мин она должна была бы измениться на величину порядка 400 км. Кроме того, в условиях дополуденной освещенности в Тромсё электронная концентрация в ионосфере должна была бы увеличиваться, что приводило бы к уменьшению фазового пути сигнала и положительному ДСЧ. В эксперименте же наблюдалась обратная ситуация.

Очевидно, что в данном случае именно скорости рассеивателей определяют сдвиг частоты сигнала в РАО. Нулевое значение ДСЧ в Антарктике означает отсутствие составляющей скорости вдоль направления Тромсё–УАС. Следовательно, перенос происходил в северо-западном направлении из освещенной области ионосферы в затененную. Величину проекции скорости перемещения неоднородностей плазмы на вектор рассеяния можно оценить по формуле (1), для чего необходимо рассчитать коэффициент преломления волны в месте рассеяния. Известно, что область ИИТ возбуждается преимущественно на высотах, где выполняется условие верхнего гибридного резонанса для волны накачки [1]:

$$f^2 = f_0^2 + f_H^2. \quad (3)$$

Здесь  $f_0$  – плазменная частота,  $f_H$  – электронная гирочастота. В этой области коэффициент преломления  $n$  может быть получен по формуле [15]:

$$n_{o,x} = 1 - \frac{2X(1-X)}{2(1-X) - Y_T^2 \pm \sqrt{Y_T^4 + 4(1-X)^2 Y_L^2}}, \quad (4)$$

где  $X = \frac{f_0^2}{f^2}$ ,  $Y = \frac{f_H}{f}$ ,  $Y_L = Y \cos \theta$ ,  $Y_T = Y \sin \theta$ ,  $\theta$  – угол между волновым вектором и вектором магнитного поля. В нашем случае ( $\theta = 0$ ) для волны обыкновенной поляризации на рабочей частоте  $f = 7953717$  Гц коэффициент преломления равен 0.18. Если рассеяние происходит на неоднородностях, лежащих в области высот верхнего гибридного резонанса и ниже ( $n$  изменяется от 1 до 0.18), возможные скорости рассеивателей изменяются в пределах  $270 \div 1500$  м/с.

В большинстве случаев во всех измерительных пунктах наблюдались одинаковые вариации ДСЧ рассеянных сигналов, которые, как показано выше, могут быть связаны как со скоростями плазменных неоднородностей, так и флуктуациями электронной концентрации вдоль траектории распространения волны накачки.

Квазипериодические вариации частоты с периодами порядка 10 с и девиацией частоты до 10 Гц в большинстве случаев наблюдались 27 и 29 октября на частотах НС 4040 кГц и 4912.8 кГц. Используя формулы (3) и (4), оценим коэффициент преломления волны на высотах формирования области ИИТ. Он равен 0.37 для частоты 4040 кГц, и 0.31 – для 4912.8 кГц.

Рассмотрим возможность влияния флуктуаций фазового пути сигнала на ДСЧ. Предположим, что волна НС распространяется снизу вверх вдоль силовых линий магнитного поля. Электронная концентрация в ионосфере растет линейно с высотой с градиентом  $\partial N/\partial z$ . Допустим, в некотором слое ионосферной плазмы электронная концентрация изменяется со скоростью  $\partial N/\partial t$ . В этом случае вклад слоя в ДСЧ можно представить в виде:

$$F_D = \frac{f}{c} \frac{\partial N/\partial t}{\partial N/\partial z} \Delta n(\Delta z), \quad (5)$$

где  $\Delta n(\Delta z) = n(z_1) - n(z_2)$  – разность коэффициентов преломления для волны на нижней  $n(z_1)$  и верхней  $n(z_2)$  границах слоя.

Для численных оценок зададим следующие параметры ионосферы. Профиль электронной концентрации – линейный от нижней границы ионосферы до высоты области рассеяния. Высота нижней кромки ионосферы – 90 км, высота области рассеяния определяется частотой верхнего гибридного резонанса для волны накачки (3) и равна 240 км. Электронная концентрация в слое изменяется со скоростью  $10^3 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$  (менее 1 % в секунду относительно рассчитанных концентраций в областях верхнего гибридного резонанса для обеих частот). В случае тридцатисекундных пульсаций смещение частоты одного знака имеет место в течение 15 с. За это время электронная концентрация изменится не более чем на 10 %. Соответствующее таким параметрам ДСЧ для  $f = 4040$  кГц равно 7.3 Гц. Полученные значения показывают, что, в принципе, вариации электронной концентрации плазмы на общей восходящей части траектории распространения сигналов могут приводить к наблюдающимся в эксперименте смещениям частоты.

Косвенным свидетельством вклада рассматриваемого механизма в случае ночных квазипериодических вариаций ДСЧ могут служить следующие факты. Достаточно часто во всех пунктах наблюдались вариации ДСЧ с периодами  $10 \div 60$  с и девиацией частоты порядка 10 Гц (рис. 6), которые можно связать с пульсациями класса Pc3 [2]. В то же время, резонансные пульсации на L-оболочке Тромсё ( $L \approx 6$ ) имеют период около 4 мин (класс Pc5). Они устойчиво наблюдались в магнитометрических данных обсерватории Тромсё с амплитудой более 10 нТ, однако в вариациях ДСЧ рассеянных сигналов не регистрировались.

Эти пульсации связаны с МГД колебаниями в магнитосферном резонаторе, образованном силовыми линиями магнитного поля и отражающими ионосферными границами в магнитосопреженных регионах. В таком резонаторе устанавливаются колебания альфвеновских волн, которые вызывают вариации скорости плазмы, однако не приводят к модуляции ее плотности [16]. Пульсации Pc3 на столь высоких  $L$ -оболочках вероятнее всего связаны с магнитозвуковыми колебаниями, модулирующими также плотность плазмы [16, 17]. Поскольку пульсации именно с такими периодами регистрировались в вариациях ДСЧ, можно предположить, что в этом случае основной вклад в его формирование вносили изменения плотности плазмы, приводившие к модуляции длины фазовой траектории.

### Выводы

В рассматриваемом эксперименте сигналы нагревного стенда распространялись на большие расстояния двумя различными способами. Первый способ – стандартное скачковое ионосферное распространение излучения боковых лепестков диаграммы направленности антенны НС. Вторым – перерасcеяние сигнала НС на неоднородностях области ИИТ, стимулированной собственным излучением НС, и его дальнейшее распространение ионосферной волной. В спектре принятого сигнала, как правило, удается разделить эти две составляющие. Параметры рассеянной компоненты определяются областью ИИТ и практически не зависят от трассы распространения сигнала.

Предложены два механизма возникновения вариаций ДСЧ сигналов нагревного стенда. Первый механизм связан с изменением скоростей рассеивающих неоднородностей плазмы; второй обусловлен изменениями фазового пути сигнала за счет модуляции плотности плазмы вдоль трассы его распространения. Найдены интервалы времени, в пределах которых определяющую роль играет тот или иной механизм.

Используя несколько приемных позиций, стандартные приемные средства и слабонаправленные антенны, можно идентифицировать причины возникновения вариаций ДСЧ сигналов нагревного стенда. Полученные результаты могут быть использованы при решении обратной задачи восстановления параметров области ИИТ и естественных волновых процессов, влияющих на ее состояние.

Работа выполнена при поддержке проектов УНТЦ Р-072 и 827-с, INTAS гранта №03-51-5583 и содействии Украинского антарктического центра.

Авторы благодарят персонал УАС, РАО и обсерватории EISCAT, а также сотрудников университета г. Тромсё. Мы также признательны В. Г. Синицыну, В. Г. Безродному, А. В. Колоскову, И. И. Пикулику, А. С. Кашееву и П. В. Силину за помощь в проведении эксперимента в Антарктике и в РАО и полезные замечания в процессе обсуждения результатов.

### Литература

1. Л. М. Ерухимов, С. А. Метелев, Е. Н. Мясников, Н. А. Митяков, В. Л. Фролов. Изв. вузов. Радиофизика. 1987, **30**, №2, с. 208-22.
2. А. Ф. Беленов, П. В. Пономаренко, В. Т. Синицын, Ю. М. Ямпольский. Изв. вузов. Радиофизика. 1993, **33**, №12, с. 1089-1095.
3. В. С. Белей, В. Г. Галушко, А. В. Зализовский, П. В. Пономаренко, Ю. М. Ямпольский. Геомагнетизм и аэрономия. 1997, **37**, №6, с. 91-98.
4. V. G. Sinitsin, M. C. Kelley, Yu. M. Yampolski, D. L. Hysell, A. V. Zalizovski, and P. V. Ponomarenko. J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1999, **61**, pp. 903-912.5.
5. P. V. Ponomarenko, Yu. M. Yampolski, A. V. Zalizovsky, D. L. Hysell, O. F. Tyrnov. J. Geophys. Res. 2000, **105**, No. A1, pp. 171-181.
6. J. A. Fejer, M. P. Sulzer, F. T. Djuth. J. Geophys. Res. 1991, **96**, pp. 15985-16008.
7. Н. Ф. Благовещенская. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве. Санкт-Петербург, Гидрометеиздат, 2001, 287 с.
8. P. Stubbe, H. Kohl, and M. T. Rietveld. J. Geophys. Res. 1992, **97**, pp. 6285-6297.

9. Y. M. Yampolski, V. S. Beley, S. B. Kascheev, A. V. Koloskov, V. G. Somov, D. L. Hysell, B. Isham, M. C. Kelley. *J. Geophys. Res.* 1997, **102**, No. A4, pp. 7461-7467.
10. P. Stubbe. In: *Modern ionospheric science*. Ed. by H. Kohl, R. Ruster, and K. Shlegel. 1996, pp. 274-321.
11. M. J. McCarrick, D. D. Sentman, A. Y. Wong, R. F. Wuerker, and B. Chouinard. *Radio Science*. 1990, **25**, No. 6, pp. 1291-1298.
12. V. G. Bezrodny, P. V. Ponomarenko, Y. M. Yampolski. *Radio Sci.* 1997, **32**, No. 1, pp. 219-229.
13. H. G. Booker and W. E. Gordon. *Proc. IRE*. 1950, **38**, pp. 401-412.
14. С. М. Рытов, Ю. А. Кравцов, В. И. Татарский. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля. Москва, Наука, 1978, 463с.
15. K. Davies. *Ionospheric Radio*. Published by: Peter Peregrinus Ltd. London, Unated Kingdom, 1990, 580 pp.
16. В. Б. Ляцкий, Ю. П. Мальцев. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. Москва, Наука, 1983, 192 с.
17. А. В. Гульельми, В. А. Троицкая. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. Москва, Наука, 1973, 208 с.

### **Spectral Features of HF Signals from the EISCAT Heating Facility in Europe and in Antarctica**

**A. V. Zalizovski, S. B. Kashcheyev,  
Yu. M. Yampolski, V. G. Galushko,  
V. S. Beley, B. Isham, M. T. Rietveld,  
C. La Hoz, A. Brekke,  
N. F. Blagoveschenskaya,  
V. A. Kornienko**

Analysis is presented of the propagation of signals from the Tromsø heating facility that have been received during the international measuring campaign of 26-30 October, 2002 at three sites in Europe and in Antarctica. Two components with different characteristics ("mirror reflected" and "scattered") were observed in the signal spectra. Their nature is explained. The variations in the signal intensity as well as in the Doppler frequency shift recorded at the widely separated sites show a high level of correlation. It is shown that the Doppler frequency variations can be associated with physical velocities of motion inside the scattering volume and/or with variations of plasma density in the underlying region. The spatial structure of drifts of the plasma irregularities is reconstructed.