

## СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ СКОРОСТИ НЕЙТРАЛЬНОГО МЕРИДИОНАЛЬНОГО ВЕТРА НА ИОНОСФЕРНЫХ ВЫСОТАХ В СРЕДНИХ ШИРОТАХ СИБИРСКОГО РЕГИОНА

А.А. Щербаков, А.В. Медведев, Д.С. Кушнарев

### SEASONAL VARIATIONS OF NEUTRAL MERIDIONAL WIND VELOCITY AT IONOSPHERIC HEIGHTS AT MIDDLE LATITUDES OF THE SIBERIAN REGION

A.A. Shcherbakov, A.V. Medvedev, D.S. Kushnarev

В работе описано исследование ветровой динамики на высотах F2 слоя ионосферы с помощью Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР) в период роста солнечной активности 2011–2014 гг. Кратко рассмотрена методика получения скоростей термосферных ветров на ИРНР. А также представлена экспериментальная проверка работоспособности описанной методики на основе определения скорости низкоорбитальных спутников. Проанализированы длинные ряды данных и показаны основные характеристики среднеширотного меридионального нейтрального ветра над Восточной Сибирью для различных сезонов года. Кроме того было проведено сравнение результатов с предсказанием модели ветров HWM.

This work describes the study of the meridional neutral wind dynamics at the ionosphere F2 layer heights with Irkutsk Incoherent Scatter Radar (IRNR) during the growth of solar activity period in 2011–2014. It briefly discusses the technique of obtaining thermospheric wind velocity with IRNR. Also it shows the experimental verification of the described technique based on the determination of the low-orbit satellites' velocities. We analyzed the long rows of data and show the main characteristics of mid-latitude meridional neutral winds over eastern Siberia for different seasons of the year. In addition, we compared our results with HWM model predictions and winds obtained on other IS facilities.

#### Введение

Наше понимание физических процессов в ионосфере с одной стороны кажется достаточно полным и казалось бы текущие модели должны удовлетворительно объяснять большинство крупномасштабных особенностей ионосферных слоев. На практике же распределение наблюдаемой ионизации, может меняться очень быстро, и в значительной степени зависит от эффектов переноса, вследствие электрических полей и ветров нейтральной атмосферы. То есть главный вызов нашего времени же лежит скорее в получении лучшей модели динамических эффектов, которые обуславливают большинство аномалий в F регионе ионосферы [Titheridge, 1991]. Именно поэтому проблема изучения динамического режима относится к числу важнейших, а теоретическое и экспериментальное изучение движений в ионосфере занимает важное место в международных программах геофизических и космических исследований.

Основным источником данных о динамике ионосферной плазмы является мировая сеть радаров НР. В практике метода НР для определения лучевой скорости плазмы обычно используют спектр мощности или же Фурье преобразование спектра - его автокорреляционную функцию (АКФ). В первом приближении скорость дрейфа плазмы может быть определена независимо от других ионосферных параметров через угол наклона фазы  $\psi(\tau)$  АКФ [Shcherbakov, 2009]. Однако, доплеровский сдвиг спектра НР за счет движения плазмы весьма мал по сравнению с шириной спектра рассеянного сигнала, а дисперсия при определении доплеровского сдвига – велика. На ИРНР такая методика определения скорости дрейфа методом линейной регрессии имеет еще и дополнительную погрешность. Дело в том, что уникальной чертой ИРНР, которую необходимо учитывать в ионосферных измерениях, является его частотный принцип сканирования, т. е., зависимость направления излучения от несущей частоты. При возникновении, например, значительных горизон-

тальных градиентов ионизации в плоскости сканирования этот фактор приводит к искажениям спектра НР сигнала, делая его асимметричным. Искажения такого рода сказываются на точности восстановления параметров плазмы, в особенности при определении скорости дрейфа. Для компенсации этих искажений на ИРНР нами был разработан специальный метод [Potekhin, 2008].

#### Экспериментальная проверка методики определения скорости вдоль луча зрения ИРНР

Поскольку, как было сказано выше, методика определения скорости дрейфа плазмы базируется на фитировании фазы АКФ, в условиях низкого соотношения сигнал/шум, а также искажений вносимых в спектр сигнала из-за конструктивных особенностей ИРНР, она несомненно нуждается в оценке точности получаемых результатов. Для подобной проверки был проведен специальный эксперимент, суть которого сводилась к тому, чтобы по сигналу, отраженному от медленно летящего спутника, пересекающего диаграмму направленности радара НР, измерить скорость этого спутника и сравнить ее с расчетным значением. В ходе эксперимента зондирование производилось фазоманипулированным сигналом с длительностью 900 мкс. Подобная форма сигнала была выбрана соображений близости ширины спектра к характерным значениям спектра сигналов НР и для того, чтобы обеспечить переход АКФ отраженного сигнала через ось абсцисс, что необходимо для устойчивой работы корреляционной методики [Shcherbakov, 2009]. Длительное временное накопление сигнала, в отличие от стандартной методики обработки сигналов НР, не производилось. То есть расчет скорости пролетающих спутников происходил для каждой полученной реализации сигнала в отдельности.

В ходе эксперимента были измерены скорости нескольких спутников, пересекающих диаграмму направленности радара, в частности на рис. 1 пока

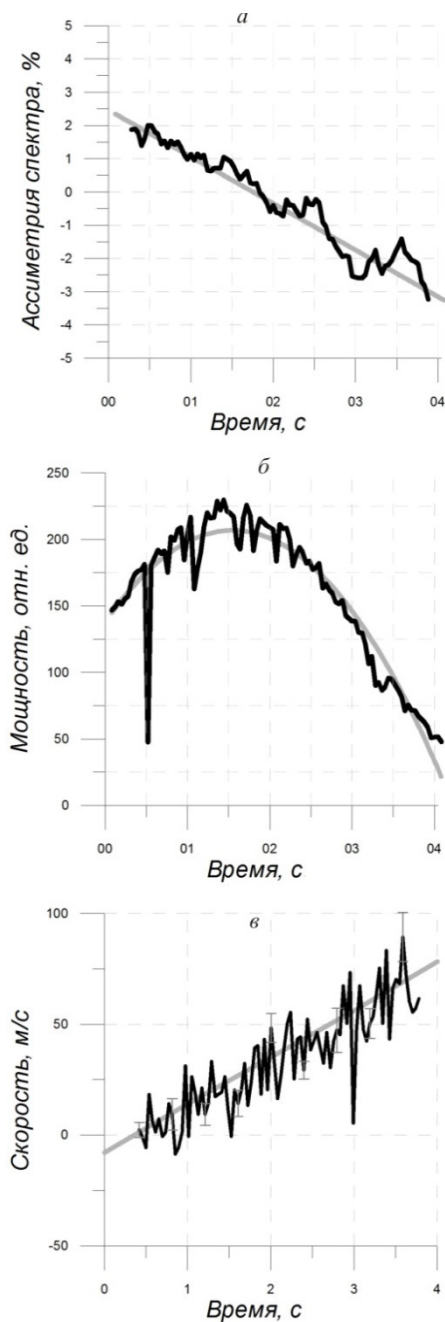


Рис. 1. Панель (а) несдвиговая асимметрия спектра сигнала отраженного от спутника Н-1 R/B(MABES), во время пролета через диаграмму направленности радара ИРНР. Панель (б) мощность отраженного сигнала во время пролета спутника. Панель (в) сравнение полученной скорости спутника Н-1 R/B(MABES) вдоль луча зрения ИРНР (черная линия) с расчетной скоростью (серая линия).

заны результаты полученные по спутнику Н-1 R/B(MABES). На панели (б) рисунка показана мощность отраженного сигнала, видно как она сперва возрастает по мере того как спутник входит в диаграмму радара, а затем убывает, когда спутник ее покидает. На панели (в) показано сравнение измеренной скорости вдоль луча зрения радара (черная кривая) с расчетной (серая прямая). Как видно из рисунков наименьшие значения стандартного отклонения получаемой скорости наблюдаются в тот момент, когда спутник находится в центре диаграм-

мы направленности, и соотношение сигнал/шум максимально. Когда же спутник находится у границ диаграммы радара, и соотношение сигнал/шум, падает, дисперсия определяемой скорости возрастает. Отдельно стоит упомянуть поведение параметра характеризующего несдвиговую асимметрию спектра отраженного сигнала. Отличительной чертой ИРНР, которую необходимо учитывать в ионосферных измерениях, является его частотный принцип сканирования, т. е., зависимость направления излучения от несущей частоты. При возникновении, например, значительных горизонтальных градиентов ионизации, а значит и горизонтальных градиентов рассеянной мощности, в плоскости сканирования этот фактор приводит к искажениям спектра ИР сигнала, делая его асимметричным. Пролетающий спутник, постепенно входящий и покидающий диаграмму направленности радара ИР, как раз и создает подобный градиент «рассеянной» мощности. На верхней панели рис. 1 показан коэффициент асимметрии спектра. Видно как на входе в диаграмму направленности спектр отраженного сигнала искривлен в левую сторону, в районе максимума отраженной мощности, когда спутник находится в центре диаграммы – спектр практически не искажен, и затем, когда спутник начинает покидать диаграмму направленности, спектр начинает искривляться вправо.

Таким образом, стандартное отклонение полученных скоростей при максимальном соотношении сигнал/шум не превышает 10–20 м/с. То есть можно сделать вывод, о том что корреляционная методика определения скорости вдоль луча зрения радара по фазе АКФ работает удовлетворительно и может применяться для определения скоростей дрейфа плазмы, при условии выбора достаточного времени накопления, позволяющего получить удовлетворительное соотношения сигнал/шум.

### Расчет нейтральных ветров

Все виды движений в ионосфере можно грубо разделить на два класса – ветры и дрейфы. Когда говорят о ветрах в ионосфере, то имеют в виду, как правило, движения нейтральной атмосферы, возникающих из-за неравномерного нагревания и охлаждения атмосферы, и появляющихся из-за этого градиентов давления и температуры. Когда говорят об ионосферных дрейфах, то имеют в виду дрейф ионизированной компоненты в целом под действием сторонних сил [Веупон, Уильямс, 1977]. В общем случае на ионизированную компоненту действует три категории сил, и это выражение можно представить в виде  $V_i = V_d + V_n + V_e$ :

1. Диффузионные процессы, связанные с наличием градиента гравитации и электронной концентрации –  $V_d$ .
2. Движения нейтральных частиц, связанных с пространственно-временными вариациями параметров нейтральной атмосферы –  $V_n$ .
3. Движения вызванные электрическими полями –  $V_e$ .

Как уже было сказано выше, в экспериментах, проводимых на ИРНР, мы можем измерять скорость

дрейфа плазмы вдоль луча зрения радара –  $V_{los}$ , который на частотах близких к 159 МГц практически параллелен линиям магнитного поля в наших широтах [Shcherbakov, 2009], то есть можно записать, что  $V_i = V_{los} \cdot \cos Y$ , где  $Y$  – угол между лучом зрения радара и магнитным полем. Таким образом, чтобы оценить скорость нейтрального меридионального ветра  $V_n$ , нам необходимо исключить из лучевой скорости дрейфа влияние амбиполярной диффузии  $V_d$  и электрических полей [Titheridge, 1991].

Амбиполярная диффузия может быть рассчитана из высотных вариаций параметров ионосферы. Для расчета скорости амбиполярной диффузии воспользуемся выражениями, предложенными в [Schunk, 2009]:

$$V_d = -\sin Y D \left[ \frac{\partial n_e}{\partial h} \frac{1}{n_e} + \left( \frac{1}{T_p} \frac{\partial T_p}{\partial h} + \frac{1}{H_p} \right) \right]$$

$$H_p = \frac{kT_p}{mg_{\parallel}} \quad D = \frac{kT_p}{mv_{in}}$$

где  $H_p$  – плазменная шкала высот,  $D$  – коэффициент амбиполярной диффузии,  $T_p$  – плазменная температура, а  $v_{in}$  – частота соударений ион-нейтрал, которая рассчитывается по следующей формуле:

$$v_{in} = 6.5 \cdot 10^{-11} \sqrt{T_n} (1 - 0.15 \lg(T_n) + 0.0061 \lg^2(T_n)) [O].$$

где  $[O]$  – концентрация атомарного кислорода, а  $T_n$  – температура нейтрального газа, которые можно оценивать с помощью эмпирической модели нейтральной атмосферы MSISE.

ИРНР в своих регулярных экспериментах, пусть и с некоторыми допущениями, но позволяет одновременно излучать на двух разных частотах, рис. 2. В силу частотного сканирования, каждый из лучей будет иметь свое наклонение, а значит свой угол между лучом зрения радара и магнитным полем. Ско-

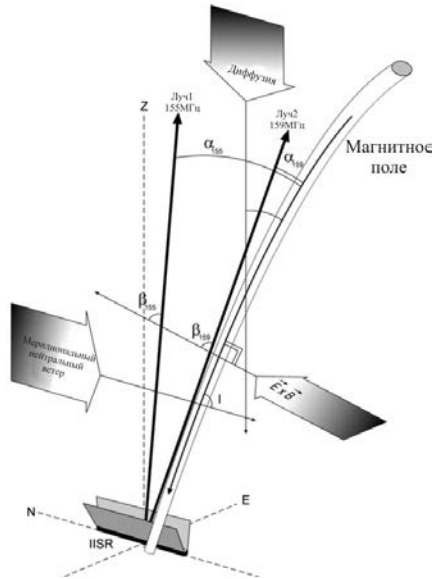


Рис. 2. Схематическое представление геометрии многолучевого эксперимента. Здесь  $\alpha$  – углы между лучами радара на частотах 155 и 159 МГц и магнитным полем,  $\beta$  – углы между лучами радара и направлением движения заряженных частиц под действием электрического поля,  $Y$  – угол между меридиональным нейтральным ветром и магнитным полем.

рость дрейфа плазмы в этом случае можно представить в виде двух компонент – параллельной и перпендикулярной линиям магнитного поля, в первую вносят свой вклад нейтральный ветер и диффузия, во второй – электрические поля в направлении север-юг и запад-восток:

$$V_{\parallel} = U_{wind} \cos Y + U_{dif} \sin Y$$

$$V_p = U_{E \times B}$$

$$V_{pe} = U'_{E \times B}$$

Все эти компоненты в свою очередь вносят разный вклад в определяемые нами лучевые скорости на разных частотах, поскольку лучи имеют разное положение относительно магнитного поля Земли:

$$V_{159} = V_{\parallel} \cos \alpha_{159} + V_p \cos \beta_{159} + V_{pe} \cos \gamma_{159}$$

$$V_{155} = V_{\parallel} \cos \alpha_{155} + V_p \cos \beta_{155} + V_{pe} \cos \gamma_{155}$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  – углы между лучом радара и компонентой скорости.

Решить подобную систему уравнений, можно лишь введя дополнительное условие. В качестве такого регуляризирующего условия, мы использовали критерий минимума модуля скорости плазмы. Подобная идея регуляризации применялась рядом авторов в работах по расчету полного вектора электрического поля с помощью многолучевого моностатического радара [Nicolls, 2014]. Разрешим систему относительно  $V_{\parallel}$  и  $V_p$ :

$$V_{\parallel} = A_{\parallel} - B_{\parallel} V_{pe}$$

$$V_p = A_p - B_p V_{pe}$$

где

$$A_{\parallel} = \frac{V_{155} \cos(\beta_{159}) - V_{159} \cos(\beta_{155})}{\cos(\alpha_{155}) \cos(\beta_{159}) - \cos(\alpha_{159}) \cos(\beta_{155})},$$

$$B_{\parallel} = \frac{\cos(\beta_{159}) \cos(\gamma_{155}) - \cos(\beta_{155}) \cos(\gamma_{159})}{\cos(\alpha_{155}) \cos(\beta_{159}) - \cos(\alpha_{159}) \cos(\beta_{155})},$$

$$A_p = \frac{V_{159} - A_{\parallel} \cos(\alpha_{159})}{\cos(\beta_{159})},$$

$$B_p = \frac{\cos(\beta_{159}) - B_{\parallel} \cos(\alpha_{159})}{\cos(\beta_{159})}.$$

Таким образом, квадрат скорости плазмы запишется в качестве квадратичной формы от  $V_{pe}$ :

$$V^2 = (A_{\parallel} - B_{\parallel} V_{pe})^2 + (A_p - B_p V_{pe})^2 + V_{pe}^2$$

В этом случае, используя критерий минимума модуля скорости плазмы, нетрудно найти  $V_{pe}$ :

$$V_{pe} = \frac{A_{\parallel} B_{\parallel} + A_p B_p}{1 + B_{\parallel}^2 + B_p^2}.$$

и далее  $V_{\parallel}$  и  $V_p$  по формулам, приведенным выше.

Полученный в этом случае ветер, представленный на рис. 3, для летнего эксперимента в 2013 г. очень хорошо согласуется с предсказанием теоретической модели HWM07.

### Сезонные вариации скорости нейтрального меридионального ветра

На рис. 4 показаны усредненные до суточного хода скорости нейтрального меридионального ветра

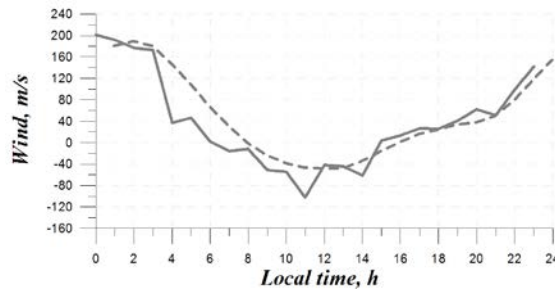


Рис. 3. Усредненные до суточных вариаций скорость нейтрального ветра в июне 2013 г. на высоте 270 км (сплошная серая линия), а также суточный ход ветра по модели HWM07 (пунктирная серая линия).

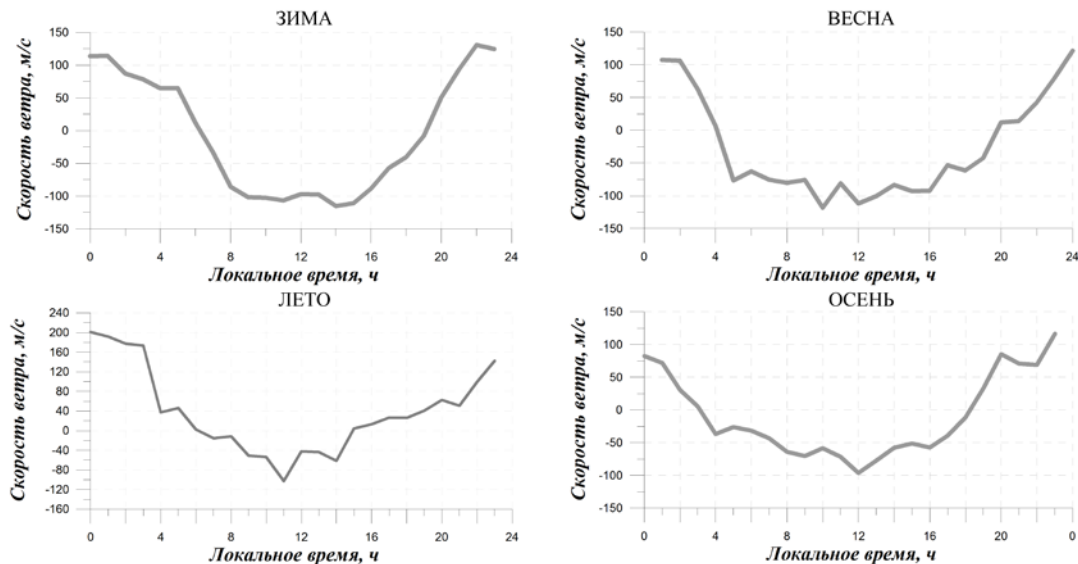


Рис. 4. Усредненные до суточного хода скорости нейтрального меридионального ветра, полученные на ИРНР в разные сезоны года.

за различные сезоны года, за положительное направление принято движение к экватору. Полученные данные являются уникальными для средних широт восточно-сибирского региона. По рисункам можно сделать вывод, что в зимний период дневные скорости значительно превышают летние поднимаясь до 120 м/с, кроме того в утренние часы в зимний период наблюдается аномальное поведение ветра, плохо согласующееся с наиболее известными моделями нейтральных ветров. С чем связано подобное поведение, с наличием нашей местной аномалии, со внезапными стратосферными потеплениями или же с недоучетом каких-то факторов в нашей методике, вопрос требующий дальнейшего изучения и накопления большего объема экспериментальных данных. Летом же скорости ветра значительно превышают по модулю в ночное время, достигая значений в 200 м/с. Поведение ветра в осенний и весенний периоды во многих деталях представляют собой промежуточное состояние между зимним и летним периодами, и имеет минимальный суточный перепад при переходе от дневных значений к ночным. В своей дальнейшей работе мы планируем, накопив достаточно экспериментального материала, перейти к созданию собственной модели нейтральных ветров верхней атмосферы. Создание такой модели, принимающей во внимание региональные особенности среднеширотной ионосферы восточно-сибирского региона, крайне важно, поскольку большинство

международных моделей базируются на данных высокоширотных радаров ИР, либо на данных, полученных на радаров, находящихся в западном полушарии.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-13-05-00153.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Beynon W.J.G., Williams P.J.S. // Report Prog. Physics. 1978. V. 41.
- Nicolls M.J., Russell Cosgrove, Hasan Bahcivan. Estimating the vector electric field using monostatic, multibeam incoherent scatter radar measurements // Radio Science. November 2014. V. 49, iss. 11. P. 1124–1139.
- Potekhin A.P., Medvedev A.V., Zavorin A.V., et al. Development of Diagnostic Capabilities of the Irkutsk Incoherent Scattering Radar // Cosmic Res. 2008. V. 46, N 4. P. 347–353.
- Schunk R.W., Nagy A.F. Ionospheres Physics, Plasma Physics, and Chemistry. Second edition // Cambridge Atmospheric and Space Science Series. 2009.
- Shcherbakov A.A., Medvedev A.V., Kushnarev D.S. Correlation method for determining the ionospheric plasma drift velocity at the Irkutsk incoherent scatter radar // Geomagnetism and Aeronomy. 2009. V. 49, N 7. P. 1028–1033.
- Titheridge J.A. Mean meridional wind in the ionosphere at 70N // Planet Space Sci. 1991. V. 39, N 5. P. 657–669.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия