

УДК 520.16, 523.31, 523.9, 520.86, 550.388, 621.396

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ НАБЛЮДЕНИЯ ИОНОВ ГЕЛИЯ С ПОМОЩЬЮ РАДАРОВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Д.В. Котов, Л.Ф. Черногор

## ON THE OBSERVATION OF FEATURES OF HELIUM IONS USING THE INCOHERENT SCATTERING TECHNIQUE

D.V. Kotov, L.F. Chernogor

Рассматриваются особенности предложенной авторами методики обработки экспериментальных данных радара некогерентного рассеяния Института ионосферы (г. Харьков). Показано, что эта методика, в отличие от существовавших, позволяет уверенно регистрировать ионы гелия и оценивать их относительное содержание.

The features of the incoherent scatter radar data processing method offered by the authors for Institute of the ionosphere (Kharkiv) are considered. It is shown that this method, in contrast to existing, can reliably detect helium ions and estimate their fraction.

### Введение

Ионный состав внешней ионосферы является многокомпонентным. Наряду с ионами атомарного кислорода и водорода в общем случае в плазме могут присутствовать и ионы гелия. Пространственно-временные вариации относительного содержания  $N(\text{He}^+)/N$  и концентрации ионов гелия все еще изучены недостаточно [West, 2009]. Тем не менее, согласно последним данным, основанным преимущественно на анализе результатов спутниковых измерений, значение параметра  $N(\text{He}^+)/N$  уменьшается с ростом широты и в средних широтах в диапазоне высот 400–1500 км в обычных условиях не превышает 10–15 % [Triskova et al., 2003]. Это обстоятельство усложняет и без того непростую задачу получения достоверных данных о концентрации ионов гелия с помощью метода некогерентного рассеяния (НР).

Существующие методики получения параметра  $N(\text{He}^+)/N$  на основе измеренных автокорреляционных функций (АКФ) НР-сигнала обладают рядом принципиальных недостатков.

Например, ограничения, накладываемые на вид высотных профилей получаемых параметров ионосферной плазмы на основе существующих физических представлений, теоретически могут дать приемлемые результаты. Особенно в случае, когда проводится экстраполяция вверх сравнительно надежных данных, полученных в области максимума ионизации [Erickson and Swartz, 1994]. Однако при таком подходе практически невозможно четко обосновать оптимальность используемых параметров ограничения. Результатом применения подобного подхода может стать неконтролируемое смещение оценок искомых параметров.

Аналогичными недостатками, обусловленными, однако, иными причинами, характеризуется и наиболее корректный и современный подход к анализу данных метода НР – full-profile алгоритм [Husell et al., 2008].

Еще один подход основан на анализе (с применением критерия  $\chi^2$ ) минимальных среднеквадратических расхождений, полученных при сравнении экспериментально полученных спектров НР-сигналов с двумя типами теоретических спектров – рассчитанными в предположении наличия трех ( $\text{O}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,

$\text{He}^+$ ) и двух ( $\text{O}^+$ ,  $\text{H}^+$ ) сортов ионов [Gonzalez et al., 1996]. Недостатки такого подхода вытекают непосредственно из известных особенностей критерия  $\chi^2$  [Вентцель, 1969].

Помимо упомянутых трудностей, существует еще один практический момент, не рассматриваемый в литературе, но, как будет показано ниже, основополагающий для получения достоверных оценок параметра  $N(\text{He}^+)/N$ . Речь идет о выборе оптимальных шагов по определяемым параметрам ионосферной плазмы.

Цель работы – представить алгоритм анализа данных метода НР, гарантирующий получение достоверных значений относительного содержания ионов гелия, а также продемонстрировать примеры результатов моделирования и обработки экспериментальных данных харьковского радара НР, подтверждающие принципиальную важность правильного выбора шагов по определяемым параметрам ионосферной плазмы.

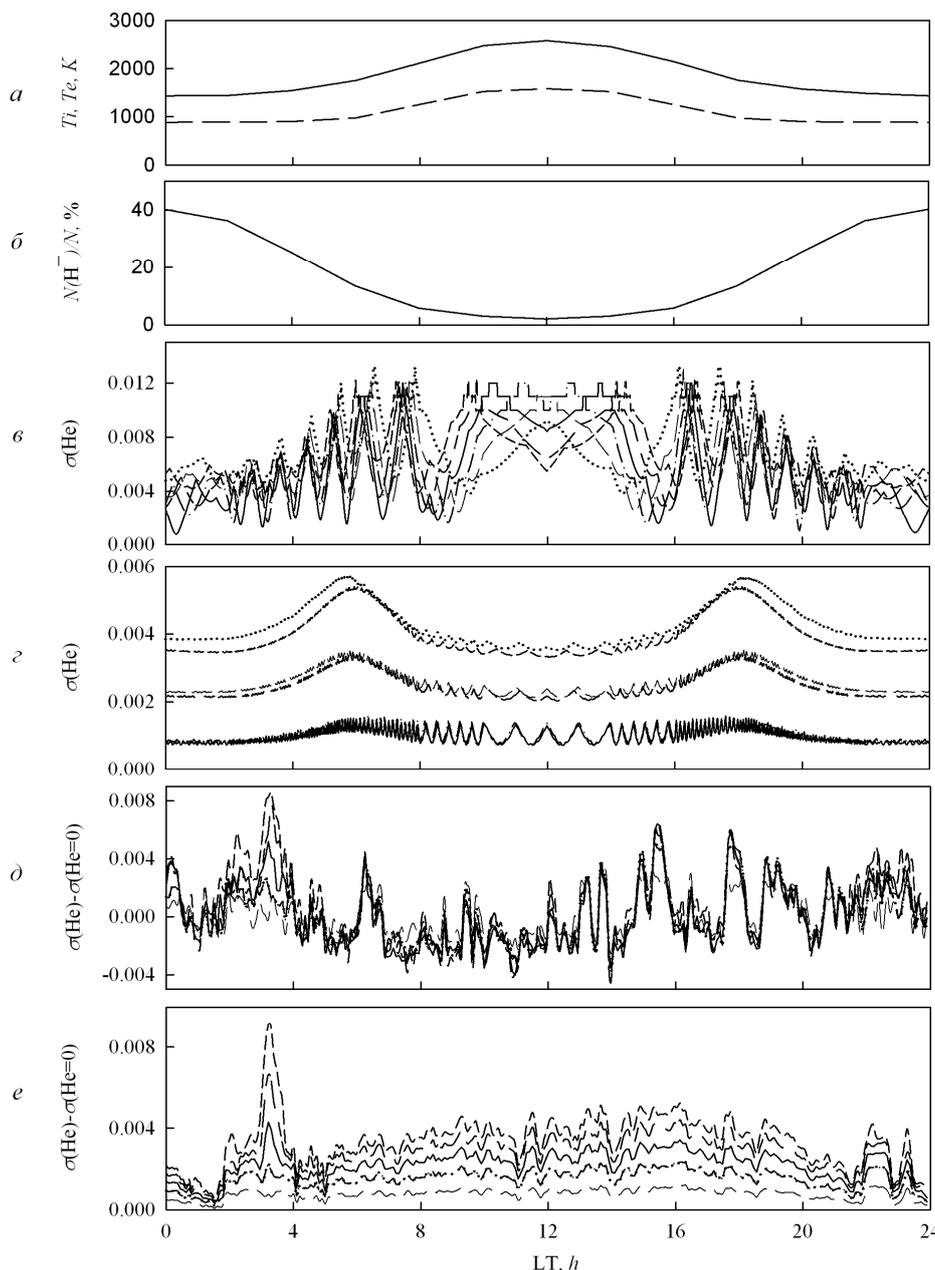
### Алгоритм обработки. Результаты

В основу алгоритма анализа экспериментальных данных, ориентированного на правильное обнаружение и оценивание параметра  $N(\text{He}^+)/N$ , положена идея сравнительного анализа суточных зависимостей минимальных среднеквадратических отклонений  $\sigma(\text{He})$ , полученных при сопоставлении измеренных АКФ НР сигнала  $R^*(\tau)$  с набором теоретических функций  $R(\tau, N(\text{He}^+)/N = \text{const})$ , рассчитанных при фиксированных значениях  $N(\text{He}^+)/N$ .

На рисунке приведены результаты расчета величин  $\sigma(\text{He})$  для различных заданных значений  $N(\text{He}^+)/N$ . Расчет проводился при существенно отличающихся шагах по параметрам  $\Delta T_i$ ,  $\Delta T_e$ ,  $\Delta N(\text{H}^+)/N$ .

Модельное значение параметра  $N(\text{He}^+)/N$  было задано постоянным в течение суток и равнялось 0.05.

Анализ приведенных модельных вариаций показывает, что использование неоптимальных значений шагов по параметрам ( $\Delta T_{i,e} = 100$  К,  $\Delta N(\text{H}^+)/N = 0.05$ ) приводит к существенным ошибкам при оценивании параметра  $N(\text{He}^+)/N$ . Так, из рисунка в следует, что в дневное время параметр  $N(\text{He}^+)/N$ , определяемый по результатам поиска минимального среднеквадратического расхождения  $\sigma$ , в течение нескольких часов



Суточные вариации температуры электронов (сплошная линия) и ионов (штриховая линия) (а), а также относительного содержания ионов водорода (б), используемые для модельных расчетов вариаций параметра  $\sigma(\text{He})$ , а также результаты расчета  $\sigma(\text{He})$  для модельных данных (в, г) и результатов эксперимента (д, е). Вариации в, д получены при  $\Delta T_{i,e}=100$  К,  $\Delta N(\text{H}^+)/N=0.05$ , г, е – при  $\Delta T_{i,e}=10$  К,  $\Delta N(\text{H}^+)/N=0.005$ . На графиках в–е результаты расчета параметра  $\sigma(\text{He}=0.0)$  показаны точками,  $\sigma(\text{He}=0.02)$  – длинным пунктиром,  $\sigma(\text{He}=0.04)$  – штрих-пунктиром,  $\sigma(\text{He}=0.06)$  – сплошной линией,  $\sigma(\text{He}=0.08)$  – штрихом переменной величины,  $\sigma(\text{He}=0.10)$  – коротким штрихом.

устойчиво принимает значение, равное нулю, а около полудня резко повышается до 0.1. В то же время из рисунка (г) видно, что использование оптимальных значений шагов по параметрам позволяет однозначно определить достоверные значения  $N(\text{He}^+)/N$  на протяжении суток.

Аналогичная картина наблюдается и в случае анализа экспериментальных данных. Неоптимальный выбор шагов по параметрам плазмы при обработке приводит к ложному появлению самых разных (в том числе, и больших – до 0.1) значений параметра  $N(\text{He}^+)/N$ , тогда как оптимальная обработка четко демонстрирует отсутствие сколько-нибудь

значительного количества ионов гелия в плазме для данных условий ( $N(\text{He}^+)/N \approx 0.0$ ).

Отметим, что в общем случае при анализе экспериментальных данных разность  $\sigma(N(\text{He}^+)/N) - \sigma(N(\text{He}^+)/N+0.01)$  по абсолютной величине в среднем составляет менее пяти процентов от значения  $\sigma(N(\text{He}^+)/N)$ . Поэтому на практике целесообразнее рассматривать вариации разности  $\sigma(N(\text{He}^+)/N)$  и, например,  $\sigma(N(\text{He}^+)/N=0)$ . В то же время, подобное систематическое расхождение значений  $\sigma$  позволяет уверенно регистрировать присутствие в заданной области ионосферы ионов гелия, исключить ложное обнаружение таких ионов и получать надежные

оценки их относительного содержания с разрешением по  $N(\text{He}^+)/N$  не хуже 0.01.

Отметим также еще один важный результат. Рисунок (з) показывает, что минимальные среднеквадратические отклонения, рассчитанные при значениях  $N(\text{He}^+)/N$ , равноудаленных от истинного, имеют очень близкие значения. Это обстоятельство может быть использовано для дополнительного контроля достоверности полученных вариаций параметра  $N(\text{He}^+)/N$ .

#### Выводы

1. Проведено моделирование, показавшее необходимость правильного выбора шагов по параметрам плазмы для обеспечения правильного обнаружения ионов гелия и получения достоверных значений его относительного содержания. Получены значения оптимальных шагов по параметрам для анализа данных харьковского радара НР.

2. Предложен новый алгоритм оценивания параметра  $N(\text{He}^+)/N$ . Эффективность и надежность алгоритма подтверждена моделированием и результатами обработки экспериментальных данных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.

Erickson J.P., Swartz E.W. Mid-latitude incoherent scatter observations of helium and hydrogen ions // *Geoph. Res. Letters*. 1994. V. 21, N 24. P. 2745–2748.

Gonzalez S.A., Sulzer M.P. Detection of He+ layering in the topside ionosphere over Arecibo during equinox Solar minimum conditions // *Geoph. Res. Letters*. 1996. V. 23, N 18. P. 2509–2512.

Hysell D.L., Rodrigues F.S., Chau J.L., Huba J.D. Full profile incoherent scatter analysis at Jicamarca // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. P. 59–75.

Triskova L., Truhlik V., Smilauer J. An empirical model of ion composition in the outer ionosphere // *Adv. Space Res.* 2003. V. 31, N 3. P. 653–663.

West K.H. Observations of He+ concentrations in the topside ionosphere under equinox conditions near solar maximum: Morningside morphology // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114, N A09307. 16 p. doi:10.1029/2008JA014014.

*Институт ионосферы НАН Украины и МОН Украины, Харьков*