

## Определение параметров ионосферы на основе новой методики обработки данных иркутского радара некогерентного рассеяния

Д. С. Хабитуев, Б. Г. Шпынев, А. Г. Сетов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033, Россия  
E-mail: Khabituev@iszf.irk.ru*

Работа посвящена описанию новой методики вторичной обработки данных иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР). Методика включает комплекс программ, который обеспечивает многопараметрическое фитирование (подгонку) полного профиля первичных данных ИРНР на основе адаптивного симплекс-процессора (АСП). АСП — вычислительное ядро новой программы обработки, в котором используются генетические методы фитирования полного профиля стартового набора данных. Использование адаптивного симплекс-процессора позволяет значительно повысить точность восстановления ионосферных параметров: электронной плотности, электронной и ионной температур, скорости дрейфа плазмы, ионного состава плазмы. Кроме того, в новом обрабатывающем комплексе используется модифицированное уравнение радиолокации, в котором учитывается рефракция электромагнитной волны зондирующего сигнала радара в ионосферной плазме. Несмотря на увеличение числа стартовых параметров и рост объема вычислений, благодаря использованию АСП удалось сохранить вычислительную скорость новой методики на низком уровне. На основе разработанной методики проведена тестовая обработка данных иркутского радара за 2000 г. Полученные результаты показывают беспрецедентную точность фитирования стартовых профилей мощности и спектров ИРНР. Получены новые данные относительно скорости дрейфа плазмы вдоль луча зрения радара, в которых практически отсутствует зависимость от высоты, а также данные об относительном ионном составе плазмы с наличием тяжёлых ионов в нижней ионосфере и лёгких ионов на больших высотах.

**Ключевые слова:** ионосфера, метод некогерентного рассеяния радиоволн

Одобрена к печати: 01.07.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-282-289

### Введение

Первые исследования ионосферы на основе метода некогерентного рассеяния (НР) радиоволн были проведены во второй половине XX в. Пионерские работы по созданию и описанию теории некогерентного рассеяния заложили основу его применения для зондирования ионосферы (Farley, 1966, 1969, 1972; Woodman, Hagfors, 1969). В этих, ставших классическими, работах было дано теоретическое обоснование метода некогерентного рассеяния и получены основные выражения для связи профиля спектральной мощности с ионосферными параметрами  $N_e$ ,  $T_e$ ,  $T_i$ ,  $V_d$ ,  $m_i$ . В дальнейшем теория некогерентного рассеяния была в значительной степени доработана и усовершенствована (Holt et al., 1992; Kudeki et al., 2003; Potekhin, Bergardt, 2000), и на сегодняшний день она является мощным и информативным методом зондирования ионосферы.

Радары некогерентного рассеяния представляют собой сложные и дорогостоящие установки, и поэтому только экономически развитые страны могут позволить себе их разработку и содержание. Мировая сеть радаров НР насчитывает 11 установок. В нашей стране на сегодняшний день имеется одна система подобного типа — иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) (Жеребцов и др., 2002; Потехин и др., 2008). Эта уникальная установка была создана в последнее десятилетие XX в. на основе бывшей радиолокационной станции дальнего обнаружения ракетных пусков «Днепр», переданной для научных целей. В связи с тем, что изначально иркутский радар не предназначался для исследований замагниченной ионосферной плазмы, стандартная теория НР была адаптирована под его конкретные условия

(Медведев и др., 2004). Основным отличием ИРНР от других установок подобного типа является линейная поляризация приёмной антенны, что приводит к возникновению фарадеевских замираний в полном профиле мощности принимаемого сигнала (Shrynev, 2004). Этот факт сильно искажает профиль полной мощности ИРНР, в результате чего осложняется восстановление профиля электронной плотности.

В частности, с начала проведения регулярных экспериментов на ИРНР в профиле мощности наблюдалось уменьшение полной мощности сигнала на малых высотах, чего не может быть по физическим соображениям. Объяснение сводилось к ошибке, вызванной несовершенством приёмной антенны. Также к недостаточно понимаемым и игнорируемым эффектам можно отнести неравномерный по высоте шум принимаемого сигнала в профилях мощности и спектрах. В недавней работе (Shrynev, 2017) предложено новое объяснение данных «артефактов» и представлена теоретическая база для их описания. Было обнаружено, что в измеряемом профиле мощности присутствует некий слабый сигнал, который вносит малую поправку и приводит к разнонаправленному искажению профиля мощности. Также было установлено, что излучаемый радаром сигнал при прохождении через среду ионосферной плазмы претерпевает рефракцию, что приводит к искажению профиля спектральной плотности.

Ранее в процессе обработки данных ИРНР эти эффекты искажения не учитывались, что приводило к систематическим ошибкам при определении параметров ионосферы. В новом программном комплексе на основе адаптивного симплекс-процессора (АСП) используется радиолокационное уравнение с рефракционной поправкой, что позволяет исключить ошибки и повысить достоверность определяемых ионосферных параметров.

### Новая методика обработки на основе АСП

Для моделирования процесса рассеяния используется уравнение радиолокации, в котором учитывается рефракционная поправка (Shrynev, 2017). Уравнение имеет следующий вид:

$$\langle y(t_{s2})y^*(t_{s1}) \rangle \cong \int d\tau \frac{dr}{r^2} W_{ts_1,ts_2}(\tau, r) \cos^2(k\gamma\varphi(r)) \times \rho(k(1-\beta\tilde{N}), \tau, r), \quad (1)$$

где  $\langle y_A(t)y_A^*(t) \rangle$  — квадратичная статистика накопленного сигнала с линейной поляризацией (особенность ИРНР);  $\tau$  — задержка;  $r$  — радиолокационная дальность;  $W_{ts_1,ts_2}$  — весовая функция;  $\cos^2(k\gamma\varphi(r))$  — член, который отвечает за эффект Фарадея;  $\rho(k(1-\beta\tilde{N}), \tau, r)$  — рефракционная поправка. На основе этого нового радиолокационного уравнения был реализован комплекс программ для вторичной обработки данных ИРНР на основе АСП.

Метод АСП используется для решения обратной задачи восстановления полных профилей спектральной плотности и мощности. На *рис. 1* представлен теоретический профиль спектральной плотности с учётом рефракции. Рефракционная поправка в новом уравнении радиолокации приводит к искажению в спектральной области, но этот эффект ранее не учитывался при обработке данных ИРНР.

Регуляризация обратной задачи в методе АСП проводится на основе учёта интегральных производных (Шпынев, Воронов, 2013). Кроме этого, в методе заложено использование стандартных штрафных и бонусных функций, что значительно повышает быстродействие. Основной проблемой при реализации АСП является задание коэффициентов фитирования, поскольку от их величины зависит гладкость получаемых решений и в определённых условиях они могут сильно исказить форму функционала и приводить к получению неверного решения.

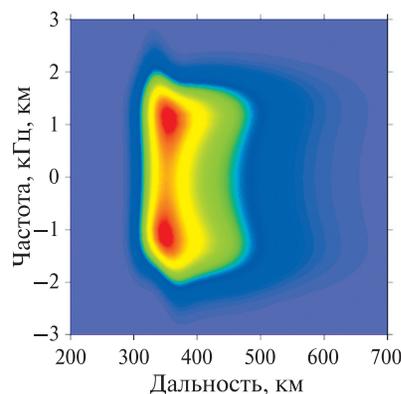


Рис. 1. Профиль спектральной плотности

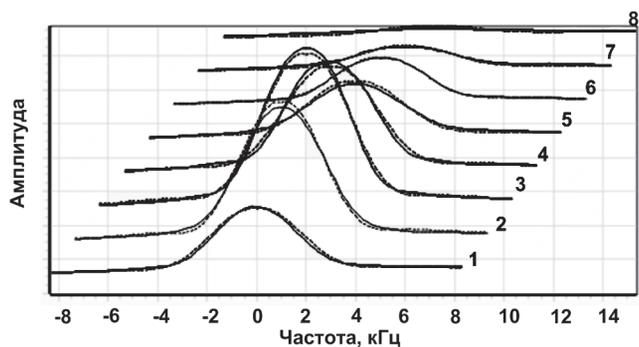


Рис. 2. Восемь измеренных спектров ИРНР (сплошные линии) и фитированные спектры АСП (пунктир)

За счёт того, что исследуемые параметры ионосферной плазмы меняются с высотой достаточно медленно, мы можем при расчёте спектральной плотности задавать высотные профили  $N_e$ ,  $T_e$ ,  $T_i$ ,  $V_d$ ,  $m_i$  виде сплайн-функций с ограниченным числом узлов.

В реализованном методе АСП значения сплайнов в этих узлах как раз и являются переменными, по которым проводится минимизация функционала невязки. В разработанном алгоритме используется 15 узлов кубического В-сплайна для каждой функции. В задаче фитируется также уровень фонового сигнала, который меняется с высотой, и используется дополнительный параметр калибровки шума в канале фарадеевских измерений относительно канала спектральных измерений. Общее число фитируемых параметров составляет 91. Увеличение количества узлов сплайна выше 15 нецелесообразно и приводит только к увеличению времени обработки.

Использование АСП в задаче фитирования полного профиля позволило получить беспрецедентную точность при тестовой обработке данных для 2000 г. На рис. 2 представлен график восьми измеренных спектров ИРНР (сплошные линии) и подобранные в результате работы АСП теоретические спектры (пунктир). Для наглядности каждый следующий спектр смещён вверх и вправо на частоту 1 кГц. Видно, что АСП почти идеально вписывает теоретический спектр (пунктир) в измеренный (сплошные линии). При нормировании всех восьми спектров на 100 % их общая невязка часто составляет менее 0,5 %.

На рис. 3 представлен измеренный профиль полной мощности сигнала ИРНР (сплошная линия) и фитированный теоретический профиль АСП. Типичные значения невязки при фитировании полного профиля мощности составляют ~1–2 %. Отметим, что ранее при фитировании данных ИРНР с использованием старого уравнения радиолокации показатели невязки в 5 % и выше считались вполне приемлемым результатом. Такая высокая точность фитирования АСП позволила значительно повысить точность восстановления параметров ионосферной плазмы.

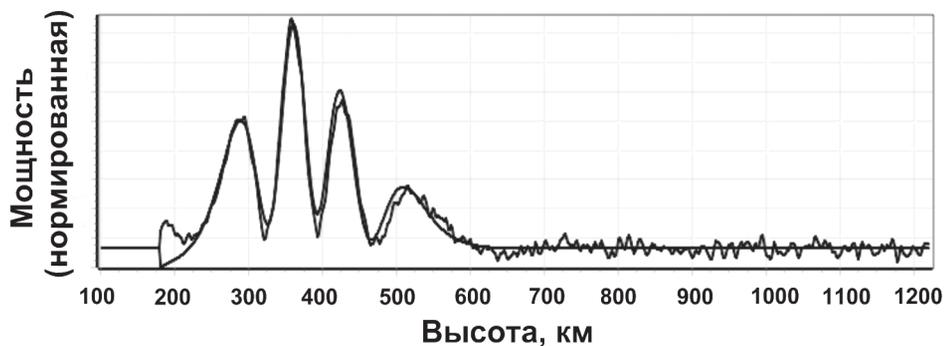


Рис. 3. Реальный профиль мощности ИРНР (ломаная кривая) и фитированный АСП (плавная кривая)

На рис. 4 (см. с. 285) приведён восстановленный профиль электронной плотности для 12 мая 2000 г., полученный в результате работы новой программы обработки (верхняя панель) в сравнении со старой методикой (нижняя панель). Качественное улучшение является очевидным результатом. При использовании предшествующих методов обработки мелкомасштабные вариации были за гранью шумов эксперимента.

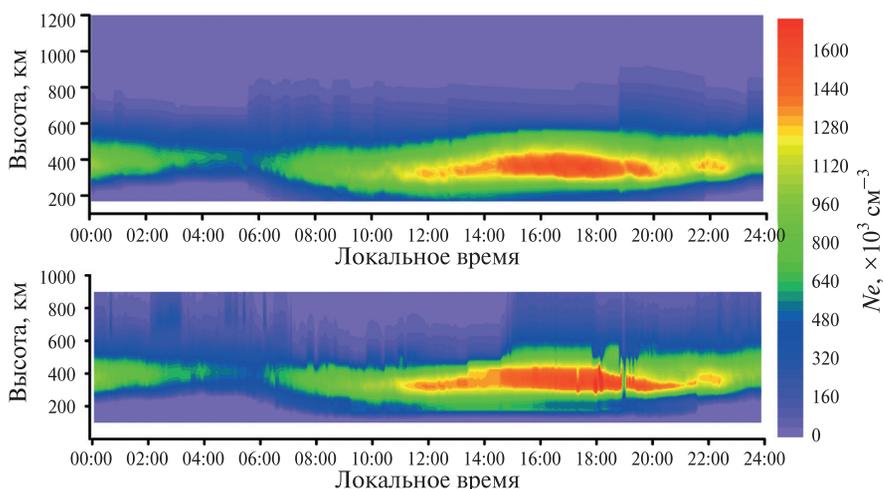


Рис. 4. Профиль электронной концентрации для 12 мая 2000 г., фитированный новым АСП (верхняя панель) и полученный по старой методике обработки (нижняя панель)

Весьма неожиданный результат был получен при восстановлении значений скорости дрейфа ионосферной плазмы вдоль луча зрения радара. Из рис. 1 видно, что полный профиль спектральной плотности имеет асимметрию, причём с разным знаком по высоте. В классической теории НР сдвиг спектра по частоте однозначно интерпретируется как доплеровское смещение в результате движения полного объёма ионосферной плазмы. Именно такая интерпретация скорости дрейфа применяется для данных радара Миллстоун-Хилл (Liu et al., 2007), на основе которых проведена климатология этого параметра. Аналогичные результаты получены в работе (Scherbakov et al., 2009) для ИРНР. Однако, как видно на рис. 1, к искажению спектров может приводить не только доплеровское смещение, но и учёт эффекта рефракции. По всей видимости, ранее однозначная интерпретация таких искажений, как доплеровский сдвиг плазмы, приводила к неверным расчётам скорости дрейфа.

При использовании нового радиолокационного уравнения с рефракционной поправкой было обнаружено, что смена знака скорости дрейфа по высоте отсутствует и скорость дрейфа лишь незначительно изменяется по величине на протяжении всего высотного интервала измерений. Поскольку измерения на ИРНР в рассматриваемые годы проводились практически вдоль силовой трубки геомагнитного поля, то полученный результат выглядит вполне правдоподобным. Плазма на указанных высотах является замагниченной, и у неё нет причин двигаться внутри одной силовой трубки в разных направлениях. Именно такое однонаправленное движение вдоль силовых трубок следует из теоретических самосогласованных моделей ионосферы и плазмосферы (Тащилин, Романова, 2014; Webb, Essex, 2001). В связи с этим обнаруженным фактом возникает необходимость более детального исследования движения плазмы и связанного с ним термосферного нейтрального ветра. На рис. 5 приведён профиль скорости дрейфа плазмы, полученный в результате работы новой методики на основе АСП. Видно, что скорость дрейфа практически не изменяется с высотой. Отрицательные значения скорости соответствуют термосферному меридиональному нейтральному ветру, направленному на север, а положительные — направленному на юг.

Ещё одним перспективным направлением в развитии метода НР является определение химического состава ионосферной плазмы. В работе (Shpynev, 2017) было предложено использовать новое выражение для связи полного профиля мощности радара с электронной концентрацией:

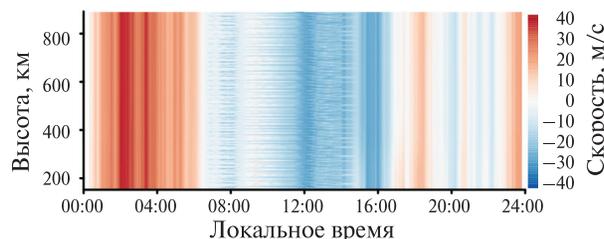


Рис. 5. Скорость дрейфа плазмы для 16 марта 2000 г., полученная с использованием АСП

$$\rho_0(r) = N_e \left( 1 + e^{-\frac{m_e T_i}{m_i T_e}} \sqrt{\frac{m_e T_e^3}{m_i T_i^3}} \right) \quad (2)$$

В этом выражении  $N_e$ , кроме традиционной зависимости от температуры, имеет зависимость от массы электронов и ионов. Это свойство было положено в основу определения химического состава ионосферной плазмы и реализовано в новом методе фитирования на основе АСП.

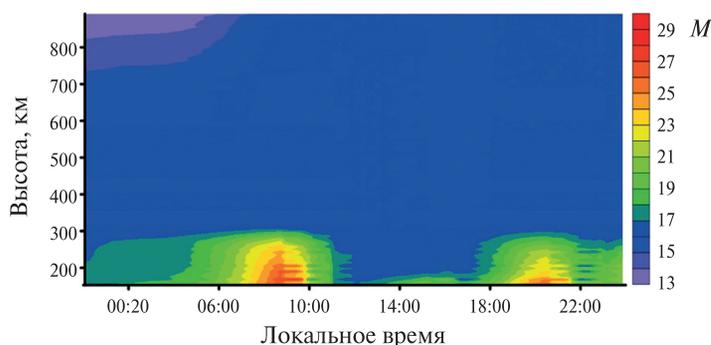


Рис. 6. Высотный профиль молекулярной массы ионосферной плазмы для 17 марта 2000 г.

На рис. 6 приведён профиль молекулярной массы ( $M$ ) ионосферной плазмы, состоящей из смеси различных ионов, полученный в результате работы АСП 17 марта 2000 г. Значение  $M = 16$  (синий цвет на графике) соответствует случаю, когда ионосферная плазма состоит исключительно из ионов кислорода  $O^+$ . Увеличение или уменьшение молекулярной массы указывает на присутствие тяжёлых ( $NO^+$ ,  $N_2^+$ ) и лёгких ( $H^+$ ,  $He^+$ ) ионов соответственно. Из рис. 6 видно, что концентрация тяжёлых ионов повышается во время прохождения солнечного терминатора. В ночное время на больших высотах (выше 600 км) видна область уменьшения молекулярной массы, что говорит о присутствии лёгких ионов водорода и гелия. Такой метод определения химического состава является перспективным и позволит значительно улучшить диагностические характеристики ИРНР, так как ранее процентный состав тяжёлых ионов в нижней ионосфере не измерялся в принципе, а для определения концентрации лёгких ионов приходилось привлекать дополнительные данные полного электронного содержания по измерениям приёмников GPS (Хабитуев, Шпынев, 2014).

### Выводы

В работе была протестирована новая методика определения ионосферных параметров по данным иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР), реализованная на основе адаптивного симплекс-процессора (АСП) с использованием нового радиолокационного уравнения. Показано, что новый метод АСП имеет очень высокую, ранее недостижимую точность при фитировании спектральных профилей, а также полного профиля мощности ИРНР. Низкое время обработки в дальнейшем позволит применять метод АСП для обработки данных в реальном времени. В результате учёта рефракции в новом радиолокационном уравнении улучшена точность восстановления профиля электронной концентрации, на котором стали различимы мелкомасштабные неоднородности. Получены принципиально новые характеристики движения ионосферной плазмы в поле зрения радара, которые кардинально отличаются от всех ранее получаемых оценок скорости дрейфа на ИРНР. В результате использования нового выражения для связи профиля мощности и электронной плотности получены новые оценки химического состава ионосферной плазмы. Дальнейшее применение

фитирования базы данных ИРНР на основе нового АСП видится перспективным и многообещающим исследованием, так как позволит, с одной стороны, улучшить и более тщательно настроить работу АСП, а с другой — получить новые данные об ионосфере сибирского региона с повышенной точностью.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-35-00130 мол\_а). Методы программной обработки данных получены в рамках базового финансирования программ фундаментальных научных исследований ФНИ П.12 и П.16. Экспериментальные данные получены частично с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» (ИСЗФ СО РАН).

## Литература

1. Жеребцов Г. А., Заворин А. В., Медведев А. В., Носов В. Е., Потехин А. П., Шпынев Б. Г. Иркутский радар некогерентного рассеяния // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 11. С. 1339–1345.
2. Медведев А. В., Заворин А. В., Кушнарев Д. С., Шпынев Б. Г. Модернизация аппаратно-программного комплекса Иркутского радара НР. Основные элементы новой, многоканальной системы регистрации // Солнечно-земная физика. 2004. Т. 5. С. 107–110.
3. Потехин А. П., Медведев А. В., Заворин А. В., Кушнарев Д. С., Лебедев В. П., Лепетаев В. В., Шпынев Б. Г. Цифровые системы регистрации и управления Иркутского радара некогерентного рассеяния // Солнечно-земная физика. 2008. Т. 11. С. 77–86.
4. Тащилин А. В., Романова Е. Б. Моделирование свойств плазмосферы при спокойных и возмущенных условиях // Геомагнетизм и аэронавигация. 2014. Т. 54. № 1. С. 1–10.
5. Хабитуев Д. С., Шпынев Б. Г. Вариации высоты перехода  $O^+/H^+$  над Восточной Сибирью по данным Иркутского радара НР и ПЭС GPS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 107–117.
6. Шпынев Б. Г., Воронов А. Л. Минимизация нелинейного функционала невязки в задачах потоковой обработки экспериментальных данных // Вычислительные методы и программирование. 2013. Т. 14. С. 503–515.
7. Farley D. T. A theory of incoherent scattering of radio waves by a plasma. The effect of unequal ion and electron temperatures // J. Geophysical Research. 1966. V. 71. P. 4091–4098.
8. Farley D. T. Incoherent scatter correlation function measurement // Radio Science. 1969. V. 4. P. 935–953.
9. Farley D. T. Multiple-pulse incoherent-scatter correlation function measurements // Radio Science. 1972. V. 7. P. 661–666.
10. Holt J. M., Rhoda D. A., Tetenbaum D., Van Eyken A. P. Optimal Analysis of Incoherent Scatter Radar Data // Radio Science. 1992. V. 27. P. 435–447.
11. Kudeki E., Woodman R. F., Feng Z. Incoherent scatter radar plasma density measurements at Jicamarca using a transverse-mode differential-phase method // Geophysical Research Letters. 2003. V. 30. P. 1255.
12. Liu L., Wan W., Zhang M.-L., Ning B., Zhang S.-R., Holt J. M. Variations of topside ionospheric scale heights over Millstone Hill during the 30-day incoherent scatter radar experiment // Annales Geophysicae. 2007. V. 25. P. 2019–2027.
13. Potekhin A. P., Berngardt O. I. Radar equations in the radio wave backscattering problem // Radiophysics and Quantum electronics. 2000. V. 43. P. 484–492.
14. Scherbakov A. A., Medvedev A. V., Kushnarev D. S. Correlation method for determining the ionospheric plasma drift velocity at the Irkutsk incoherent scattering radar // Geomagnetism and Aeronomy. 2009. V. 49. P. 1028–1033.
15. Shpynev B. G. Incoherent scatter Faraday rotation measurements on a radar with single linear polarization // Radio Science. 2004. V. 3. DOI: 10.1029/2001RS002523.
16. Shpynev B. G. Refraction and Faraday rotation in incoherent scattering radar technique // Radio Science. 2017. V. 52. P. 1067–1080.
17. Webb P. A., Essex E. A. A dynamic diffusive equilibrium model of the ion densities along plasmaspheric magnetic flux tubes // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2001. V. 63. P. 1249–1260.
18. Woodman R. F., Hagfors T. Method for the measurement of vertical ionospheric motion near magnetic equator by incoherent scattering // J. Geophysical Research. 1969. V. 74. P. 1205–1212.

## Ionosphere parameters determination using the new processing technique for the Irkutsk incoherent scatter radar

D. S. Khabituev, B. G. Shpynev, A. G. Setov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk 664033, Russia*

*E-mail: Khabituev@iszf.irk.ru*

The work is devoted to the description of a new technique for secondary processing of the Irkutsk incoherent scatter radar (IISR) data. The new processing technique includes a set of software that conduct multi-parameter full-profile fitting from primary Irkutsk radar data. The adaptive simplex processor (ASP) is used as the core of the new processing software program. ASP is a set of software algorithms based on genetic sorting technology. The ASP significantly improves the retrieval accuracy of ionospheric parameters: electron density, electron and ion temperatures, plasma drift velocity, plasma ion composition. In addition, a modified radar equation is used in the new processing technique. The modified radar equation takes into account the refraction of the electromagnetic wave of the probing radar signal during its passage through the ionosphere. Despite the large number of starting variables and a large amount of computation, due to ASP we managed to keep the computational speed of the new technique at a low level. The testing of the new technique was conducted on the Irkutsk radar data for 2000. The results show an unprecedented accuracy of fitting the starting power profiles and spectrum of the Irkutsk radar. New estimates of the plasma drift velocity along the radar vision line in which almost no dependence on height are obtained. Also, new data of the relative ion composition with the presence of heavy ions in the lower ionosphere and light ions in the topside ionosphere are obtained.

**Keywords:** ionosphere, incoherent scatter

Accepted: 01.07.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-282-289

### References

1. Zherebtsov G. A., Zavorin A. V., Medvedev A. V., Nosov V. E., Potekhin A. P., Shpynev B. G., Irkutskii radar nekogerentnogo rasseyaniya (The Irkutsk incoherent scatter radar), *Radiotekhnika i elektronika*, 2002, Vol. 47, No. 11, pp. 1339–1345.
2. Medvedev A. V., Zavorin A. V., Kushnarev D. S., Shpynev B. G., Modernizatsiya apparatno-programmnogo kompleksa Irkutskogo radara NR. Osnovnye elementy novoi, mnogokanal'noi sistemy registratsii (The software complex modernization for Irkutsk scatter incoherent radar. The main elements of the new multi-channel registration system), *Solnechno-zemnaya fizika*, 2004, Vol. 5, pp. 107–110.
3. Potekhin A. P., Medvedev A. V., Zavorin A. V., Kushnarev D. S., Lebedev V. P., Lepetaev V. V., Shpynev B. G., Tsifrovye sistemy registratsii i upravleniya Irkutskogo radara nekogerentnogo rasseyaniya (Digital registration and control systems for the Irkutsk incoherent scatter radar), *Solnechno-zemnaya fizika*, 2008, Vol. 11, pp. 77–86.
4. Tashchilin A. V., Romanova E. B., Modelirovanie svoistv plazmosfery pri spokoinykh i vozmushchennykh usloviyakh (Simulating of plasmasphere properties under quiet and disturbed conditions), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 2014, Vol. 54, No. 1, pp. 1–10.
5. Khabituev D. S., Shpynev B. G., Variatsii vysoty perekhoda O<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> nad Vostochnoi Sibir'yu po dannym Irkutskogo radara NR i PES GPS (Variations of the O<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> transition height over Eastern Siberia according to the Irkutsk incoherent scatter radar data and TEC GPS data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 107–117.
6. Shpynev B. G., Voronov A. L., Minimizatsiya nelineinogo funktsionala nevyazki v zadachakh potokovoi obrabotki eksperimental'nykh dannykh (Minimization of the nonlinear residual functional in problems of stream processing of experimental data), *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye*, 2013, Vol. 14, pp. 503–515.
7. Farley D. T., A theory of incoherent scattering of radio waves by a plasma. The effect of unequal ion and electron temperatures, *J. Geophysical Research*, 1966, Vol. 71, pp. 4091–4098.
8. Farley D. T., Incoherent scatter correlation function measurement, *Radio Science*, 1969, Vol. 4, Issue 10, pp. 935–953.

9. Farley D. T., Multiple-pulse incoherent-scatter correlation function measurements, *Radio Science*, 1972, Vol. 7, pp. 661–666.
10. Holt J. M., Rhoda D. A., Tetenbaum D., Van Eyken A. P., Optimal Analysis of Incoherent Scatter Radar Data, *Radio Science*, 1992, Vol. 27, pp. 435–447.
11. Kudeki E., Woodman R. F., Feng Z., Incoherent scatter radar plasma density measurements at Jicamarca using a transverse-mode differential-phase method, *Geophysical Research Letters*, 2003, Vol. 30, p. 1255.
12. Liu L., Wan W., Zhang M.-L., Ning B., Zhang S.-R., Holt J. M., Variations of topside ionospheric scale heights over Millstone Hill during the 30-day incoherent scatter radar experiment, *Annales Geophysicae*, 2007, Vol. 25, pp. 2019–2027.
13. Potekhin A. P., Bergardt O. I., Radar equations in the radio wave backscattering problem, *Radiophysics and Quantum electronics*, 2000, Vol. 43, pp. 484–492.
14. Scherbakov A. A., Medvedev A. V., Kushnarev D. S., Correlation method for determining the ionospheric plasma drift velocity at the Irkutsk incoherent scattering radar, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2009, Vol. 49, pp. 1028–1033.
15. Shpynev B. G., Incoherent scatter Faraday rotation measurements on a radar with single linear polarization, *Radio Science*, 2004, Vol. 3, Issue 3, DOI: 10.1029/2001RS002523.
16. Shpynev B. G., Refraction and Faraday rotation in incoherent scattering radar technique, *Radio Science*, 2017, Vol. 52, pp. 1067–1080.
17. Webb P. A., Essex E. A., A dynamic diffusive equilibrium model of the ion densities along plasmaspheric magnetic flux tubes, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, Vol. 63, pp. 1249–1260.
18. Woodman R. F., Hagfors T., Method for the measurement of vertical ionospheric motion near magnetic equator by incoherent scattering, *J. Geophysical Research*, 1969, Vol. 74, pp. 1205–1212.