

УДК 550.388.2

## МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ ПО ДАННЫМ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

А.Г. Ким, Г.В. Котович, К.Г. Ратовский

## TECHNIQUE FOR REAL-TIME RECONSTRUCTION OF IONOSPHERIC PARAMETERS USING OBLIQUE INCIDENCE DATA

A.G. Kim, G.V. Kotovich, K.G. Ratovsky

Для создания систем диагностики и мониторинга ионосферы в реальном времени необходимы быстрые алгоритмы и оперативные методики. В качестве одной из таких методик может использоваться предлагаемая методика оперативного восстановления параметров среды по ионограммам наклонного зондирования ионосферы. Точность данной методики была численно и экспериментально проверена на трассах различной протяженности и ориентации. Для экспериментальной проверки использовались данные российской сети ЛЧМ-ионозондов, полученные в течение длительных наблюдений в разные сезоны года и в условиях различной геомагнитной возмущенности.

Construction of real-time systems for ionospheric diagnostics and monitoring asks for fast algorithms and operative techniques. The proposed operative technique for ionospheric parameters reconstruction from oblique incidence ionograms can be used to reach a decision of such problems. The accuracy of our technique was checked computationally and by experiment on radio paths with different lengths and orientations. Russian FMCW-ionosondes network data obtained during long-term observations (during the different seasons and with different geomagnetic conditions) were used for the experimental check.

Наклонное зондирование (НЗ) ионосферы позволяет получать информацию о среде вдоль трассы распространения (до высоты максимума электронной концентрации), но только в случае успешного решения обратной задачи. Помимо пересчета ионограмм НЗ в непосредственный профиль истинных высот электронной плотности, существуют методы, позволяющие пересчитывать данные НЗ, полученные на некоторой трассе, в эффективную ионограмму вертикального зондирования (ВЗ), соответствующую средней точке трассы. Полученная при этом высотнo-частотная характеристика (ВЧХ) может быть использована для восстановления  $N(h)$ -профиля ионосферы (до высоты максимума электронной концентрации слоя F2) различными существующими методами реконструирования  $N(h)$ -профиля из ВЧХ.

Один из ранних методов конвертирования ионограмм НЗ в эквивалентную ионограмму ВЗ [Gething, Maliphant, 1967] основан на использовании теоремы эквивалентности [Martyn, 1935], но этот способ применим только для коротких трасс, так как теорема Мартина предполагает, что Земля и ионосфера плоские. В статьях [Крашенинников и др., 1981; Котович, 1995] были учтены эффекты кривизны, которые возникают при работе с трассами НЗ протяженностью 500 км. В этих работах получили развитие методики обращения измеренной дистанционно-частотной характеристики (ДЧХ) в ВЧХ с использованием модификации метода Смита (предложенной в [Кияновский, 1971] и апробированной на прямых задачах пересчета ВЧХ средней точки в ДЧХ), известного также как метод кривых передачи [Smith, 1939]. При этом используется алгоритм пересчета ДЧХ в ВЧХ для случая односкачкового распространения в сферически-слоистой изотропной ионосфере без учета геомагнитного поля и горизонтальных градиентов электронной концентрации.

Имея в наличии зависимости абсолютного времени распространения или группового пути от частоты НЗ (то есть ДЧХ), возможно получить ВЧХ в средней точке радиотрассы, а следовательно, и кри-

тическую частоту слоя F2 для этой точки. В работе [Котович, 1995] было предложено для наиболее быстрого определения параметра  $f_0F2$  фиксировать на ионограмме НЗ частоту и задержку самого крайнего отсчета верхнего луча мода 1F2, траектория которого перед отражением близка к лучу Педерсена, проходящему высоте максимума ионизации в окрестности средней точки трассы (рис. 1). Данная методика пересчета позволяет быстро определять значение  $f_0F2$  для средней точки трассы НЗ, достаточно проста, не требует сложных схем расчета, благодаря чему легко реализуется и обладает высокой скоростью вычислений (что, в свою очередь, позволяет использовать ее в расчетах в реальном масштабе времени).

Методика прошла проверку как численным моделированием, так и на экспериментальных данных (рис. 2). Численное моделирование [Котович др., 2006] показало, что относительная погрешность расчета  $f_0F2$  не превышает 5 % (при градиентных условиях). В результате экспериментальной проверки (на трассах различной протяженности и ориентации) средняя погрешность расчета  $f_0F2$  оказалась менее 10 % [Kim, Kotovich, 2006; Kim et al., 2007, 2008]. Также экспериментальная проверка показала, что данные ВЗ в Якутске, расположенном в 516 км ( $\sim 4^\circ$  по широте) от средней точки трассы Магадан–Торы, не могут служить контрольными для рассчитанных в средней точке трассы. Это было доказано путем сопоставления данных в Якутске и ВЗ в Алдане (станция была специально установлена на время эксперимента в 1989 г. в средней точке трассы Магадан–Торы).

Одна из возможных реализаций сети мониторинга ионосферы над территорией России представлена на рис. 3 и в таблице. Цифры на рис. 3 соответствуют номерам населенных пунктов в таблице (в скобках указаны географические широта и долгота). На рис. 3 места расположения приемников указаны плюсиками, передатчиков – крестиками, а средние точки односкачковых трасс (т. е. пригодных для восстановления  $N(h)$ -профиля) – кружками и ромбиками. Кружками обозначены «круглосуточные» средние

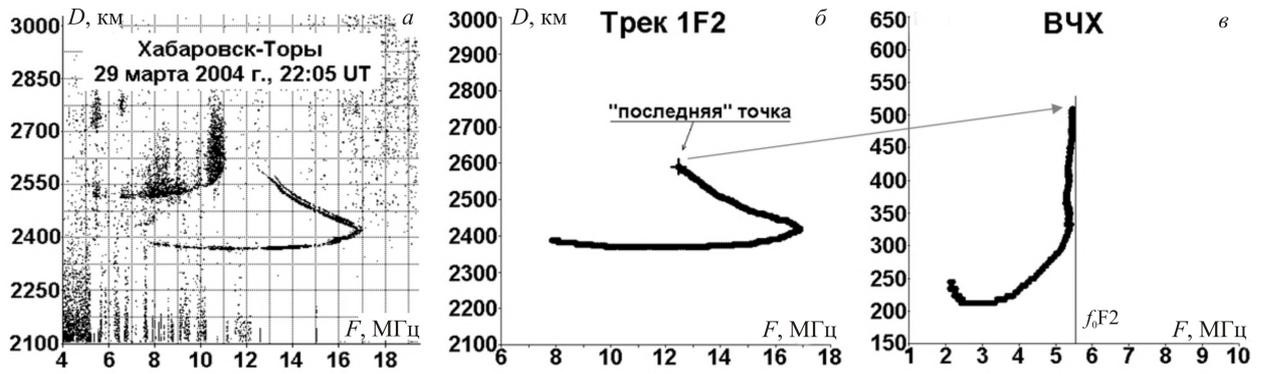


Рис. 1. Схема перехода от ионограммы НЗ к ВЧХ вблизи средней точки трассы.

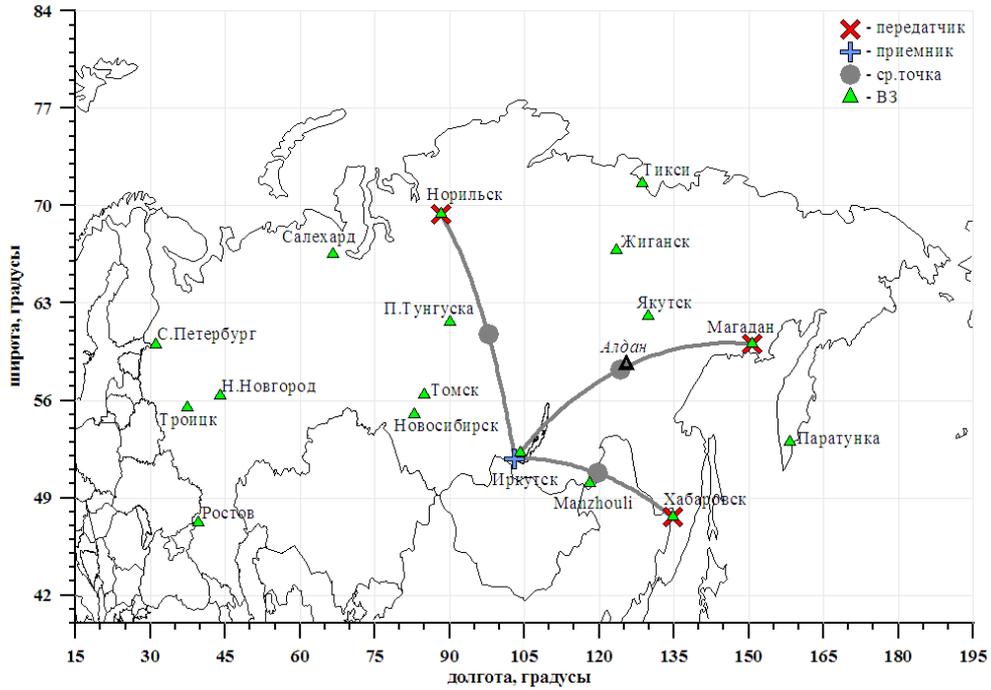


Рис. 2. Карта действующих ионозондов ВЗ и трасс НЗ, для которых проводилась экспериментальная проверка методики (ионосферная станция в Алдане работала в 1989 г.).

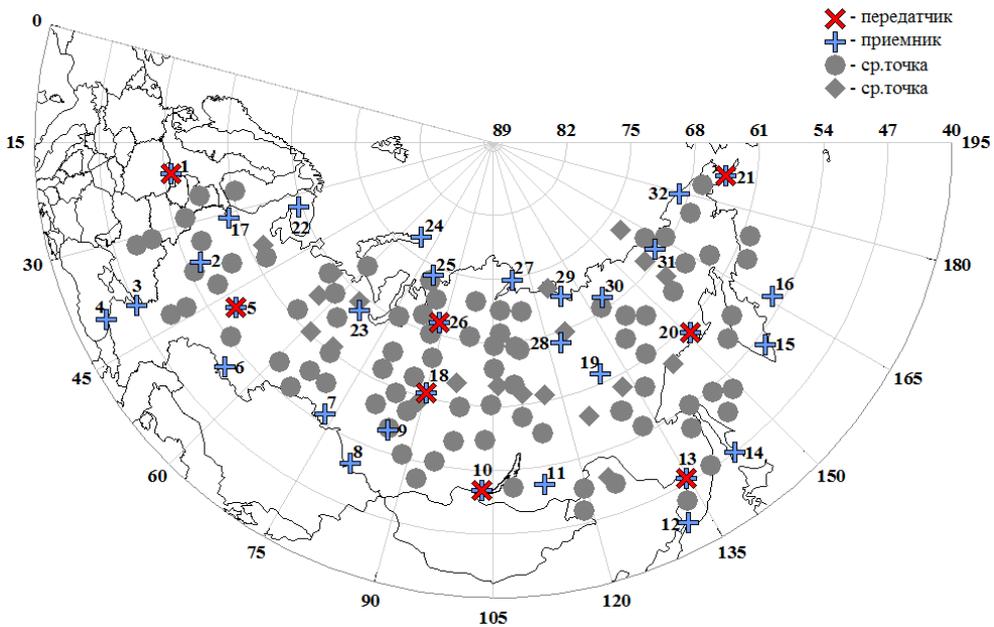


Рис. 3. Проект сети мониторинга ионосферы над территорией Российской Федерации.

Долготный диапазон	Широтный диапазон <57° (средние широты)	Широтный диапазон 57–64° (субавроральные)	Широтный диапазон >64° (авроральные)
15–30°	1. Калининград (54.7, 20.5)		
30–45°	2. <b>Троицк (55.5, 37.3)</b> 3. <b>Ростов-на-Дону (47.2, 39.7)</b> 4. <b>Сочи (43.6, 39.7)</b>	17. Санкт-Петербург (60, 31)	22. <b>Апатиты (67.6, 33.4)</b>
45–60°	5. Йошкар-Ола (56.6, 47.9) 6. <b>Оренбург (51.8, 55.1)</b>		
60–75°	7. <b>Омск (55, 73.4)</b>		23. <b>Салехард (66.5, 66.6)</b> 24. м. Желания (77, 68)
75–90°	8. <b>Рубцовск (51.5, 81.2)</b> 9. <b>Томск (56.4, 85)</b>		25. Диксон (74, 81) 26. <b>Норильск (69.4, 88.4)</b>
90–105°	10. <b>Иркутск (52.2, 104.3)</b>	18. <b>Подкаменная Тунгуска (61.6, 90.1)</b>	
105–120°	11. <b>Чита (52, 113.5)</b>		27. о. Преображения (74.7, 112.9)
120–135°	12. <b>Владивосток (43.1, 132)</b> 13. <b>Хабаровск (47.6, 134.7)</b>	19. <b>Якутск (62, 129.7)</b>	28. <b>Жиганск (66.8, 123.4)</b> 29. <b>Тикси (71.6, 128.6)</b>
135–150°	14. Южно-Сахалинск (47, 142.7)		30. <b>Депутатский (69.3, 140)</b>
150–165°	15. <b>Паратунка (53, 158.3)</b>	20. <b>Магадан (60.1, 150.7)</b>	31. <b>Черский (68.8, 161.3)</b>
165–180°	16. о. Беринга (55.2, 166)		32. м. Шмидта (69, 179.5)
180–195°		21 б. Провидения (64.4, 186.8)	
Обозначения: действующие цифровые ионозонды ВЗ; действующие аналоговые ионозонды ВЗ; когда-либо действовавшие ионозонды; населенные пункты, где могут быть размещены новые ионозонды.			

точки (для трасс длиной до 2500 км, на которых работают способы односкачкового распространения как верхним, так и нижним лучом в течение суток). Ромбиками обозначены «дневные» средние точки (для трасс длиной от 2500 до 3100 км, на которых ночью может действовать механизм односкачкового распространения только верхним лучом, что делает невозможным корректное восстановление  $N(h)$ -профиля для области средней точки трассы). При этом подразумевается, что приемники – это полноценные ионозонды ВЗ, способные также принимать сигналы НЗ, а передатчики способны излучать во всех направлениях.

Из рис. 3 и таблицы видно, что предложенная схема обеспечивает необходимую пространственную полноту данных в долготном секторе 20–190° в трех широтных поясах: среднеширотном (<57°), субавроральном (57–64°) и авроральном (>64°), что может быть использовано для мониторинга динамики неоднородной структуры ионосферы, вызванной естественными или искусственными воздействиями, в результате которых могут наблюдаться такие явления, как полное поглощение радиоволн и сильное возмущение электронной концентрации (более 50 % относительно прогнозного значения). Предложенная схема сети ионосферного мониторинга обеспечит необходимую пространственную локализацию явления и отслеживание динамики его распространения в различные регионы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 11-05-00698) и при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт 14.740.11.0078 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы»).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кияновский М.П. Программа расчетов на ЭВМ по модифицированному методу кривых передач // Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн. М.: Наука, 1971. С. 287–298.

Котович Г.В. Анализ параметров ионосферы  $f_0F_2$ ,  $h_mF_2$  в средней точке трассы по экспериментальным ионограммам НЗ и ВНЗ // Радиофизика и электроника: проблемы науки и обучения: Материалы региональной научной конференции, посвященной 100-летию изобретения радио. Иркутск, 1995. С. 40–44.

Котович Г.В., Ким А.Г., Михайлов С.Я. и др. Определенные критической частоты  $f_0F_2$  в средней точке трассы по данным наклонного зондирования на основе метода Смита // Геомагнетизм и аэронавигация. 2006. Т. 46, № 4. С. 547–551.

Крашенинников И.В., Лянной Б.Е., Снеговой А.А. Оперативный алгоритм пересчета ионограммы наклонного зондирования ионосферы в эффективную ионограмму вертикального зондирования // Дифракционные эффекты коротких радиоволн. М.: ИЗМИРАН, 1981. С. 117–122.

Gething P.J.D., Maliphant R.G. Unz's application of Schlomilch's integral equation to oblique incidence observations // J. Atm. Terr. Phys. 1967. V. 29. P. 599–600.

Kim A.G., Kotovich G.V. Estimation of critical frequency and height maximum for path midpoint on evidence derived from experimental oblique sounding data: comparison of calculated values with experimental and IRI values // Proc. SPIE. 2006. V. 6522. P. 65222H.

Kim A.G., Kotovich G.V., Grozov V.P., Ratovskiy C.G. Comparison of ionosphere parameters  $f_0F_2$  and  $h_mF_2$  obtained from vertical sounding, oblique sounding and IRI data // Proc. of 30<sup>th</sup> Apatity Seminar "Physics of Auroral Phenomena". Apatity, 2007. P. 163–166.

Kim A.G., Kotovich G.V., Grozov V.P., Ratovskii C.G. Experimental check of technique for calculation of critical frequency and peak height values from oblique sounding data // Proc. SPIE. 2008. V. 6936. P. 69361M.

Martyn D.F. The propagation of medium radio waves in the ionosphere // Proc. Phys. Soc. 1935. V. 47. P. 323–339.

Smith N. The relation of radio sky-wave transmission to ionospheric measurements // Proc. IRE. 1939. V. 27, N 5. P. 332–347.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск