

**Работы ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по радиопросвечиванию ионосферы Земли сигналами навигационных спутниковых систем**

В. М. Смирнов, Е. В. Смирнова

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники РАН, пл.Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация*  
Email: [vsmirnov@ire.rssi.ru](mailto:vsmirnov@ire.rssi.ru)

*Выполнен краткий обзор результатов работ, выполненных в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по радиопросвечиванию ионосферы земли сигналами навигационных спутниковых систем. Показаны возможности метода радиопросвечивания ионосферы Земли сигналами этих систем и приведены результаты его применения при определении параметров ионосферы в период воздействия на неё факторов естественного и искусственного происхождения.*  
*Ключевые слова: ионосфера, радиопросвечивание, навигационные спутниковые системы, мониторинг.*

**Works of the V.A. Kotelnikov IRE of the Russian Academy of Sciences on radio illumination of the Earth's ionosphere by signals from navigation satellite systems**

V.M. Smirnov, E.V. Smirnova

*V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Fryazino, Russia,*

*A brief review of the work results performed at the V.A. Kotelnikov IRE of the Russian Academy of Sciences on radiotranslucence of the Earth's ionosphere by signals from navigation satellite systems is performed. The possibilities of the radiotranslucence method of the Earth's ionosphere by signals from these systems are shown and the results of its application in determining the ionosphere parameters during the period of exposure to factors of natural and artificial origin are presented.*

**Введение**

Исследование физической природы, морфологии и динамических характеристик неоднородностей электронной концентрации является одной из ключевых задач физики ионосферы. Это вызвано не только чисто научным интересом к проблеме изучения атмосферы Земли как единой динамической системы, но и необходимостью решения ряда прикладных задач радиосвязи, радиолокации, радионавигации. Появление таких задач послужило стимулом как для развития существующих, так и для разработки новых эффективных методов изучения и мониторинга ионосферы Земли, одним из которых является радиопросвечивание сигналами спутниковых навигационных систем.

Измерения параметров этих сигналов в сочетании с методами математической обработки и моделирования нашли широкое применение в связи с внедрением в практику исследований современных вычислительных средств и экспериментальных исследований. Наличие штатных измерений радионавигационных параметров дает возможность использовать спутниковые радионавигационные системы как уже существующий, технически совершенный, надежный, широко распространенный и в этом смысле относительно дешевый инструмент получения диагностической информации об ионосфере Земли.

В настоящее время есть уникальные возможности использования для мониторинга ионосферных данных, получаемых при помощи приемников сигналов глобальных навигационных систем ГЛОНАСС, GPS, *BEIDOU* и *GALILEO* (рис.1) [1-3]. Одной из

возможностей расширения зоны действия ионозондов вертикального зондирования может быть использование данных этих систем. Внимание этим системам следует уделить не только благодаря высоким техническим характеристикам, но также в силу их применимости к решению обратных задач дистанционного зондирования ионосферы Земли на основе метода радиопросвечивания [4-5].

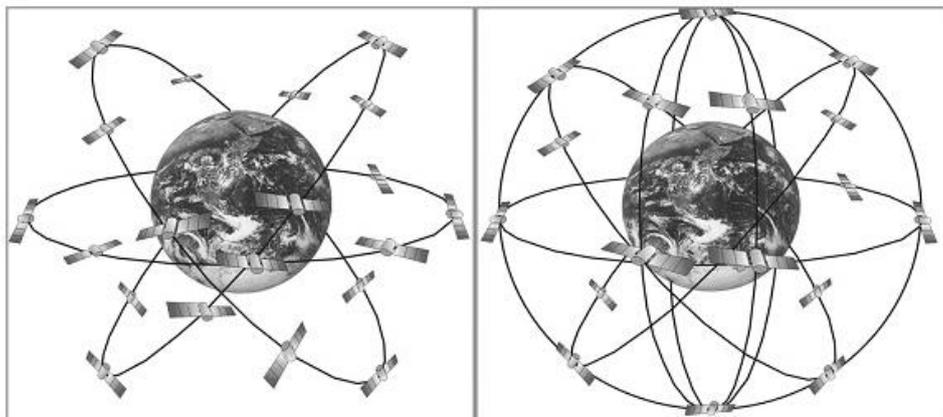


Рис.1. Космический сегмент навигационных систем ГЛОНАСС и GPS.

### Метод радиопросвечивания

Метод радиопросвечивания опирается на обращение приведенной разности фаз радиоволн и математически соответствует обращению интегрального уравнения первого рода. Практическая реализация метода основана на использовании измерений параметров радиосигналов на трассе “спутник - наземный пункт“ по наблюдениям с одного пункта [5]. В этом случае соответствующее интегральное уравнение первого рода не имеет аналитического обращения и требует разработки методов обращения в классе решения т.н. некорректных задач. Эти методы в настоящее время достаточно хорошо развиты в первую очередь благодаря трудам математической школы академика А.Н. Тихонова. В существенной мере они опираются на численные алгоритмы расчета и с учетом широкого распространения компьютерной техники могут быть применены для обращения измерений параметров радиосигналов.

Использование сигналов навигационных спутниковых систем дает возможность определять параметры ионосферы практически для любого региона поверхности Земли, поскольку зона действия одного приемника охватывает область, радиус которой может составлять более 1000 км [5].

Следует отметить, что при прогнозировании условий распространения важно знание не только значения критической частоты слоя  $F2$ , но и значения высотного профиля электронной концентрации с необходимым вдоль радиотрассы шагом. Разработанный метод радиопросвечивания позволяет определять текущее состояние ионосферы, близкое к реальному [6, 7]. Учитывая, что существующие модели ионосферы в среднем достаточно полно описывают её состояние, их можно использовать в качестве дополнительной априорной информации при реализации алгоритма решения обратной задачи определения высотного распределения электронной концентрации. В частности, при практической реализации алгоритма обращения может быть использована модель ионосферы, рекомендованная комитетом URSI в качестве стандарта [8]. Применение данной модели IRI (International Reference Ionosphere) при реализации алгоритма обращения не требует прогноза каких-либо параметров ионосферы.

Метод радиопросвечивания, позволяющий определять не только полное электронное содержание ионосферы вдоль трассы спутник-наземный пункт, но и высотное распределение электронной концентрации вдоль траектории подионосферной

точки для всех навигационных спутников, находящихся в зоне видимости, подробно изложен в работах [9-12].

### Практическое применение метода радиопросвечивания

Сигналы спутниковых навигационных систем, обеспечивающих глобальный мониторинг околоземного пространства, могут быть использованы как для регистрации прямого эффекта солнечных вспышек и возникающих при этом ионосферных бурь, так и для детального исследования внезапных ионосферных возмущений в зависимости от зенитного угла Солнца, типа ионизирующего излучения и географического расположения станций наблюдения.

Метод радиопросвечивания успешно используется для мониторинга состояния ионосферы при возникновении гелиофизических возмущений (солнечные вспышки и затмения) (рис.2) и импульсных воздействий (землетрясения, падение метеоритов, запуски космических кораблей и др.) (рис.3, 4) [13-15].

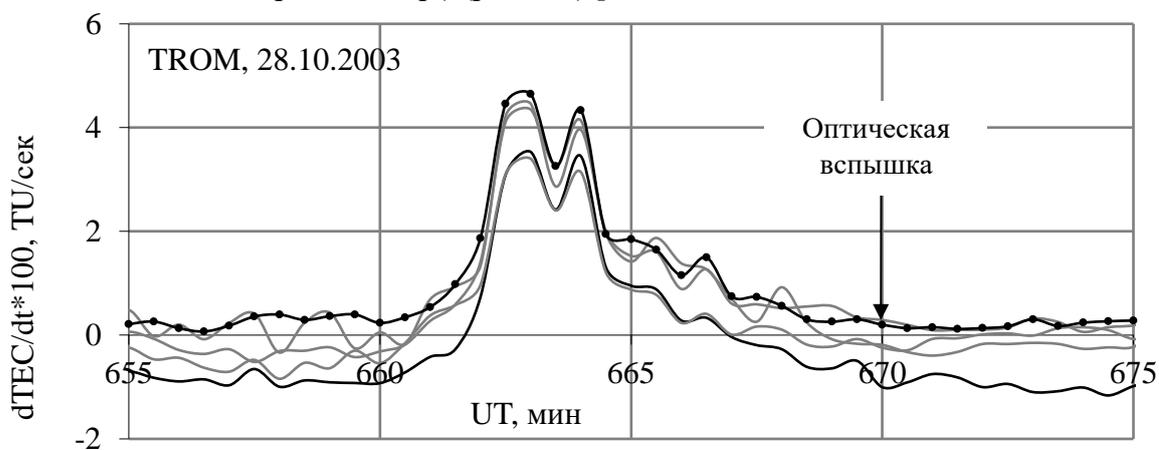


Рис. 2. Реакция ионосферы на прямой эффект солнечной вспышки [13].

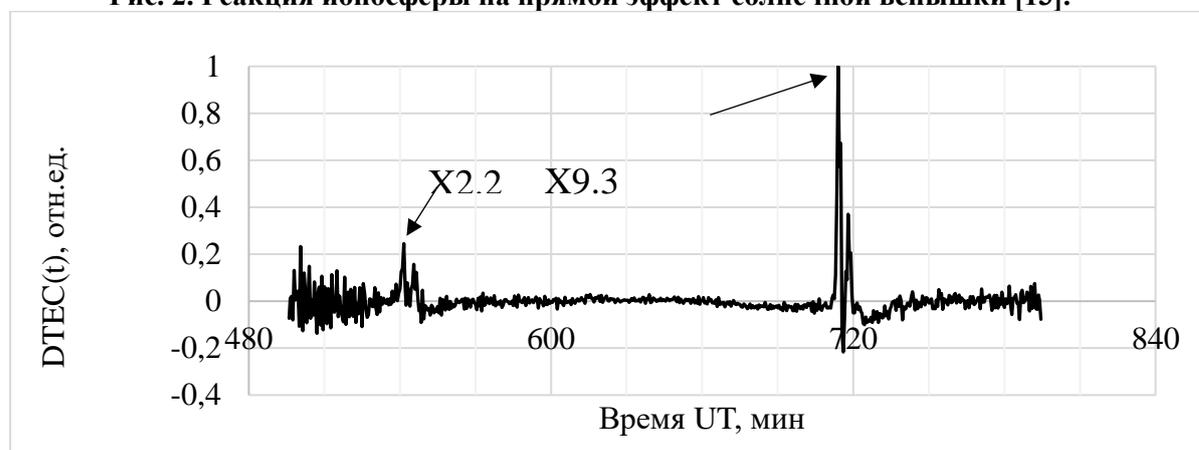


Рис. 3. Функции отклика ионосферы на воздействие солнечных вспышек.

Анализ формы отклика среднеширотной ионосферы на воздействие двух экстремальных солнечных вспышек, произошедших в максимуме 23 и минимуме 24 циклов солнечной активности в осенний период времени, при близких зенитных углах и положениях пятен на диске Солнца, был подробно изложен в работе [14].

Наличие двух максимумов в солнечных вспышках X2.2 и X9.3 6 сентября 2017 года может быть вызвано возникновением либо менее сильных вспышек, произошедших на их фоне и приводящих к их усилению, либо особенностью их генерации в период минимума солнечной активности.

Аппаратно-программная реализация метода радиопросвечивания ионосферы Земли, основанная на применении сигналов глобальных навигационных систем, дает возможность осуществлять непрерывный мониторинг околоземного пространства для определения источников техногенного происхождения по их импульсному воздействию на ионосферную плазму.

На рис. 4 представлены результаты обработки навигационных данных, полученных при запусках ракет с космодрома Байконур. Результаты обработки показали, что скорость распространения возникающих в ионосфере возмущений составляет 800-1000 м/с, что хорошо согласуется с известными из литературы данными. Возмущения в ионосфере время взрыва Челябинского суперболида представлены на рис. 5 [15]. Южноуральский метеороид, который упал в районе Челябинска 15 февраля 2013 г., несомненно является самым документированным в истории. Его прохождение через атмосферу зафиксировано видеозаписями, фотоснимками, визуальными наблюдениями, инфразвуковыми микрофонами и сейсмографами на земле и спутниками на орбите.

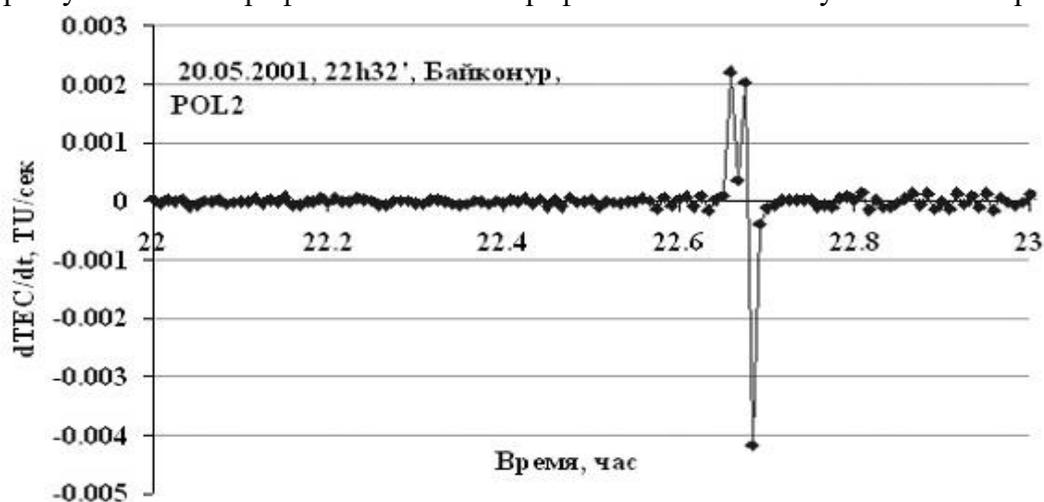


Рис. 4. Ионосферный отклик на запуск ракет с космодрома Байконур.

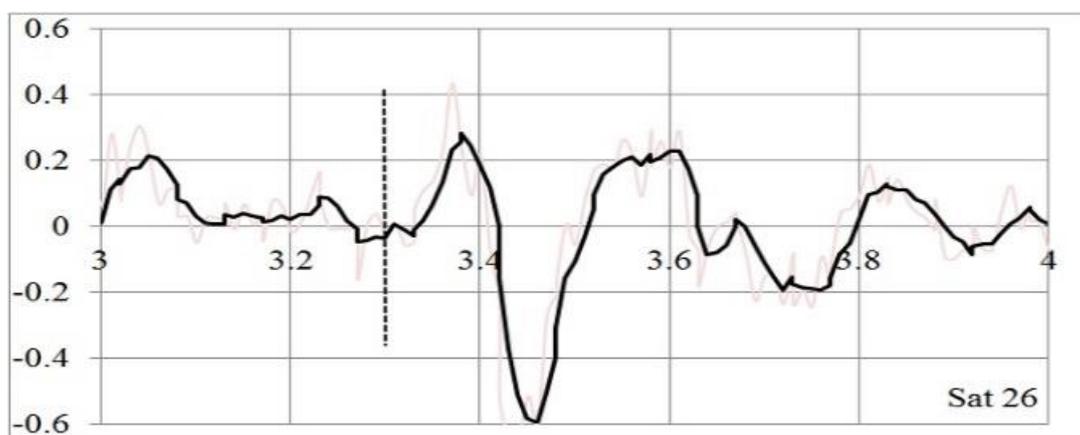
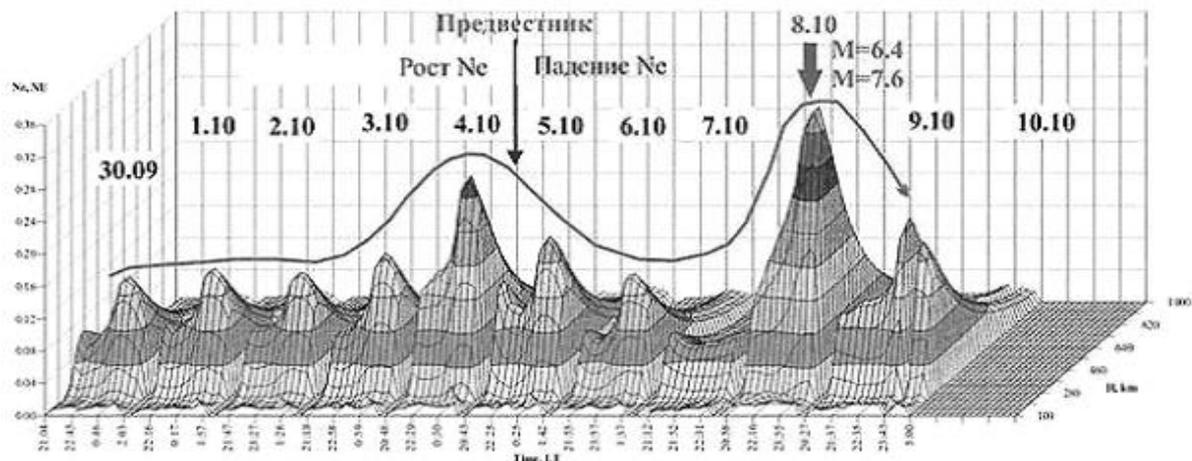


Рис. 5. Возмущение в ионосфере по радиопросвечиванию ее спутниками GPS во время взрыва Челябинского суперболида (штриховая линия - момент вспышки) [15].

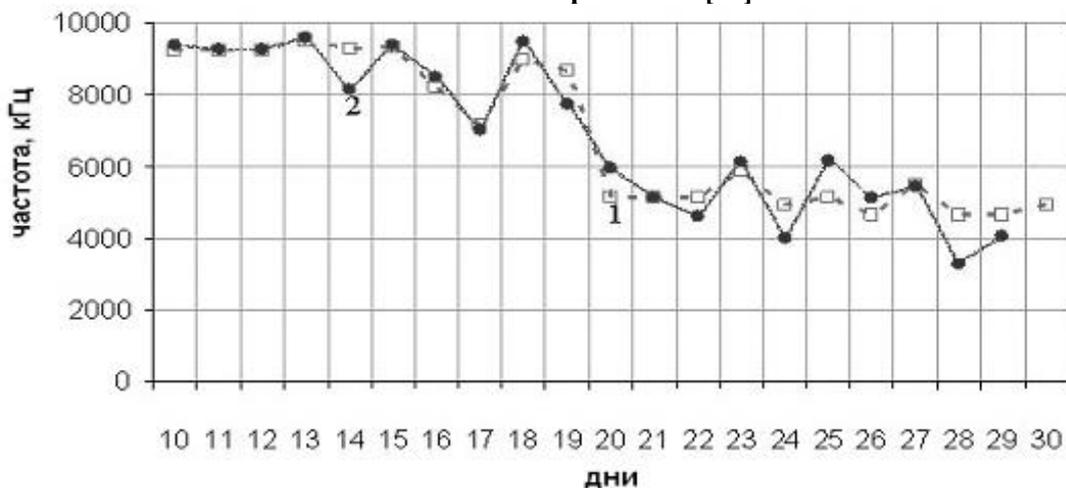
Важной задачей является мониторинг ионосферы над потенциально сейсмоопасными районами. Наблюдения показали, что в ионосфере над эпицентрами готовящихся землетрясений модифицируются спектры вариаций ряда ионосферных параметров [16-18] (рис.6).

Прогнозирование состояния ионосферы необходимо для систем радиосвязи и исследования ионосферного распространения радиоволн, для эффективного

функционирования спутниковых радиотехнических систем, в частности, навигационных систем космической навигации (рис.7) [19-20].



**Рис. 6. Реакция ионосферы в период подготовки и прохождения землетрясения в Пакистане 8 октября 2008 г. [17].**

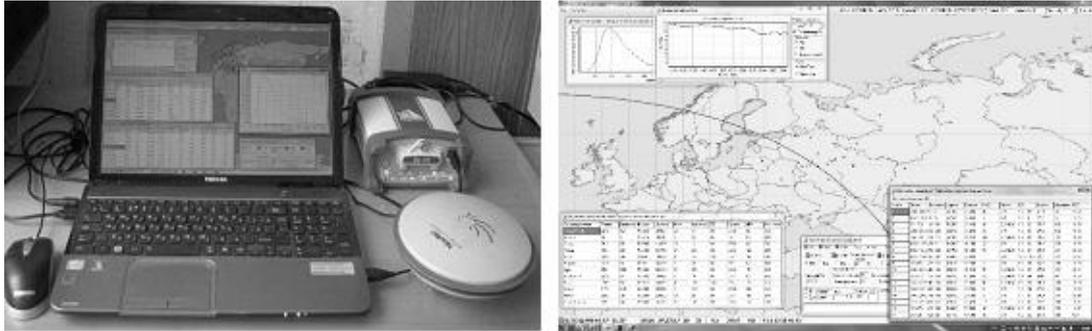


**Рис. 7. Сопоставление данных трассового зондирования (1) и метода радиопросвечивания (2) [19].**

Получение полной планетарной картины распределения основных параметров ионосферы требуется при проведении геофизических исследований, установлении механизма солнечно-земных связей, позволяющих создать единую динамическую глобальную модель ионосферы, простирающуюся от поверхности Земли до границ магнитосферы. Многообразие параметров, необходимых для описания ионосферы, и обуславливает, в основном, сложность создания приемлемой для практических применений модели.

#### **Аппаратно-программный комплекс пассивного мониторинга ионосферы**

На основе метода радиопросвечивания для оперативного определения в пассивном режиме ионосферных параметров разработан аппаратно-программный комплекс пассивного мониторинга ионосферы (АПК-ПМИ), который позволяет определять основные параметры ионосферы в радиусе до 1000 км от места его установки по результатам приема и обработки радиосигналов навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. Подробно описание комплекса и его функциональные возможности изложены в работах [10,11]. Основные функциональные элементы АПК-ПМИ показаны на рис. 8.



**Рис. 8. Общий вид аппаратно-программного комплекса и результаты его работы.**

АПК-ПМИ может применяться для прогнозирования условий распространения радиоволн коротковолнового диапазона для однокачковых радиотрасс и проведения научных исследований гелиогеофизических процессов, происходящих в ионосфере. По сравнению с традиционными средствами ионосферного контроля он обладает рядом преимуществ: - является малогабаритным, что значительно облегчает его развёртывание и эксплуатацию; - не излучает радиосигналы, как следствие, имеет низкое энергопотребление и не создаёт радиопомех другим техническим средствам.

Комплекс обладает следующими функциональными возможностями:

- автоматическое определение географических координат своего местоположения;
- определение параметров ионосферы (полное электронное содержание ионосферы, критическая частота и высота максимума слоя F2, высотный профиль электронной концентрации) для подионосферных точек, соответствующих находящимся в зоне радиовидимости космическим аппаратам ГЛОНАСС и GPS, на удалении до 1000 км от места установки комплекса;
- автоматический расчет полярных и географических координат подионосферных точек, для которых определяются параметры ионосферы;
- возможность графического отображения на экране компьютера высотного профиля электронной концентрации для одной из регистрируемых подионосферных точек, выбираемых оператором;
- определение значений максимально применимых частот для задаваемых оператором однокачковых радиолиний коротковолнового диапазона;
- сохранение (архивирование) результатов определения ионосферных параметров и значений максимально применимой частоты путем формирования на жестком диске соответствующих файлов в текстовом формате;
- отображение на экране текущего местоположения космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS на картографическом фоне;
- отображение зоны радиовидимости космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS на картографическом фоне относительно места установки комплекса.

Результаты совместной работы ионозонда и аппаратно-программного комплекса показаны на рис. 9. Для сравнения использовались результаты, полученные по данным навигационных спутников, координаты подионосферных точек для которых были наиболее близки к месту расположения ионозонда DPS-4 [11,12].

Возможность применения метода радиопросвечивания ионосферы Земли сигналами навигационных спутниковых систем для исследования особенностей состояния субавроральной ионосферы в главном ионосферном провале, которые проявились в аномальном положении плазмопаузы и снижении электронной концентрации, рассмотрена в работе [22]. Обладая высоким пространственно-временным разрешением, метод радиопросвечивания позволяет детектировать узкие провалы и пики ионосферной ионизации, присущие субавроральной ионосфере. Аномалия была обнаружена при

обработке экспериментального материала, полученного в ходе непрерывного мониторинга состояния ионосферы, осуществляемого с помощью аппаратно-программного комплекса, работающего по данным среднеорбитальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС. Полную картину главного ионосферного провала дают результаты, полученные по данным спутника системы GPS. Они показаны на рис. 10. Здесь хорошо видно поведение электронной концентрации, характерное для главного ионосферного провала. Отчётливо наблюдается крутая полярная стенка провала и относительно плавное изменение электронной концентрации в экваториальной стенке. Рисунок наглядно демонстрирует различие в получаемой структуре главного ионосферного провала. Именно возможность получения результатов наблюдения с высокой дискретностью позволяет реконструировать детальную картину распределения электронной концентрации в главном ионосферном провале. Следует также обратить внимание на существование области повышенной электронной концентрации в ионосферном провале, т. е. имеет место как бы его «расслоение». Объяснение этого факта, приведшего к формированию необычных распределений электронной концентрации в субавроральной области ионосферы, оказывается сложной задачей, решение которой может пролить свет на некоторые проблемы физики формирования ионосферных провалов.

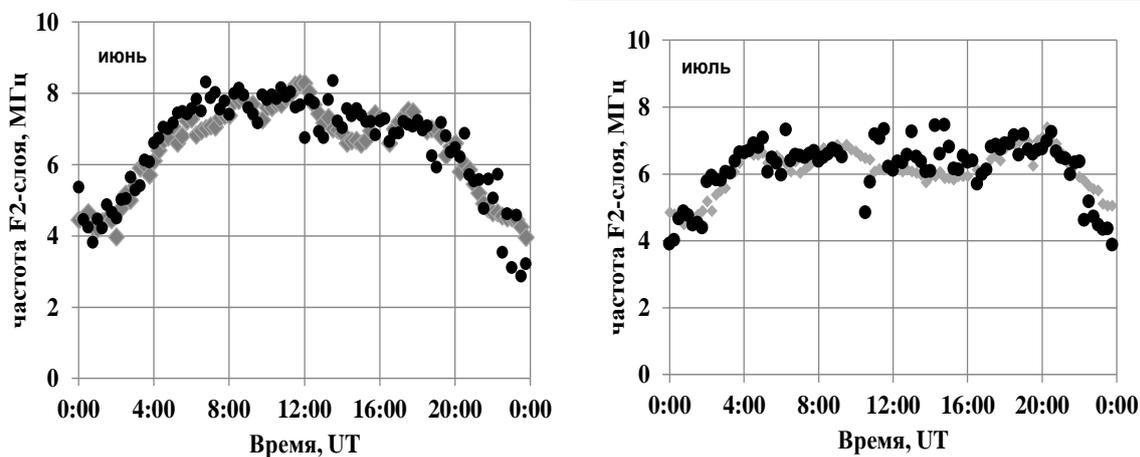
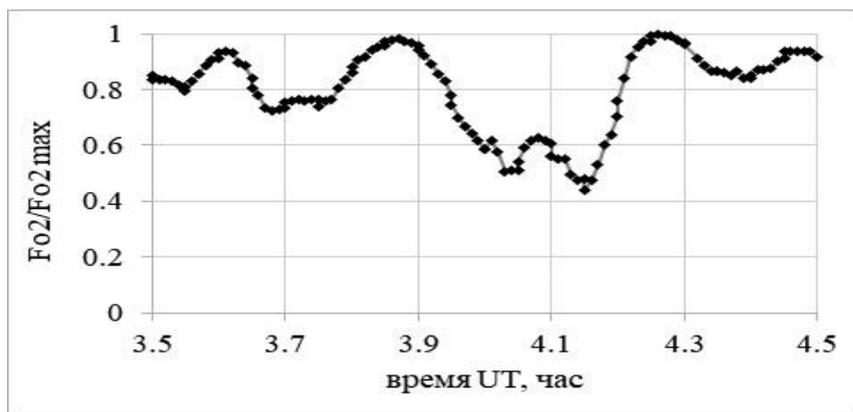


Рис. 9 Результаты сравнения данных АПК-ПМИ и ионозонда DPS-4 (кружки – данные АПК-ПМИ, ромбы – данные ионозонда) [11].

Использование аппаратно-программного комплекса пассивного мониторинга ионосферы над морскими акваториями в режиме реального времени было осуществлено с судов во время морской арктической экспедиции и океанографической экспедиции в Антарктиду [23].

### Выводы

Приведенные результаты работ по радиопросвечиванию ионосферы Земли сигналами навигационных спутниковых систем показали перспективность его применения для исследования различных эффектов. Всепогодность и непрерывное нахождение в зоне видимости большого количества навигационных спутников позволили создать аппаратно-программный комплекс для непрерывного мониторинга состояния ионосферы.



**Рис. 10.** Вариации нормированной частоты слоя F2 ионосферы, полученные по наблюдениям спутника ГЛОНАСС в утреннее время [22].

Высокие точностные характеристики комплекса и его мобильность позволяют использовать его для решения разных задач, связанных с ионосферой Земли. Он может быть использован для исследования главного ионосферного провала, мониторинга ионосферы над экваториями, где невозможно размещение ионозондов наземного базирования, исследования особенностей распространения радиоволн, построения детального распределения ионосферы в заданном регионе и расширения зоны действия наземных ионозондов вертикального зондирования [21]. Приведенные результаты являются доказательством того, что метод радиопросвечивания на трассе спутник-Земля, базирующийся на использовании глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS, является высокоэффективным средством для исследования и непрерывного мониторинга пространственно-временного распределения электронной концентрации ионосферы Земли в реальном масштабе времени в различных гелиогеофизических условиях.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН.*

### Литература

1. Сетевые спутниковые радионавигационные системы /под ред. П.П. Дмитриева, В.С. Шебшаевича. - М.: Радио и связь, 1992.
2. Глобальные навигационные системы: тем. вып. /Труды Инст. инж. по электротехнике и радиоэлектронике.1983. №10. С.71.
3. Hofmann-Wellenhof, B. Global Positioning System. Theory and Practice, 2 nd ed./B. Hofmann-Wellenhof, B.H. Lichtenegger, J. Collins.- New York: Springer Verlag Wien, 1993.
4. Смирнов В.М. Решение обратной задачи радиопросвечивания ионосферы Земли градиентными методами // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 1. С. 47.
5. Андрианов В.А., Смирнов В.М. Определение высотного профиля электронной концентрации ионосферы Земли по двухчастотным измерениям радиосигналов искусственных спутников Земли // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. № 7. С. 1326.
6. Андрианов В.А., Мосин Е.Л., Смирнов В.М. Определение регулярных вариаций F2-области ионосферы Земли по измерениям параметров сигналов навигационных спутников // Исследование Земли из космоса. 2000. №1. С.15.
7. Смирнов В.М., Смирнов Е.В., Скобелкин В.Н., Тынянкин С.И. Мониторинг состояния ионосферы в режиме реального времени. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011.Т.8. №4. С.136.

8. Bilitza D. International reference ionosphere: recent developments. //Radio Sci., 1986. V.21. №3. P.343.
9. Смирнов В.М. Метод мониторинга ионосферы Земли на основе использования навигационных спутниковых систем: дис. д-ра физ.-мат. наук. М.: ИРЭ РАН. 2007. 299 С.
10. Смирнов В.М., Смирнова Е.В. Модуль ионосферного обеспечения на базе спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. //Журнал радиоэлектроники. 2010. № 6. С. 5.
11. Смирнов В.М., Смирнова Е.В., Тынянкин С.И. и др. Аппаратно-программный комплекс для мониторинга состояния ионосферы в режиме реального времени. // Гелиогеофизические исследования. // Гелиогеофизические исследования. 2013. № 4. С.32.
12. Smirnov V.M., Smirnova E.V., Ruzhin Yu.Ya. et al. Passive method and hardware-software complex for monitoring and research of the ionosphere. // XXXI URSI General Assembly and Scientific Symp. Beijing. 16–23 Aug. 2014. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2014.6929799>.
13. Смирнов В.М., Смирнова Е.В. Отклик ионосферы на экстремальную вспышку 28 октября 2003 года. //Геомagnetизм и аэрономия. 2014. Т. 54. № 1. С. 94.
14. Смирнов В.М., Смирнова Е.В. Ионосферные эффекты двух солнечных вспышек максимума 23-го и минимума 24-го циклов солнечной активности. // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 2. С. 82. DOI: 10.12737/szf-52201911
15. Ружин Ю.Я., Кузнецов В.Д., Смирнов В.М. Отклик ионосферы на вторжение и взрыв южноуральского суперболида. //Геомagnetизм и аэрономия. 2014. Т.54. № 5. С. 646.
16. Смирнов В.М. Вариации ионосферы в период землетрясений по данным навигационных систем //Электронный журнал "Исследовано в России", <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2001/153.pdf>. 2001 г., № 153, с. 1759-1767.
17. Бондур В.Г., Смирнов В.М. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами. //Доклады Академии наук. 2005. Т.402. №5. С.675.
18. В. М. Смирнов, Е. В. Смирнова, М. Н. Цидилина, М. В. Гапонова. Сейсмоионосферные вариации во время сильных землетрясений на примере землетрясения 2010 г. в Чили. // Космические исследования. 2018. Т. 56, №4. С. 21.
19. Смирнов В.М., Смирнова Е.В., Секистов В.Н., Мальковский А.П., Тынянкин С.И. Распространение радиоволн коротковолнового диапазона и возможности метода радиопросвечивания ионосферы Земли для расчета максимально применимых частот. //Радиотехника и электроника. 2008. Т.53. №9. С.1112.
20. Гузенко О.Б., Смирнов В.М., Тынянкин С.И. Ионосферное обеспечение корабельных средств декаметровой радиосвязи с использованием спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС / GPS. //Морской сборник. 2015. №2. С. 60.
21. Смирнов В.М., Смирнова Е.В. Расширение зоны действия ионозондов вертикального зондирования ионосферы за счет применения спутниковых навигационных систем //РЭ. 2023. Т.68. №1. С.22. DOI: 10.1134/S1064226922120208
22. В.М. Смирнов, Е.В. Смирнова. О возможности детектирования локальных особенностей зоны главного ионосферного провала по данным навигационных спутниковых систем. //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021.Т.18. 1. С. 229. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-229-240.
23. В.М. Смирнов, Е.В. Смирнова. Зондирование ионосферы Земли над морскими акваториями. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. №5. С. 327. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-327-335