

Зондирование ионосферы Земли над морскими акваториями

В. М. Смирнов, Е. В. Смирнова

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, Фрязино, 141190, Россия
E-mail: vsmirnov@ire.rssi.ru*

На основе экспериментальных данных измерений продемонстрированы возможности технологии непрерывного мониторинга, предназначенной для реконструкции пространственно-временной структуры ионосферы и решения задач оперативного контроля высотного распределения и полной электронной концентрации ионосферы методом радиопросвечивания на трассе «спутник–Земля» с использованием радиосигналов навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС в реальном масштабе времени над морскими акваториями. Представлены результаты работы созданного на её основе аппаратно-программного комплекса пассивного мониторинга ионосферы над морскими акваториями в режиме реального времени. Функционирование комплекса осуществлялось на морских судах во время морской арктической экспедиции и океанографической экспедиции в Антарктиду. Показано, что комплекс позволяет одновременно определять параметры ионосферы как вдоль трассы движения самого судна, так и вдоль траектории движения подионосферных точек по разным азимутальным направлениям. Одномоментно можно определять параметры ионосферы более чем в 15–20 подионосферных точках на территории радиусом до 1000 км от места расположения приёмника навигационных сигналов. Эти результаты могут быть использованы для получения репрезентативных данных о реальном состоянии ионосферы Земли на территории до 3 млн км².

Ключевые слова: ионосфера, электронная концентрация, навигационные системы, акватории, радиосвязь, аппаратно-программный комплекс, радиопросвечивание

Одобрена к печати: 15.08.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-327-335

Введение

Сложное строение среды распространения, а также непрерывное во времени изменение параметров ионосферной плазмы оказывают влияние на распространение радиоволн. Необходимость изучения ионосферы связана с эффективностью функционирования систем радиосвязи и радионавигации, координатно-временного обеспечения. Оценка состояния ионосферы является одной из важнейших составляющих повышения надёжности спутниковой и коротковолновой радиосвязи (Пашинцев, Ахмадеев, 2015; Пашинцев и др., 2006). Последней уделяется особое внимание. Несмотря на ряд недостатков коротковолновой радиосвязи, её роль и место в общей системе связи остаются достаточно высокими. Это объясняется тем, она позволяет оперативно устанавливать прямую связь на больших расстояниях, включая труднодоступные водные и горные районы. Организация же постоянно действующих пунктов прогноза радиосвязи в таких регионах практически невозможна из-за отсутствия в них какой-либо инфраструктуры.

Основные сведения о структуре и динамике ионосферы получены с помощью ставших уже классическими радиофизических методов зондирования (ионозонды, радары некогерентного рассеяния, регистрация сигналов космических радиисточников и т. д.). Эти методы успешно применяются и сегодня. Однако такие средства измерений находятся, как правило, на суше и могут функционировать только при наличии соответствующей наземной инфраструктуры. Кроме этого, ионозонды, обладающие высокой точностью измерений, позволяют определять параметры ионосферы только в месте их расположения. Новым мощным инструментом дистанционной диагностики ионосферы стали глобальные навигационные

спутниковые системы GPS (Global Positioning System — система глобального позиционирования) и ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система) с созданными на их основе широко разветвлёнными сетями. На их базе созданы и успешно работают радиотомографические и радиозатменные методы определения параметров ионосферы.

Радиозатменный метод позволяет определять высотное распределение электронной концентрации ионосферы Земли над акваториями, но требует наличия одновременно двух спутников. Обеспечивая глобальность наблюдения за состоянием нижней части ионосферы Земли, данный метод не обладает высоким пространственным разрешением. Кроме того, геометрия эксперимента по затменной схеме радиопросвечивания «спутник — спутник», как правило, такова, что получить высотное распределение ионосферы в данном месте и в данное время не всегда представляется возможным. Наличие же незначительного числа наблюдательных пунктов на территории морей и океанов не позволяет использовать для определения параметров ионосферы хорошо развитые в настоящее время методы компьютерной радиотомографии из-за их низкого, в данных условиях, пространственного разрешения. В такой ситуации трансionoсферный метод зондирования на трассе «спутник — Земля» является практически единственно возможным средством, позволяющим определять высотные профили распределения электронной концентрации ионосферы над водной поверхностью в месте расположения потребителя.

Цель работы заключается в экспериментальной демонстрации возможности технологии непрерывного мониторинга, предназначенной для реконструкции пространственно-временной структуры ионосферы и решения задач оперативного контроля высотного распределения и полной электронной концентрации ионосферы методом радиопросвечивания на трассе «спутник — Земля» с использованием радиосигналов навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС в реальном масштабе времени над морскими акваториями.

Принцип работы комплекса мониторинга ионосферы

Технология непрерывного мониторинга ионосферы базируется на использовании метода радиопросвечивания и заключается в определении основных ионосферных параметров (полного электронного содержания, критической частоты и высоты ионосферного слоя F_2) по результатам однопозиционного приёма и обработки радиосигналов спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Метод основан на использовании функциональных связей параметров зондирующих сигналов, среды их распространения и математического аппарата решения интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода, относящихся к классу обратных некорректно поставленных задач атмосферной рефракции. Подробное описание данной технологии приведено в работах (Смирнов, 2007; Смирнов, Смирнова, 2010). Суть технологии заключается в том, что при прохождении через ионосферу радиосигнала, излучаемого с космического аппарата на двух несущих частотах f_1 и f_2 , возникают различные задержки $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$, а также изменения фаз $\Delta\varphi_1 \sim \Delta\tau_1$ и $\Delta\varphi_2 \sim \Delta\tau_2$. Они позволяют непрерывно определять по навигационным измерениям двухчастотного приёмника значения полного электронного содержания ионосферы $N_T \approx (\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2)$ вдоль радиотрассы «спутник — наземный приёмник» в любой момент времени t . На выходе двухчастотного приёмника навигационных сигналов формируются временные ряды значений полного электронного содержания ионосферы $N_T(t)$, которые и используются для решения обратной задачи радиопросвечивания. Учитывая, что время распространения радиоволн и длительность необходимых сеансов измерений существенно меньше характерных временных масштабов изменения свойств среды, основное значение имеют их пространственные вариации.

На основе этой технологии разработан и доведён до стадии опытного образца автоматизированный аппаратно-программный комплекс (АПК), предназначенный для реконструкции пространственно-временной структуры ионосферы и решения задач оперативного контроля высотного распределения и полной электронной концентрации ионосферы методом радиопросвечивания на трассе «спутник — Земля» с использованием радиосигналов навигационных

спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС в реальном масштабе времени (Смирнов, Тынянкин, 2011; Смирнов и др., 2013).

Комплекс обеспечивает возможность оперативной (с интервалом не более 30 с) оценки распределения электронной концентрации в интервале высот 100–1000 км, параметров ионосферного слоя $F2$ и полного электронного содержания в радиусе до 700–1000 км от места установки приёмника по 10–20 одновременно наблюдаемым навигационным спутникам. Относительная погрешность определения параметров критической частоты ионосферного слоя $F2$ составляет $\sim 8,5\%$. Аппаратно-программный комплекс имеет высокую степень автоматизации и обеспечивает круглосуточный непрерывный режим функционирования с архивированием тематической и служебной информации. Его вид приведён на *рис. 1*. Тестирование комплекса осуществлялось в Институте земного магнетизма и распространения радиоволн в течение года. Комплекс располагался в непосредственной близости от ионозонда DPS-4. Результаты сравнения данных ионозонда и аппаратно-программного комплекса показаны на *рис. 2*. Расхождения в результатах можно объяснить особенностью работы ионозонда и метода радиопросвечивания. Ионозонд, обладающий широкой диаграммой направленности, даёт информацию о параметрах ионосферы над территорией, радиус которой составляет от 250 до 350 км. В то время как метод радиопросвечивания, реализованный по одному спутнику, позволяет определять состояние ионосферы над территорией в несколько десятков километров. В зоне ответственности ионозонда с помощью метода радиопросвечивания можно получать информацию об ионосфере по 15–20 азимутальным направлениям одновременно.

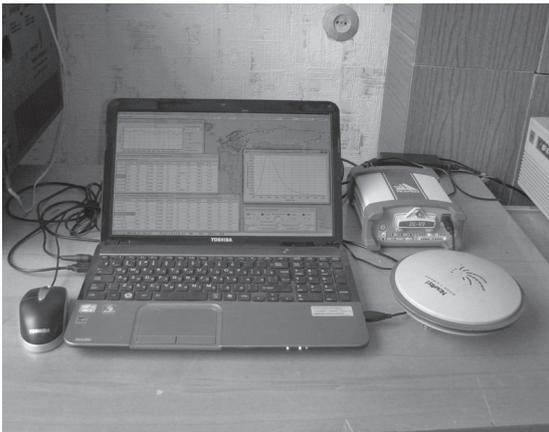


Рис. 1. Аппаратно-программный комплекс пассивного мониторинга ионосферы

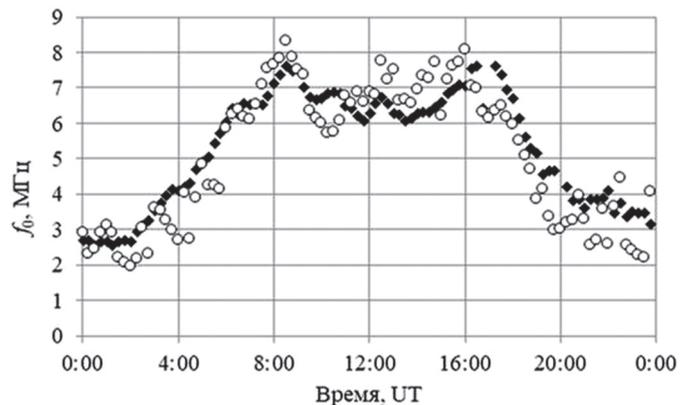


Рис. 2. Суточные значения критической частоты слоя $F2$ ионосферы в октябре. Ромбы — измерения ионозонда, кружки — данные комплекса

Результаты работы аппаратно-программного комплекса

Использование аппаратно-программного комплекса пассивного мониторинга ионосферы над морскими акваториями в режиме реального времени было осуществлено с судов во время морской арктической экспедиции в июле 2015 г. и океанографической экспедиции в Антарктиду в 2015–2016 гг. Маршрут арктической экспедиции на научно-исследовательском судне «Профессор Молчанов» пролегал в районе Северного Ледовитого океана по акваториям Баренцева и Карского морей, ограниченным $64\text{--}80^\circ$ с. ш. и $40\text{--}53^\circ$ в. д. Карта маршрута приведена на *рис. 3* (см. с. 330).

Пример отображения информации показан на *рис. 4а* (см. с. 330). Представленные на рисунке символы в виде звёздочек отображают координаты подионосферных точек, для которых получены параметры ионосферы для фиксированного момента времени. Эти точки определялись как пересечения высоты максимума слоя $F2$, получаемой при решении обратной

задачи радиопросвечивания, с трассой распространения радиоволны по линии «навигационный спутник – приёмник». В таблицах указываются географические координаты подионосферной точки, значения частоты и высоты максимума слоя F_2 , полное электронное содержание в данной точке, номер и тип навигационного спутника, по измерениям которого получены данные результаты, параметры максимальных применимых частот для заданных трасс. На отдельных вставках отображается высотный профиль электронной концентрации для выбранного спутника и временной ход частоты слоя F_2 либо в ближайшей точке от судна, либо на заданном расстоянии.

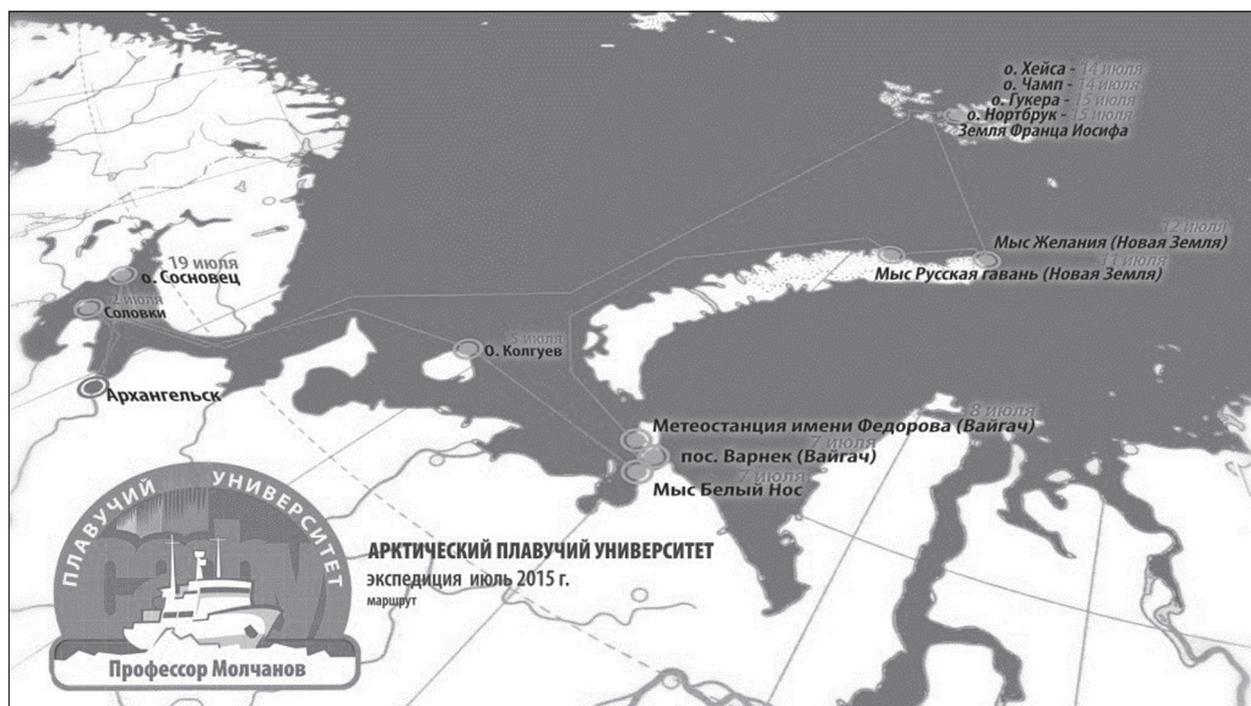


Рис. 3. Маршрут научно-исследовательского судна «Профессор Молчанов» (<https://narfu.ru/upload/medialibrary/bbd/karta-aru-2015.png>)

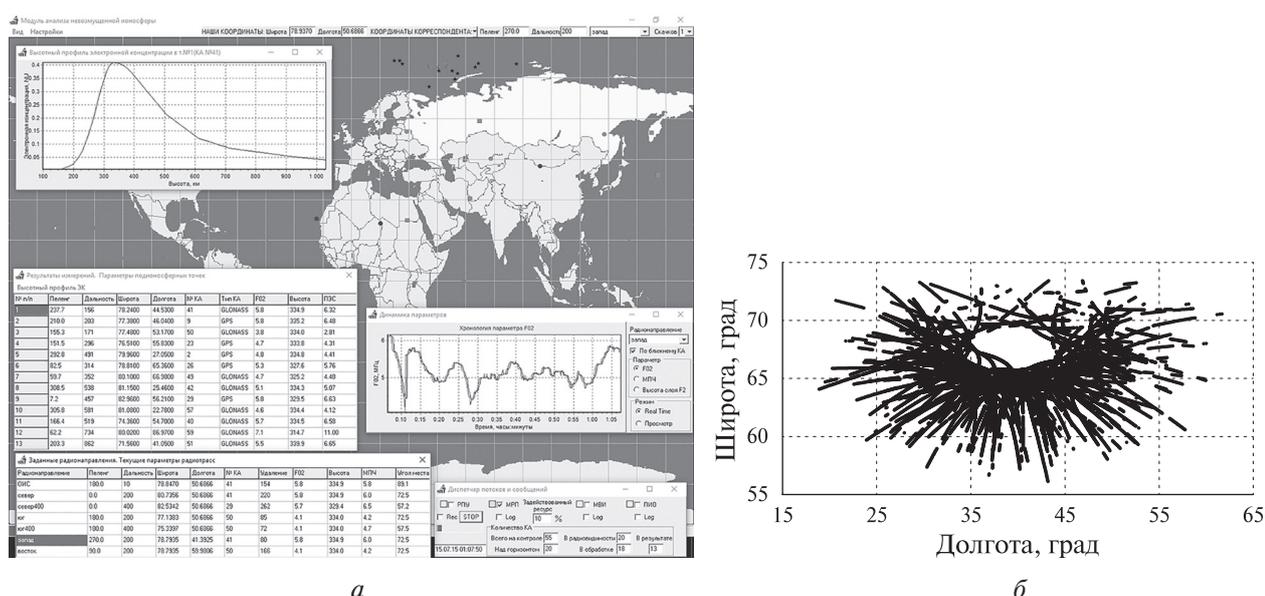


Рис. 4. Вид измерительной информации с АПК, установленного на судне «Профессор Молчанов» (а), и траектории подионосферных точек в суточном сеансе измерений (б)

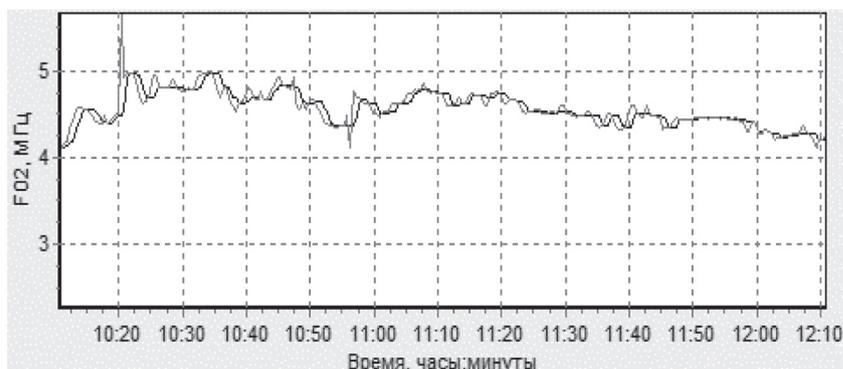


Рис. 5. Временной ход критической частоты ионосферы в слое F2 вдоль трассы движения судна в Арктике

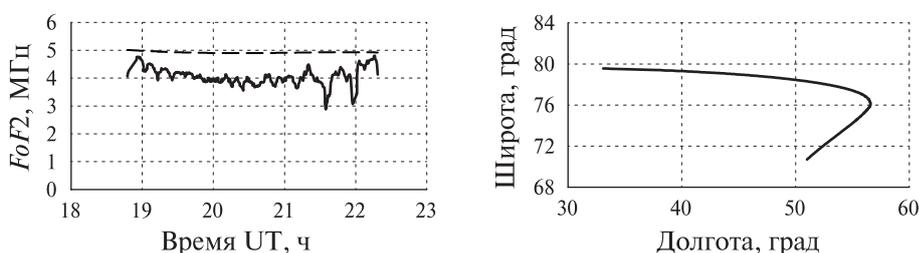


Рис. 6. Изменение критической частоты F_oF_2 для спутника GPS-1 и траектории подионосферных точек. Пунктир — расчёт по модели IRI (Bilitza et al., 2004)

Дискретность выдачи параметров ионосферы для подионосферных точек составляла 30 с. В течение суток АПК позволял получать информацию более чем для 20 000 точек на территории в 3 млн км² практически в режиме реального времени. Траектории точек для одного из суточных сеансов измерений показаны на рис. 4б. Наличие пустой зоны в центре, где расположено судно, обусловлено наклоном орбиты навигационных спутников, которое составляет ~55° для спутников системы GPS и ~65° — для ГЛОНАСС. Такое наклонение орбит не позволяет получать информацию об ионосфере непосредственно над судном. В этом заключается особенность применения метода радиопросвечивания в высоких широтах. Ближайшие к кораблю подионосферные точки располагаются на расстояниях не менее 100–150 км. На рис. 5 приведены фрагменты временного хода значения максимума электронной концентрации вдоль трассы движения судна в июле 2015 г., по оси абсцисс указано всемирное время UT (Universal Time). Тёмная линия на рисунке показывает медианное значение, серая — текущее. Представленные результаты свидетельствуют о сильной изменчивости критической частоты слоя F2 даже на коротких временных интервалах.

Результаты расчёта критической частоты F_oF_2 для спутника GPS No. 1 и траектории подионосферных точек во время сеанса измерений представлены на рис. 6.

Проведение океанографической экспедиции в Антарктиду на океанографическом исследовательском судне «Адмирал Владимирский» Атлантической океанографической экспедиции Гидрографической службы Балтийского флота было осуществлено в период с 7 ноября 2015 г. по 15 апреля 2016 г. Маршрут экспедиции представлен на рис. 7.



Рис. 7. Схема маршрута океанографической экспедиции в Антарктиду

Пример отображения тематической и служебной информации для данной экспедиции при нахождении судна в Индийском океане показан на *рис. 8*. Траектории подионосферных точек для одного из суточных сеансов измерений, проведённых в декабре 2015 г., показаны на *рис. 8б*.

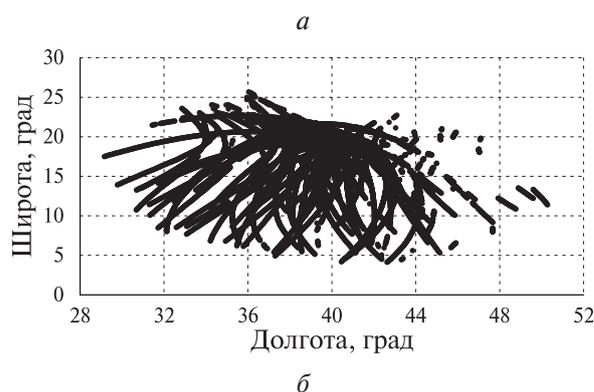
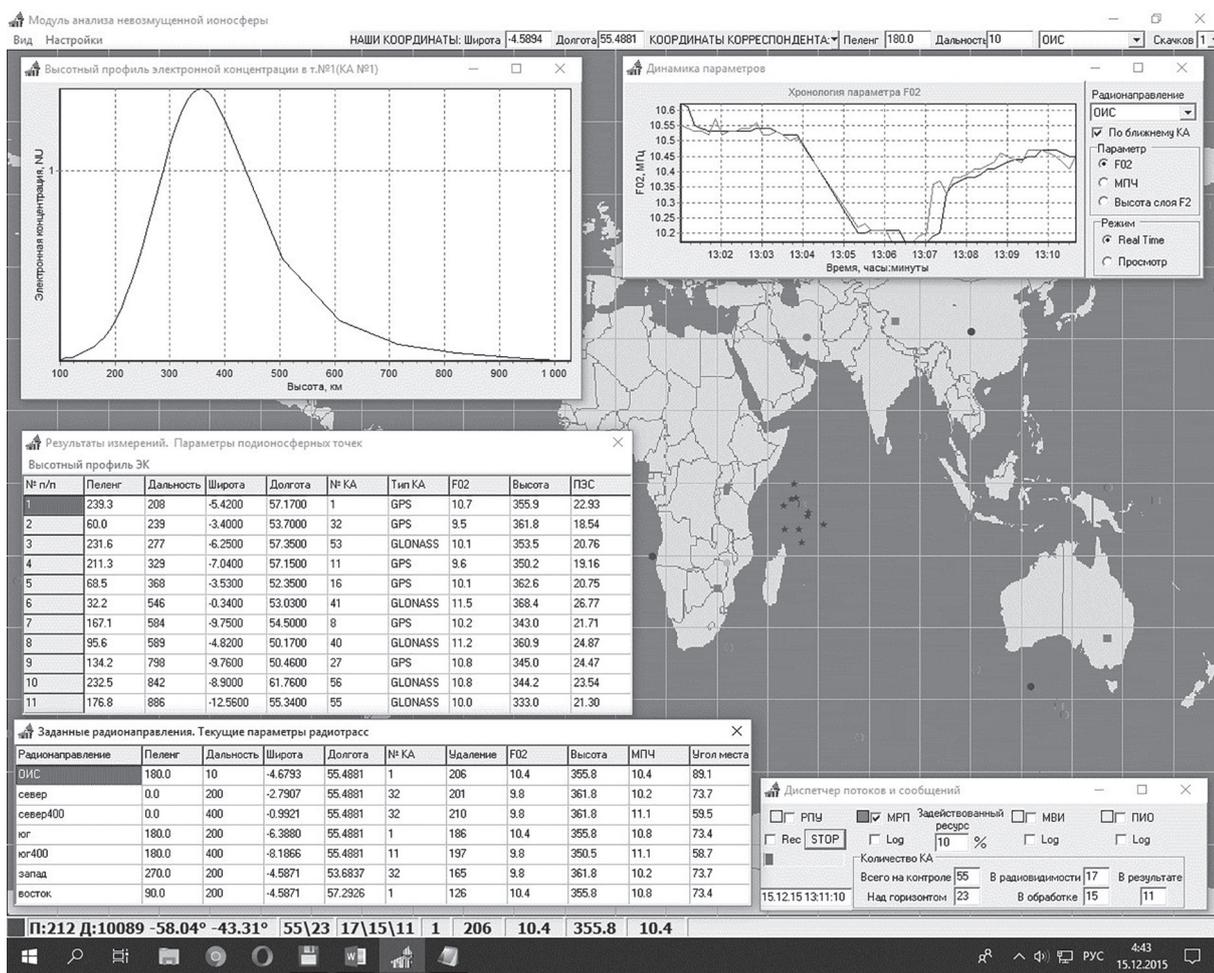


Рис. 8. Вид измерительной информации с АПК, установленного на судне «Адмирал Владимирский» (а), и траектории подионосферных точек в суточном сеансе измерений (б)

Значительное увеличение критической частоты, наблюдаемой по данным спутника GPS No. 6 (*рис. 9б*), возможно, обусловлено прохождением подионосферной точки через экваториальную аномалию, центрированную на широтах $\pm(15-20)^\circ$ (Брюнелли, Намгаладзе, 1988).

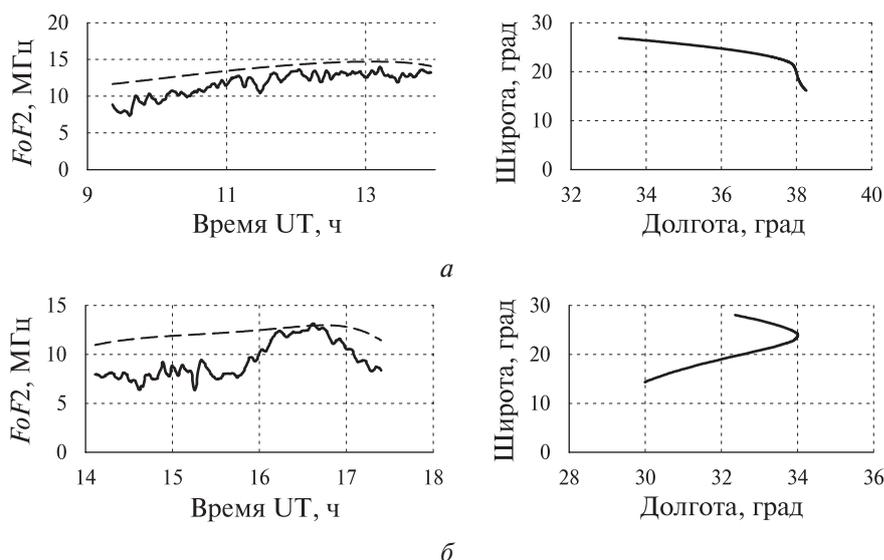


Рис. 9. Изменение критической частоты ионосферы вдоль траектории движения подионосферной точки для спутников GPS-11 (а) и GPS-6 (б). Пунктир — расчёт по модели IRI (Bilitza et al., 2004)

Заключение

На основе экспериментальных данных измерений продемонстрированы возможности технологии непрерывного мониторинга, предназначенной для реконструкции пространственно-временной структуры ионосферы и решения задач оперативного контроля высотного распределения и полной электронной концентрации ионосферы методом радиопросвечивания на трассе «спутник — Земля» с использованием навигационных радиосигналов над морскими акваториями. Показано, что её применение позволяет успешно детектировать особенности строения ионосферы. В частности, одновременное использование двух спутников, наблюдавших в разных азимутальных направлениях, дало возможность определить положение экваториальной аномалии. Прохождение подионосферной точки через эту область осуществлялось в течение 1 ч, что позволило построить реальный профиль экваториальной аномалии на данный период времени.

Таким образом, результаты, полученные с помощью аппаратно-программного комплекса, позволяют обеспечивать расчёт значений регулярных ионосферных характеристик не только над местом расположения АПК, но и в его окрестностях. Наличие такого комплекса на борту океанографических судов предоставило возможность определять параметры ионосферы как над самим судном, так и на удалении от него на расстояниях до 1000 км одновременно в разных азимутальных направлениях. При этом комплекс даёт информацию о состоянии ионосферы вдоль траекторий подионосферных точек для всех находящихся в зоне видимости навигационных спутников. Наличие такой информации крайне важно как для изучения динамических процессов, происходящих в ионосфере, так и для решения прикладных задач, в частности коротковолновой радиосвязи и координатно-временного обеспечения, загоризонтной радиолокации.

Авторы выражают благодарность Павельеву А. А. и Ковалеву Д. С. за участие в проведении измерений во время морских экспедиций. Работа выполнена в рамках государственного задания.

Литература

1. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
2. Пашинцев В. П., Ахмадеев Р. Р. Прогнозирование помехоустойчивости систем спутниковой связи и навигации по данным GPS-мониторинга ионосферы // Электросвязь. 2015. № 11. С. 58–65.

3. Пашинцев В. П., Солчатов М. Э., Гахов Р. П. Влияние ионосферы на характеристики космических систем передачи информации. М.: Физматлит, 2006. 184 с.
4. 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.
5. Смирнов В. М., Смирнова Е. В. Модуль ионосферного обеспечения на базе спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС // Журн. радиоэлектроники. 2010. № 6. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun10/3/text.pdf>.
6. Смирнов В. М., Тынянкин С. И. Способ определения параметров ионосферы и устройство для его осуществления. Патент РФ на изобретение № 2421753. Оpubл. 20.06.2011.
7. Смирнов В. М., Смирнова Е. В., Тынянкин С. И., Скобелкин В. Н., Мальковский А. П. Аппаратно-программный комплекс для мониторинга состояния ионосферы в режиме реального времени // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 4. С. 32–38.
8. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Meriens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L., Reinisch B. The International Reference Ionosphere 2012 — a model of international collaboration // J. Space Weather and Space Climate. 2004. No. 4. A07. URL: <https://doi.org/10.1051/swsc/2014004>.

Sounding the Earth's ionosphere over the sea

V. M. Smirnov, E. V. Smirnova

V.A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS,
Fryazino Branch, Fryazino 141190, Russia
E-mail: vsmirnov@ire.rssi.ru

On the basis of experimental measurement data the capabilities of continuous monitoring technology designed for the reconstruction of the spatial-temporal structure of the ionosphere and solving operational control problems of altitude distribution and total electron concentration of the ionosphere using satellite-to-satellite radio-grounding radio signals using GPS/GLONASS navigation satellite signals were demonstrated in real time over sea areas. The results of passive monitoring of ionosphere over the seawater areas created on its basis are presented in real time. The complex operated on ships during an Arctic sea expedition and oceanographic expedition to Antarctica. It is shown that the complex allows simultaneous determining the parameters of ionosphere both along the ship route and along the trajectory of subionospheric points in different azimuth directions. At the same time, it is possible to determine ionosphere parameters in more than 15–20 subionospheric points on the territory within a 1000 km radius of the location of the receiver of navigation signals. These results can be used to obtain representative data on the real state of the Earth ionosphere over an area up to three million square kilometers.

Keywords: ionosphere, electron concentration, navigation satellite systems, water areas, radio communication, hardware-software complex, radiotranslucence

Accepted: 15.08.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-327-335

References

1. Brunelli B. E., Namgaladze A. A., *Fizika ionosfery* (Physics of the ionosphere), Moscow: Nauka, 1988, 528 p.
2. Pashintsev V. P., Akhmadeev R. R., Prognozirovanie pomekhustoichivosti sistem sputnikovoi svyazi i navigatsii po dannym GPS-monitoringa ionosfery (Prediction of noise immunity of satellite communication systems and navigation based on GPS monitoring of the ionosphere), *Elektrosvyaz'*, 2015, No. 11, pp. 58–65.
3. Pashintsev V. P., Solchatov M. E., Gakhov R. P., *Vliyanie ionosfery na kharakteristiki kosmicheskikh sistem peredachi informatsii* (Influence of the ionosphere on the characteristics of space information transmission systems), Moscow: Fizmatlit, 2006, 184 p.

4. Smirnov V. M., *Metod monitoringa ionosfery Zemli na osnove ispol'zovaniya navigatsionnykh sputnikovykh sistem: Diss. dokt. fiz.-mat. nauk* (The method of monitoring the Earth's ionosphere using satellite navigation systems: Dr. phys. math. sci. thesis), Moscow: IRE RAS, 2007, 299 p.
5. Smirnov V. M., Smirnova E. V., Modul' ionosfernogo obespecheniya na baze sputnikovykh sistem GPS/GLONASS (Ionospheric module based on GPS / GLONASS satellite systems), *Zhurnal radioelektroniki*, 2010, No. 6, available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jun10/3/text.pdf>.
6. Smirnov V. M., Tynyankin S. I., *Sposob opredeleniya parametrov ionosfery i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* (The method of determining the parameters of the ionosphere and the device for its implementation), Patent RU 2421753, Reg. 20.06.2011.
7. Smirnov V. M., Smirnova E. V., Tynyankin S. I., Skobelkin V. N., Mal'kovskiy A. P., Apparatno-programmnyi kompleks dlya monitoringa sostoyaniya ionosfery v rezhime real'nogo vremeni (Hardware-software complex for real-time monitoring of the state of the ionosphere), *Geliogeofizicheskie issledovaniya*, 2013, Vol. 4, pp. 32–38.
8. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L., Reinisch B., The International Reference Ionosphere 2012 — a model of international collaboration, *J. Space Weather and Space Climate*, 2004, No. 4, A07, available at: <https://doi.org/10.1051/swsc/2014004>.