

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 523.31

РАСШИРЕНИЕ ЗОНЫ ДЕЙСТВИЯ ИОНОЗОНДОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

© 2023 г. В. М. Смирнов^а, *, Е. В. Смирнова^а

^аФрязинский филиал Института радиотехники и электроники РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

*E-mail: vsmirnov@ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 25.03.2022 г.

После доработки 21.07.2022 г.

Принята к публикации 03.08.2022 г.

Рассмотрена возможность расширения зоны действия ионозонда за счет применения навигационных спутниковых систем для обеспечения надежной коротковолновой радиосвязи на протяженных, в том числе многоскачковых, радиотрассах. На основе обработки экспериментальных данных показано, что увеличение функциональности ионозонда вертикального зондирования может быть обеспечено при помощи аппаратно-программного комплекса ионосферного зондирования, использующего данные навигационных спутников. Применение такого комплекса в месте расположения ионозонда вертикального зондирования позволит получить детальную картину распределения электронной концентрации не только вдали от него, но и внутри самой области зондирования, вдоль траекторий всех подионосферных точек, пересекающих зону ответственности станции вертикального зондирования. Показана возможность создания плотной сети ионосферного контроля на основе территориально распределенных станций вертикального зондирования и аппаратно-программных комплексов.

DOI: 10.31857/S0033849422120208, EDN: CBSHZY

ВВЕДЕНИЕ

Исследование ионосферы Земли остаются и сегодня одной из важнейших научных задач. И дело здесь не только в необходимости проведения фундаментальных исследований, но и в сугубо практических целях. Ионосфера сильно влияет на распространение радиоизлучения, поэтому исследование физики космической плазмы, исследование нестационарных и неоднородных структур слоев ионосферы необходимы, например, для корректного применения спутниковых навигационных систем и обеспечения стабильной связи и навигации в Арктике. Поэтому необходимо знать реальное состояние ионосферы.

Обширная литература по ионосферным исследованиям свидетельствует о важности широкого географического распределения станций для изучения морфологии земной ионосферы, а также для составления ионосферных карт, необходимых для геофизических изысканий, и прогнозов условий распространения радиоволн, необходимых при решении задач радиолокации и связи.

Эффективность решения этих задач во многом определяется правильным выбором рабочей частоты передаваемого сообщения. Так, например,

при радиосвязи коротковолнового диапазона она не может превышать максимально применимое значение для конкретной радиотрассы. Ее определение в реальном масштабе времени весьма актуально для обеспечения дальней радиосвязи и базируется или на прогнозной информации об ионосфере, или на результатах текущих измерений ионосферных параметров. В силу значительной изменчивости ионосферы во времени и пространстве долгосрочное прогнозирование, основанное на использовании глобальных моделей ионосферы, имеет достаточно низкую достоверность. Единственным способом точного определения частоты радиосвязи является оперативный (в реальном масштабе времени) контроль ионосферы.

1. ЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ

Пространственно-временной контроль ионосферы Земли может осуществляться различными аппаратно-программными методами и реализующими их техническими средствами. Первостепенное место среди них занимает метод вертикального радиозондирования ионосферы, дающий наиболее полную и легко интерпретируемую

информацию об электронной концентрации ниже или выше ее максимума [1–3]. Метод основан на эффекте отражения радиоволн от слоя с нулевой диэлектрической проницаемостью на излучаемой частоте. Именно этим объясняется высокая точность измерений, так как значения параметров ионосферы определяются резонансным взаимодействием радиоволн с ионосферной плазмой.

Методы наблюдений за состоянием ионосферы и их потенциальные возможности подробно изложены во многих работах [1–17]. Наибольшими информационными возможностями среди них обладает метод некогерентного рассеяния. Он позволяет с высокой точностью измерить практически все ионосферные параметры, а применение рабочих частот, значительно превышающих собственные частоты ионосферы, делает метод независимым от состояния ионосферы. Одним из самых мощных инструментов исследования ионосферы является радар некогерентного рассеяния радиоволн, посредством которого можно изучать микроскопические флуктуации плазмы, обусловленные тепловым движением электронов.

Основным недостатком метода некогерентного рассеяния является малое временное разрешение, т.е. время, необходимое для получения одного профиля распределения электронной концентрации. Кроме того, что установки некогерентного рассеяния сложны, дороги и немногочисленны, теоретическое обоснование метода более сложное, чем у других методов [5–7]. Постановка той или иной задачи на каждой установке неизбежно вступает в жесткую конкуренцию с другими задачами, поэтому при изучении динамики ионосферы, которое требует длительных непрерывных наблюдений, возникают определенные трудности. Все радары некогерентного рассеяния работают в “скважном” режиме, при котором проводятся серии измерений во время различных геофизических программ, не обеспечивающие длительных непрерывных рядов наблюдений.

Появление и быстрое совершенствование систем спутниковой навигации изменило развитие методов мониторинга ионосферы: важную роль стали играть интегральные методы, использующие разные схемы радиопросвечивания ионосферы Земли.

К ним можно отнести: а) радиозатменное просвечивание ионосферы с помощью приемников, устанавливаемых на низкоорбитальных спутниках; б) измерения полного электронного содержания (ПЭС), осуществляемые с помощью среднеорбитальных навигационных спутниковых систем GPS, ГЛОНАСС и Галилео; в) восстановление вертикальных профилей ионосферы на наклонных трассах просвечивания по данным навигационных систем; г) низкоорбитальную томографию

ионосферы в метровом диапазоне частот и высокоорбитальную томографию в дециметровом диапазоне частот [9–12, 18]. Интенсивное использование этих методов требует переосмысления роли и места метода вертикального зондирования среди других методов мониторинга ионосферы и исследования ее физических параметров.

Наземное и спутниковое зондирование ионосферы радиоволнами с помощью ионозондов всех типов позволяет получать локальные параметры ионосферной плазмы либо в месте расположения ионозонда, либо вдоль определенной траектории полета спутника. Методы и аппаратуру радиозондирования ионосферы Земли можно классифицировать по зонам контроля, по точности определения параметров и по используемым технологиям [4]:

1) по зонам контроля — в силу специфики распространения и отражения радиоволн наземные станции вертикального радиозондирования (ионозонды) контролируют параметры плазмы только над пунктами наблюдения до высоты максимума ионосферного слоя F2; ионозонды, расположенные на спутниках, контролируют ионосферу под собой от высоты орбиты космического аппарата до высоты максимума ионосферного слоя F2;

2) по точности определения параметров — ионозонд, наиболее полно определяет характеристики ионосферной плазмы, если используются все параметры диагностирующей радиоволны и установлены все существенные связи в системе протекающих процессов;

3) по используемым технологиям — вертикальное, наклонное, возвратно-наклонное зондирование.

Необходимо отметить, что существующие наземные и спутниковые технические средства ионосферного контроля, как правило, являются активными (т.е. излучающими радиосигналы) средствами. В связи с этим возникает задача обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств и средств ионосферного обеспечения. Поскольку данные средства ионосферного обеспечения имеют ограниченные по пространству зоны контроля ионосферы и значительные массогабаритные характеристики, это не позволяет в полной мере создать плотную сеть станций зондирования ионосферы, основанную на использовании активных методов излучения.

Одной из возможностей расширения зоны действия ионозондов вертикального зондирования может быть использование данных, получаемых при помощи приемников сигналов глобальных навигационных систем ГЛОНАСС, GPS, Beidou и GALILEO для мониторинга ионосферы [9–12]. Внимание к этим системам следует уделять в силу их применимости к решению обратных задач ди-



Рис. 1. Карта проекций зон контроля АПК-ИМ.

станционного зондирования ионосферы Земли на основе метода радиопросвечивания [18, 19]. Практическая реализация метода основана на использовании измерений параметров радиосигналов на трассе “спутник—наземный пункт”. Алгоритм реализации и принцип работы аппаратно-программного комплекса, основанного на его использовании, описаны в работах [19–21], результаты работы комплекса представлены в [22–26].

Расширение зоны действия ионозонда необходимо для обеспечения надежной коротковолновой (КВ) радиосвязи на протяженных (в том числе многоскачковых) радиотрассах и требует объединения нескольких территориально распределенных аппаратно-программных комплексов ионосферного мониторинга (АПК-ИМ) в единую систему оперативного контроля ионосферы.

На рис. 1 схематично показаны границы пространственных зон контроля ионозонда вертикального зондирования (круг малого диаметра) и аппаратно-программных комплексов определения максимально применимых частот, интегрированных в единую систему оперативного контроля ионосферы. Количество зон контроля определяется территорией, над которой необходимо осуществлять мониторинг состояния ионосферной плазмы.

2. ВОЗМОЖНОСТИ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

В 2015 г. в течение пяти месяцев (июнь—октябрь) был проведен длительный эксперимент, целью которого являлся сравнительный анализ результатов определения критической частоты F2-слоя ионосферы двумя способами — верти-

кального зондирования (ионозонд DPS-4) и радиопросвечивания по трассе “спутник—Земля” с использованием сигналов спутников ГЛОНАСС и GPS. На территории Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН был расположен АПК-ИМ. Он позволял в реальном масштабе времени на основе одновременной обработки радиосигналов 10–20 наблюдаемых спутников ГЛОНАСС/GPS определять параметры ионосферы (полное электронное содержание, профиль распределения электронной концентрации в интервале высот 100...1000 км, критическую частоту и высоту ионосферного слоя F2) на удалении до 1000 км (рис. 2а). Траектории подионосферных точек, полученные в течение суточного наблюдения, показаны на рис. 2б.

Оба прибора находились в непосредственной близости, что позволяло обеспечить идентичность условий наблюдения. Ионозонд DPS-4 выдавал параметры ионосферы каждые 15 мин, АПК-ИМ — каждую минуту. Информация с обоих приборов как отображалась на экранах мониторов, так и регистрировалась в памяти используемых компьютеров. Одновременно с численными параметрами на мониторе АПК отображался временной ход критической частоты F2-слоя ионосферы, получаемый по наблюдениям ближайшего навигационного спутника. Фрагмент двухчасовой записи хода критической частоты F2-слоя ионосферы представлен на рис. 3. При ограничении угла места наблюдения в 10° количество одновременно используемых навигационных спутников может достигать 23, в среднем их число составляло 12...15. Параметры ионосферы определялись для каждого спутника, находящегося в зоне видимости приемного устройства.

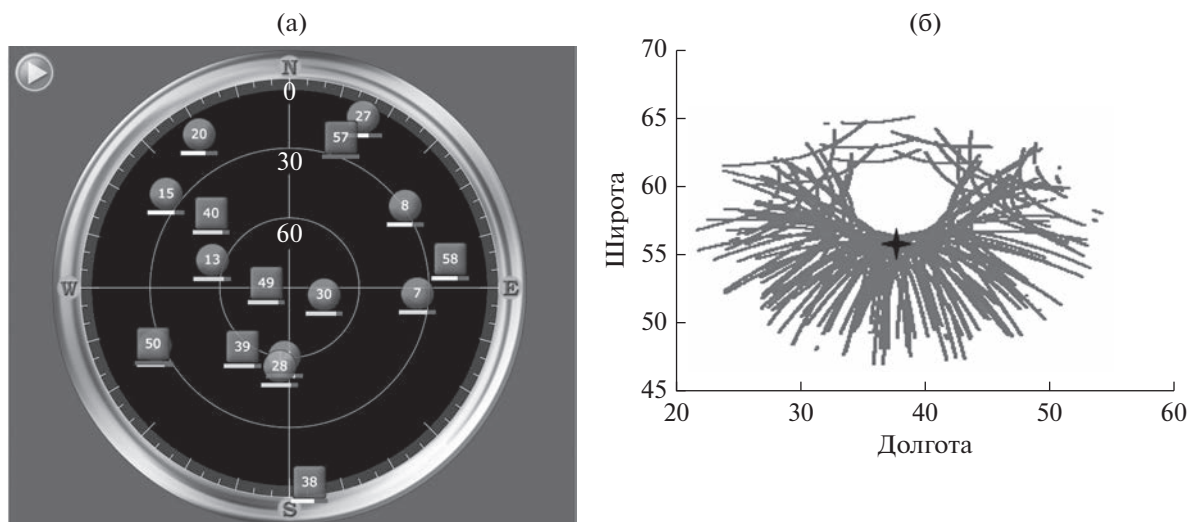


Рис. 2. Расположение навигационных спутников в зоне видимости комплекса (а) и траектории подионосферных точек (б); спутники GPS (кружки), ГЛОНАСС (квадраты).

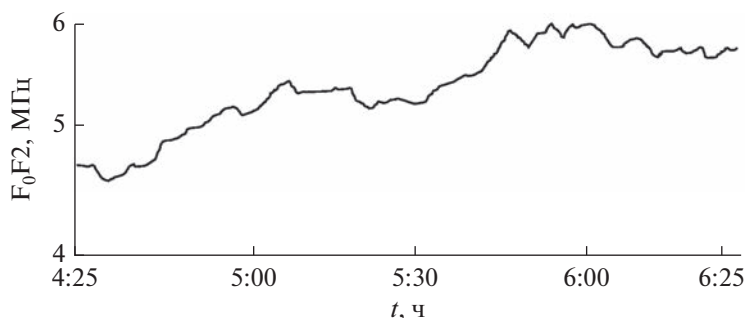


Рис. 3. Фрагмент двухчасовой записи хода критической частоты F_0F_2 ионосферы.

Для сравнения были использованы результаты, полученные по данным навигационных спутников, координаты подионосферных точек для которых наиболее близки к месту расположения ионозонда DPS-4. Результаты сравнения суточного хода критической частоты F2-слоя ионосферы и значения среднеквадратической ошибки (СКО) для июня представлены на рис. 4 [22]. В течение июня среднее суточное значение СКО составило 7% (или 0.57 МГц), в дневное время – 6.65% (0.51 МГц), в ночное время суток – 6.71% (0.55 МГц). Дневные данные учитывали результаты, полученные за один час и до захода, и после восхода Солнца. Ночные данные учитывали результаты, полученные за один час и после захода, и до восхода Солнца. Суточные данные были получены с учетом времени восхода и захода Солнца. Ранее АПК-ИМ был проверен в 20 суточных сеансах КВ-радиосвязи [22, 24]. Результаты представлены на рис. 4в для двух моментов времени – 11 и 19 часов по московскому времени в течение 20 дней.

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 плазмпанузы и снижении электронной концентрации, показана в работе [25]. 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. Полученный эффект в виде резкого уменьшения электронной концентрации в F2-слое ионосферы наблюдался на широтах $57^\circ \dots 59^\circ$ и в двух долготных секторах, примерно $25^\circ \dots 35^\circ$ и $40^\circ \dots 50^\circ$ восточной долготы (рис. 5).

Обнаруженная зона провала наблюдалась по данным всех спутников, траектории подионосферных точек для которых находились на широ-

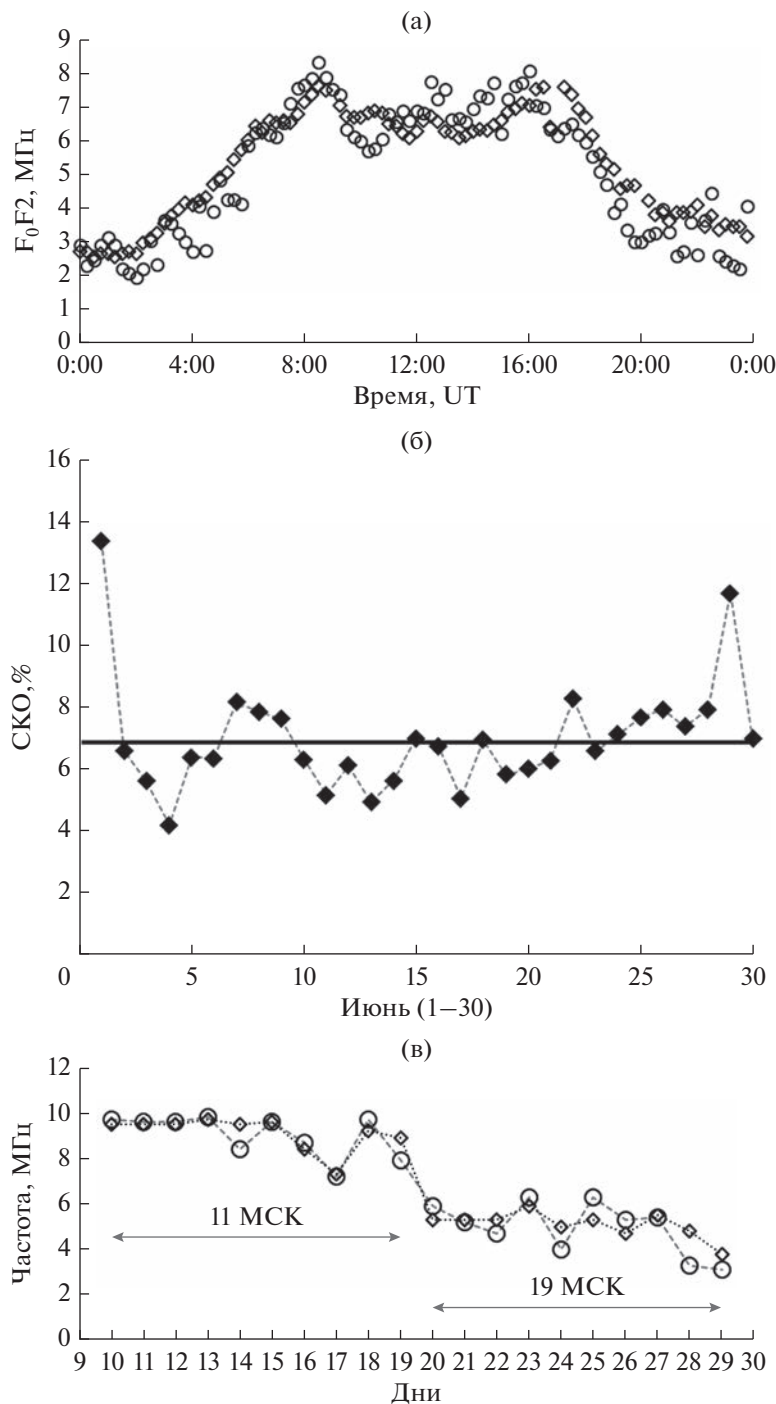


Рис. 4. Результаты апробации аппаратно-программного комплекса: а – сравнение данных АПК (кружки) с данными ионозонда DPS-4 (ромбики); б – погрешность определения критической частоты слоя F2 ионосферы (ромбики – значение за сутки, горизонтальная линия – среднее суточное СКО за месяц) [22]; в – прогноз МПЧ в интересах КВ-радиосвязи (кружки – АПК-ИМ, ромбики – рабочая частота).

тах $57^\circ \dots 59^\circ$ в утренние, вечерние и ночные часы. Ширина провала в утреннее время суток составила около 0.9° , ширина основного локального провала в вечернее время суток составила около 0.5° . При этом наблюдалось уменьшение электронной концентрации более чем в шесть раз в утреннее

время, и в четыре раза – в вечернее. Такие аномалии невозможно обнаружить ионозондами вертикального зондирования.

Применение навигационных спутниковых систем позволяет также детектировать наличие ионосферных неоднородностей и оценить их влияние на

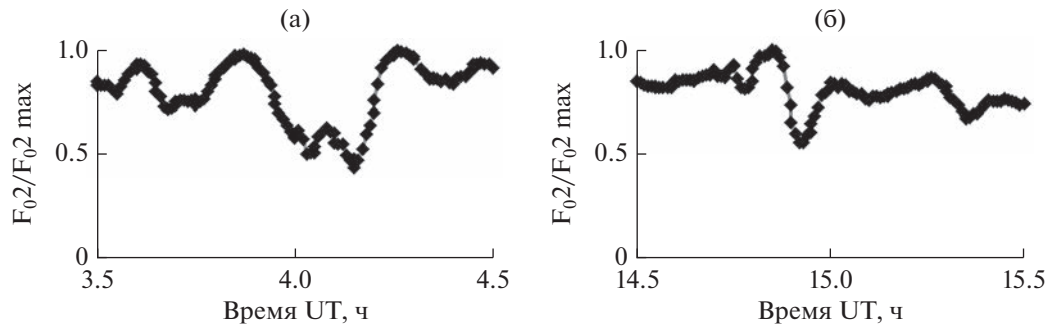


Рис. 5. Вариации нормированной частоты слоя F2 ионосферы, полученные по наблюдениям спутника ГЛОНАСС в утреннее (а) и послеполуденное время (б) [25].

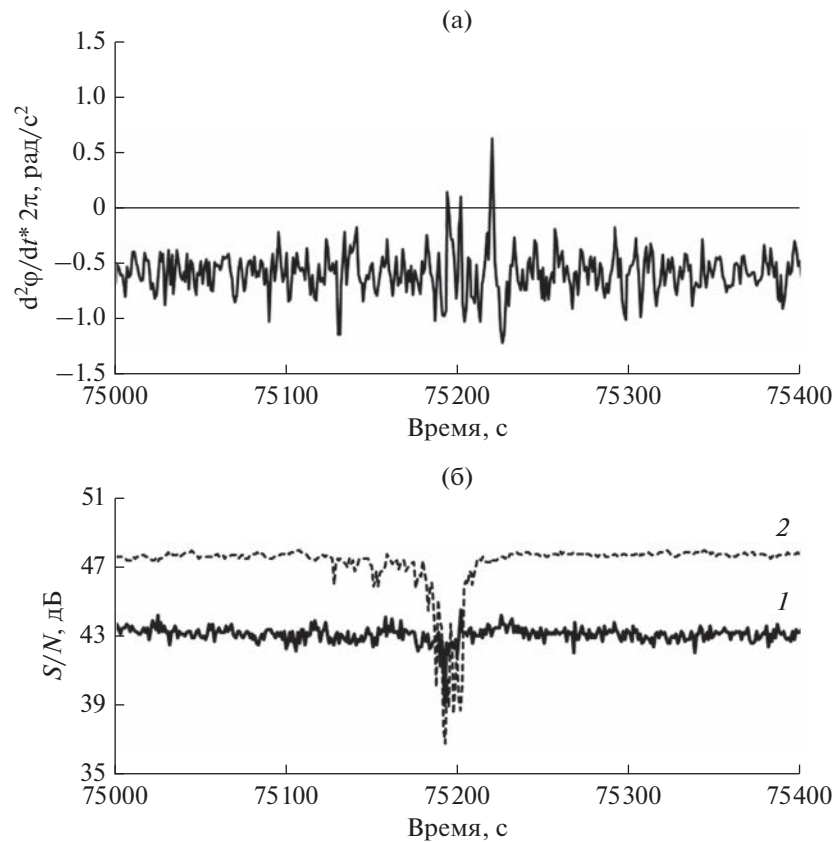


Рис. 6. Вторая производная фазы навигационного сигнала (а) и отношение сигнал/шум на частотах 1.2 (кривая 1) и 1.6 ГГц (кривая 2) (б).

параметры радиосигнала. На рис. 6а представлена вторая производная фазы навигационного сигнала, являющаяся индикатором мелкомасштабных неоднородностей ионосферы [27]. Наличие существенных возмущений в центре рассматриваемого интервала времени свидетельствует о присутствии вдоль трассы прохождения сигнала ионосферных неоднородностей, которые могут приводить к сильному уменьшению уровня принимаемого сигнала (см. рис. 6б) или его полному отсутствию.

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. [28]. Маршрут арктической экспедиции на научно-исследовательском судне “Профессор Молчанов” пролегал в районе Северного Ледовитого океана по акваториям Баренцева и

Карского морей, ограниченным 64° – 80° с.ш. и 40° – 53° в.д. 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. Ее маршрут пролегал от Санкт-Петербурга через Суэцкий канал мимо острова Мадагаскар к Антарктиде и обратно вдоль западного побережья Африки. Комплекс работал непрерывно во время обеих экспедиций и позволил получить большой объем информации о состоянии ионосферы вдоль всего пути следования морских судов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментальных исследований показывают, что на основе территориально распределенных станций вертикального зондирования и аппаратно-программных комплексов возможно создание плотной сети ионосферного контроля, при этом наличие на них других аппаратно-программных средств только повысит результативность мониторинга. Оснащение наземных пунктов расположения ионозондов вертикального зондирования аппаратно-программными комплексами, основанными на использовании двухчастотных навигационных приемников и специализированного математического аппарата, обеспечивающего решение обратной задачи радиопросвечивания ионосферы Земли, даст возможность существенно расширить область зондирования ионосферы. Кроме того, наличие такого комплекса в месте расположения ионозонда вертикального зондирования позволит получить детальную картину распределения электронной концентрации не только вдали от него, но и внутри самой области зондирования, вдоль траекторий всех подионосферных точек, пересекающих зону ответственности станции вертикального зондирования.

Подобная интегрированная система контроля ионосферы, построенная на основе современных высокопроизводительных вычислительных средств, позволит получить интерактивный доступ конечных потребителей к результатам обработки ионосферной информации, моделирования условий распространения радиоволн и расчетам максимально-применимых частот для задаваемых радиотрасс [29, 30]. Такая система контроля может быть крайне востребована в труднодоступных регионах земного шара, включая акватории морей и океанов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Reinisch B.W.* // Rad. Sci. 1986. V. 21. № 1. P. 331.
2. The Digisonde Portable Sounder — DPS. Technical Manual. Version 4.3 / Ed. B.W. Reinisch. Lowell: Univ. of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research, 2007.
3. *Reinisch B.W., Galkin I.A., Khmyrov G.M. et al.* // Rad. Sci. 2009. V. 44. RS0A24. <https://doi.org/10.1029/2008RS004115>
4. Радиозондирование ионосферы спутниковыми и наземными ионозондами / Под ред. С.И. Авдюшина. Тр. Ин-та прикл. геофизики им. акад. Е.К. Федорова. М.: 2008. Вып. 87.
5. *Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А.* Физика ионосферы. М.: Наука, 1988.
6. *Намазов С.А., Новиков В.Д.* // Ионосферные исследования. 1980. № 30. С. 87.
7. *Evans J.V.* // Proc. IEEE. 1969. V. 57. № 4. P. 496.
8. *Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В.* Прогнозирование состояния ионосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1980.
9. *Куницын В.Е., Терещенко Е.Д.* Томография ионосферы. М.: Наука, 1991.
10. *Davies K., Hartmann G.K.* // Rad. Sci. 1997. V. 32. № 4. P. 1695.
11. *Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск, 2006.
12. *Яковлев О.И., Гришмановский В.А., Елисеев С.Д. и др.* // Докл. АН СССР. 1990. Т. 315. № 1. С. 101.
13. *Солодовников Г.К., Синельников В.М., Крохмальников Е.Б.* Дистанционное зондирование ионосферы Земли с использованием радиомаяков космических аппаратов. М.: Наука, 1988.
14. *Bauer S.I., Bluml L.I., Donley I.L. et al.* // J. Geophys. Res. 1964. V. 69. № 1. P. 186.
15. *Alpert I.L.* // Space Sci. Rev. 1976. V. 18. № 5–6. P. 551.
16. *Гетманцев Г.Г., Грингауз К.И., Ерухимов Л.М. и др.* // Радиофизика. 1968. Т. 11. № 5. С. 649.
17. *Hussey G.C., Schlegel K., Haldoupis C.* // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № 4. P. 6991.
18. *Андреев В.А., Смирнов В.М.* // РЭ. 1993. Т. 38. № 7. С. 1326.
19. *Смирнов В.М.* // РЭ. 2001. Т. 46. № 1. С. 47.
20. *Смирнов В.М., Смирнова Е.В.* // Журн. радиоэлектроники. 2010. № 6. <http://jre.cplire.ru/jre/jun10/3/text.pdf>.
21. *Смирнов В.М., Смирнова Е.В., Тынянкин С.И. и др.* // Гелиогеофизические исслед. 2013. № 4. С. 32.
22. *Smirnov V.M., Smirnova E.V., Ruzhin Yu.Ya. et al.* // XXXI URSI General Assembly and Scientific Symp. Beijing. 16–23 Aug. 2014. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2014.692979>

23. *Smirnov V.M., Smirnova E.V.* // Resources Environment and Inform. Engineering. 2019. №. 1. P. 29.
<https://doi.org/10.25082/REIE.2019.01.004>
24. *Смирнов В.М., Смирнова Е.В., Секистов В.Н. и др.* // РЭ. 2008. Т. 53. № 9. С. 1112.
25. *Смирнов В.М., Смирнова Е.В.* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 229.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-1-229-240>
26. *Зачатейский Д.Е., Зубков М.П., Смирнов В.М., Тынянкин С.И.* // Тр. X Межд. IEEE Сибирской конф. по управлению и связи SIBCON. Красноярск 12–13 сентября 2013. Красноярск: Сиб. федерал. ун-т, 2013. С. 115.
27. *Кашкина Т.В., Демьянов В.В., Ясюкевич Ю.В.* // Физика околоземного космического пространства. Тр. Байкальской школы по фундам. физ. (БШФФ-2015). Иркутск: ИСЗФ РАН, 2015. С. 115.
28. *Смирнов В.М., Смирнова Е.В.* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 327.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-327-335>
29. *Крюковский А.С., Лукин Д.С., Бова Ю.И.* // РЭ. 2020. Т. 65. № 12. С. 1160.
<https://doi.org/10.31857/S0033849420120128>
30. *Крюковский А.С., Лукин Д.С., Кирьянова К.С.* // РЭ. 2012. Т. 57. № 9. С. 1028.