

*Д.С. Ковалев, А.В. Тертышников, В.В. Чукин, Я.В. Глухов*

**ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ИОНОСФЕРЫ  
С АРКТИЧЕСКОГО ПЛАВУЧЕГО УНИВЕРСИТЕТА**

*D.S. Kovalev, A.V. Tertyshnikov, V.V. Chukin, Y.V. Glukhov*

**EXPERIMENTS ON IONOSPHERE RESEARCH  
ON BOARD THE ARCTIC FLOATING UNIVERSITY**

*Обсуждается содержание экспериментов по зондированию высокоширотной ионосферы по сигналам космических аппаратов глобальных навигационных спутниковых систем с Арктического плавучего университета.*

*Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, радиозондирование, спутниковая система, ГЛОНАСС, GPS.*

*Experiments on high-latitude ionosphere sensing by spacecraft signals of global navigation satellite systems on board the Arctic Floating University are discussed.*

*Key words: high-latitude ionosphere, radiosounding, satellite system, GLONASS, GPS.*

***Введение***

Актуальность исследований высокоширотной ионосферы обусловлена малой изученностью морфологии ее аномалий, необходимостью данных о состоянии ионосферы для наиболее экономичного способа передачи информации на большие расстояния — радиосвязи. Береговых станций зондирования ионосферы мало. Установка ионозондов на морских судах является уникальным проектом. Модели ионосферы для высоких широт требуют валидации. В том числе существующие и используемые в оперативной практике РОСГИДРОМЕТА [1, 2].

Данные зондирования ионосферы и магнитного поля Земли используются при мониторинге космической погоды, обеспечении безопасности коммуникационных и транспортных систем, нефтегазового комплекса, электрических генерирующих и передающих компаний.

Основой сети наблюдений за ионосферой в Российской Арктической зоне являются ионозонды вертикального и наклонного зондирования. Активно развивается радиотомографическая сеть зондирования ионосферы [1, 3] на базе стационарных навигационных приемников сигналов космических аппаратов (КА) глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС/GPS, космический сегмент мониторинга состояния околоземного космического пространства над российской Арктикой (проекты «МЕТЕОР», «Электро», «Ионозонд», «Арктика-М» и др.).

Система наземных станций зондирования высокоширотной ионосферы может быть дополнена подвижными пунктами приема сигналов навигационных КА (НКА) ГЛОНАСС/GPS/Galileo и геостационарных КА (ГКА). Для реализации этой идеи

необходим опыт натуральных экспериментов, например в рамках проекта Арктического плавучего университета.

*Методы и подходы эксперимента по зондированию ионосферы*

Метод зондирования ионосферы, предлагаемый для проведения эксперимента, имеет положительное решение на изобретение [4]. Несколько лет метод апробировался в зоне действия стенда «Сура» [5] и на Байконуре [6]. По результатам экспериментов была сформирована технология зондирования ионосферы, в которую вошли наработки технологий наклонного зондирования ионосферы, наземного и спутникового радио-зондирования ионосферы, зондирования на основе сигналов навигационных спутниковых систем, томографии ионосферы, многочастотного зондирования с ГКА [1, 4, 7].

Особенностью зондирования ионосферы сигналами навигационных и ГКА является изменение характеристик радиосигналов в ионосфере и в тропосфере из-за уменьшения фазовой скорости радиоволн, в результате движения свободных электронов, поляризации атомов и молекул воздуха. Набег фазы при распространении сигнала НКА в неидеальной среде определяется протяженностью ( $L$ ) траектории распространения сигнала между приемником и передатчиком и коэффициентом преломления среды  $n$  [1, 4]:

$$\varphi = \frac{2\pi f}{c} \int_0^L n_l dl + \varphi_0, \tag{1}$$

где  $\varphi$  — набег фазы для рабочей частоты  $f$  сигнала;  $n_l$  — коэффициент преломления сигнала вдоль трассы прохождения сигнала;  $\varphi_0$  — некоторая неизвестная начальная фаза сигнала;  $c$  — скорость света.

В ионосфере, если пренебречь малым влиянием соударений частиц среды и магнитным полем [1, 4]:

$$n_l^{\text{ионосф}} \approx 1 - \frac{40,308n_e}{f^2}, \tag{2}$$

где  $n_e$  — локальная концентрация электронов.

Навигационное оборудование GPS/ГЛОНАСС/Galileo реализует одновременно измерения групповых и фазовых задержек сигналов на нескольких частотах. Для GPS это псевдодальность  $L_1(\lambda_1)$  на частоте 1,575 ГГц и  $L_2(\lambda_2)$  на частоте 1,228 ГГц [1, 4]:

$$\begin{aligned} L_1 &= \rho' - I_1 + \lambda_1 N_1, \\ L_2 &= \rho' - I_2 + \lambda_2 N_2, \\ P_1 &= \rho' + I_1 + c(\delta t_{m_1} + \delta t_{c_1}), \\ P_2 &= \rho' + I_2 + c(\delta t_{m_2} + \delta t_{c_2}), \end{aligned}$$

где  $\rho'$  включает в себя геометрическое расстояние между приемником и НКА;  $I_{1,2}$  — задержки в тропосфере-ионосфере и другие частотно-независимые задержки;  $\lambda_1 N_1$  и

$\lambda_2 N_2$  — неизвестные начальные фазы сигналов на рабочих частотах  $f_1$  и  $f_2$ ;  $c$  — скорость света;  $\delta t_{c_{1,2}}$  и  $\delta t_{n_{1,2}}$  — инструментальные задержки сигналов в аппаратуре спутника и приемника (аппаратурная задержка при переключении частот может достигать до 30 нс и более). Для каждого приемника она индивидуальна. Поэтому приемники должны проходить регулярную поверку. В том числе на соответствие Государственному реестру средств измерений. Без выполнения этого условия результаты измерений, полученные различными авторами, в том числе и по радиотомографии ионосферы, могут быть оспорены.

Дифференциальная задержка двух сигналов пропорциональна полному электронному содержанию (ПЭС) ионосферы:

$$\Delta L = \Delta I + B, \Delta P = \Delta I + \delta,$$

где  $\Delta I$  — дифференциальная ионосферная задержка;  $B$  — неизвестная начальная фаза;  $\delta$  — неизвестная аппаратурная задержка.

Формально уравнения для групповых и фазовых измерений имеют одинаковый вид, и ионосферная задержка может быть определена с точностью до неизвестной поправки. Инструментальная задержка мало меняется на временах более нескольких дней, в то время как начальная фаза остается постоянной на временах сеанса связи. Константы оцениваются в результате экспериментов, например, при сравнении с данными базовой станции СДКМ либо с данными контрольно-поверочной станции. Константы могут задаваться в технической документации, рассчитываться с помощью модели ионосферы, по эталонным сигналам с ГКА, по данным наземных и космических ионозондов.

Абсолютное значение ПЭС определяется обычно с помощью моделей ионосферы и базовых станций с выверенными приемными устройствами, высокоточными частотомерами (водородный и рубидиевый стандарты частоты). Инструментальные задержки и неизвестные фазы для каждого спутника определяются на основе сравнения с базовыми станциями и оценок, указанных в технической документации (испытаний). Грубые оценки абсолютных значений ПЭС могут быть получены с учетом поправок системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ, WAAS, EGNOS) ГНСС ГЛОНАСС/GPS/Galileo, где предусмотрены КА ретрансляторы.

Приемник сигналов НКА настроен на прием основных рабочих частот навигационных систем. Радиосигналы с НКА представляют собой промодулированную кодом несущую частоту и эфемеридную информацию. Сигналы с НКА принимаются антенными устройствами, усиливаются, фильтруются и поступают на электронную плату приемника, где сигналы усиливаются, фильтруются и преобразуются в цифровой код. Характеристики навигационных сигналов на выходе приемника представляются в бинарной форме и/или в стандартном формате RINEX.

Приемник сигналов НКА обеспечивает автоматическое непрерывное в реальном масштабе времени определение и выдачу координат антенных устройств в системах координат WGS-84, ПЗ-90. Данные представляются в геодезической проекции с текущими отсчетами времени. Положение КА ГНСС транслируется в принимаемых сигналах.

Псевдодальности, измеряемые одночастотными навигационными приемниками, испытывают быстрые и сильные флуктуации, не связанные с вариациями ПЭС, например, из-за автоматической подстройки часов приемника (в современных приемниках эти скачки компенсируются). Фаза несущей частоты принимаемого сигнала после удаления тренда часов приобретает аппаратный шум, превышающий возможные ионосферные флуктуации для их фильтрации. Поэтому при зондировании ионосферы с использованием одночастотных навигационных приемников целесообразно анализировать изменения характеристик принимаемых сигналов по парам-тройкам наблюдаемых НКА, а лучше по сети навигационных приемников.

Для повышения точности определения ПЭС в ионосфере необходимо уменьшить влияние тропосферной задержки, т.е. использовать большие углы возвышения НКА. Кроме этого, целесообразно использовать среднюю аддитивную или среднюю геометрическую оценки ПЭС или их комбинации по используемым в расчетах частотам и видимым НКА. Вопросы расчета тропосферной задержки достаточно подробно освещены в [8–10].

Точность зондирования ионосферы и тропосферы по сигналам НКА повышается при использовании двухчастотных (многочастотных) навигационных приемников сигналов НКА. По фазовым измерениям на двух частотах ( $f_1$  и  $f_2$ ) можно рассчитать оценку ПЭС =  $I_0$  [1, 4]:

$$I_0 = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + \text{const} + nL], \quad (3)$$

где  $L_1 \lambda_1$  и  $L_2 \lambda_2$  можно заменить соответствующими значениями оценок псевдодальности до НКА из сообщений в формате RINEX — стандартной после обработки бинарных данных формы представления принятых навигационных сигналов.

В расчетах возможно комплексирование данных по фазовым измерениям и по псевдодальностям. По фазовым измерениям на трех частотах ( $f_1, f_2, f_3$ ) оценки ПЭС можно рассчитывать по их комбинации. При использовании выражения (3) для дальнейших расчетов осредненных оценок ПЭС допустимо использование модулей оценок ПЭС с количеством сочетаний двух частот из трех с последующим использованием средней аддитивной или средней геометрической оценки или их комбинаций. Возможно комплексирование одно- и двухчастотных оценок ПЭС для получения осредненной оценки ПЭС, данных фазовых измерений и псевдодальностей. При этом, в расчетах ПЭС в вертикальном столбе необходима коррекция на наклон видимого НКА:

$$I^{\text{зенит}}(t, \varphi, \lambda) = I_0(t, \varphi, \lambda) \sqrt{1 - \left( \frac{R_3}{R_3 + H_{\text{ионосф}}} \right)^2 \sin^2 \alpha}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  — зенитный угол направления на НКА;  $H_{\text{ионосф}}$  — высота ионосферного слоя;  $R_3$  — радиус Земли;  $t$  — время;  $\varphi$  — широта;  $\lambda$  — долгота приемника.

Вопросы восстановления вертикальных профилей концентрации электронов в ионосфере подробно изложены в [1–5].

Высота ионосферного слоя часто связывается с положением подионосферной точки, положение которой в зависимости от высоты НКА рассчитывается в предположении ионосферы, как тонкого слоя, что вполне реально при сравнении толщины ионосферы с протяженностью радиотрасс НКА-наземный приемник.

Наибольшие рассчитанные положения подионосферной точки представлены на рис. 1 для иллюстрации того, что в высоких широтах нет ограничений на видимость НКА и, соответственно, на зондирование высокоширотной ионосферы по сигналам КА ГНСС.

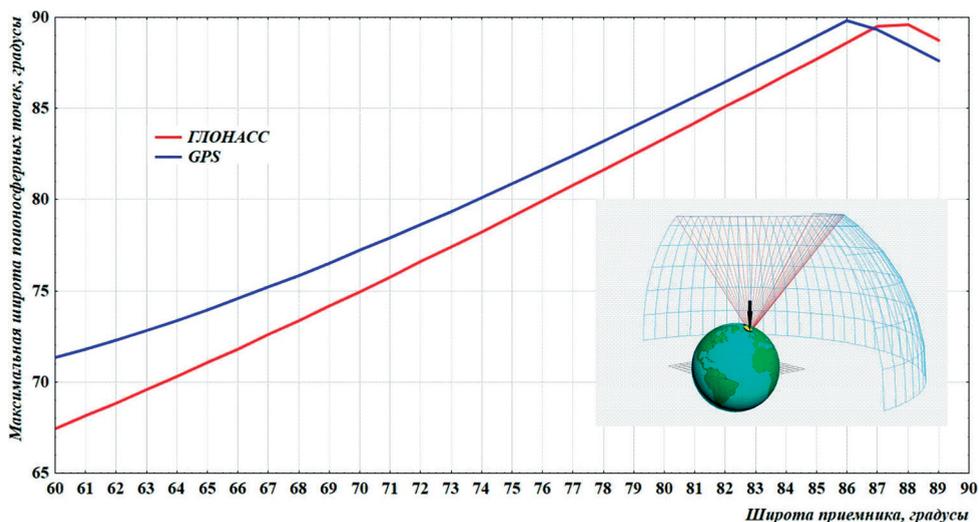


Рис. 1. Положение максимальной широты подионосферной точки в зависимости от широты приемника

При зондировании ионосферы в морских условиях с борта судна и в высоких широтах возникает ряд особенностей. Качка, возмущения магнитного поля Земли, особенности морфологии полярной ионосферы существенно влияют на оценки позиционирования, которые рассчитываются внутренними алгоритмами и программами навигационных приемников. Из-за искажений в авроральном овале ионосферы часто нарушается кодовая последовательность сигналов ГНСС, навигационные приемники начинают сообщать недостоверную информацию. За счет переотражений радиосигналов расширяется зона видимости наблюдаемых НКА, но обработка сигналов с них оказывается невозможной.

Общая перспектива проведения экспериментов по зондированию ионосферы с морских судов заключается не только в исследовании морфологии высокоширотной ионосферы и влияния гелиогеофизических условий на прием сигналов ГНСС, но и в создании подвижного пункта зондирования ионосферы в рамках проекта Арктического плавучего университета, валидация моделей ионосферы для высоких широт, а также данных, которые будут получены с космического комплекса «Ионозонд» после 2015 г. Проведение исследований в области высокоширотной ионосферы для России особенно актуально.

*Пример реализации эксперимента по зондированию ионосферы*

В 2011 г. авторы совместно с сотрудниками ЦНИИ Машиностроения участвовали эксперименте по оценке навигационной обстановки в высоких северных широтах вдоль Северного морского пути (рис. 2). В эксперименте использовались различные типы спутниковой навигационной аппаратуры. Навигационные приемники были установлены на патрульном судне береговой охраны ПС-824, осуществлявшем переход по маршруту Мурманск – Петропавловск-Камчатский – Невельск в период с 28.08.2011 по 16.09.2011.

**Судно береговой охраны ПС-824**

Рис. 2. Комплекты навигационной аппаратуры, использованные в эксперименте:  
*а* — геодезический приемник Leica Viva GS10 с антенной (ООО «Навгеоком»);  
*б* — геодезический приемник Javad Triumph V.S. с антенной и мачтой;  
*в* — геодезический приемник Javad Sigma с антенной и бухтой кабеля

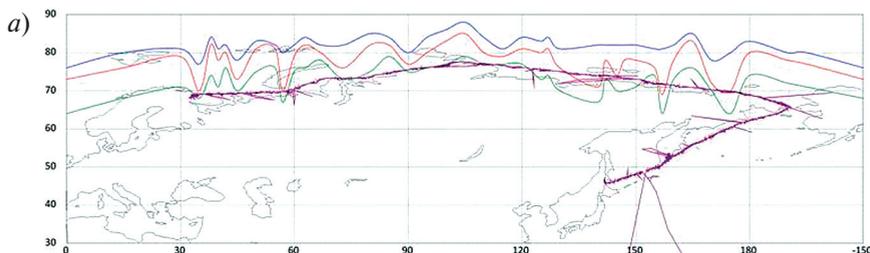
Эксперимент проводился в различных погодных и гелиогеофизических условиях. Пройденное расстояние составило 10000 км в широтном от  $35^\circ$  с.ш. до  $77,5^\circ$  с.ш. и долготном от  $33^\circ$  в.д. до  $170,5^\circ$  з.д. диапазонах. В ходе эксперимента осуществлялся мониторинг геофизических условий и апробировался многочастотный приемник Leica Viva GS10.

В результате эксперимента были получены оценки:

- состояния высокоширотной ионосферы;

- влияния гелиогеофизических условий на реальную навигационную обстановку вдоль Северного морского пути (на рис. 3 представлена трасса перехода с границами аврорального овала);
- позиционирования патрульного судна в различных режимах навигации;
- качества работы контрольно-корректирующих станций на побережьях Северного ледовитого и Тихого океанов;
- характеристик ионосферных задержек НКА GPS/ГЛОНАСС;
- регрессионных моделей связи ПЭС с характеристиками магнитного поля и др.

### Маршрут судна, восстановленный по данным, полученным в результате эксперимента



### Трасса перехода патрульного судна ПС-824 (с официальной страницы эксперимента)



Рис. 3. Трасса перехода патрульного судна ПС-824:

a — результаты расчетов; б — с официальной страницы эксперимента ФГУП ЦНИИМаш

Навигационные приемники для эксперимента предлагалось предоставить заинтересованным участникам эксперимента. Выполнение этого условия позволило выявить серьезность намерений участников эксперимента. Многие известные изготовители навигационных приемников побоялись рисковать своей репутацией и отказались предоставить заявленные для эксперимента приемники даже для кратковременных испытаний в условиях города, в том числе из-за отсутствия отметок из Государственного Реестра средств измерений.

В результате обработки данных, полученных в ходе эксперимента в 2011 г., получены оценки соответствия измерений с результатами моделирования высокоширотной ионосферы и зоны аврорального овала в различных геомагнитных условиях.

Количество ошибок определения координат и ионосферных задержек возрастало при резких скачках геомагнитной активности и резкой смене погоды.

При сравнении результатов обработки данных с ионосферной моделью IRI-2011 выявлена неоднозначность определения значения ионосферных задержек и необходимость корректировки указанной модели для высоких широт.

По результатам эксперимента запланировано сравнение полученных результатов с ионограммами, полученными с береговых станций вертикального зондирования ионосферы. Это позволит рассчитать абсолютное значение ионосферной задержки в точках наблюдения на основе данных относительных измерений.

Результаты расчетов ПЭС без учета поправки на начальную фазовую неоднозначность представлены для трех НКА GPS на рис. 4 и демонстрируют существенные расхождения.

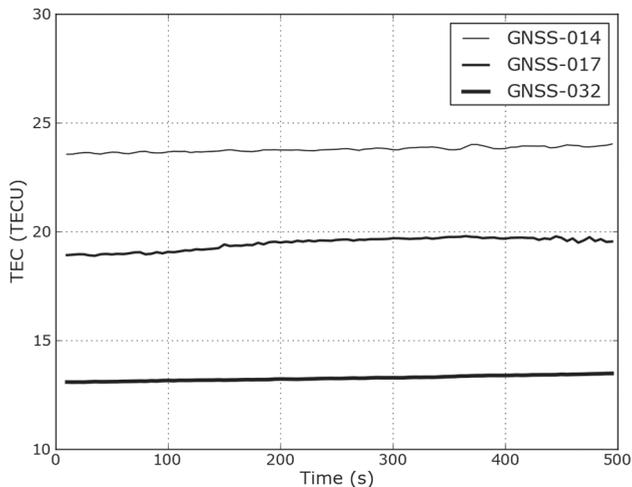


Рис. 4. Пример временного хода ПЭС ионосферы без учета поправки на начальную фазовую неоднозначность

Для обработки данных разработан программно-аппаратный комплекс, позволивший автоматизировать обработку данных в формате RINEX и представление результатов в соответствии с требованиями ионосферной службы Росгидромета. Проведенные эксперименты оказались полезными для развития исследований высокоширотной ионосферы. В 2013 г. часть эксперимента удалось выполнить на борту НЭС «Академик Федоров» в ходе экспедиции Арктического плавучего эксперимента.

### *Заключение*

Предложен и обоснован эксперимент по зондированию высокоширотной ионосферы с Арктического плавучего университета по сигналам КА ГНСС. Показана возможность реализации эксперимента вдоль Северного морского пути.

Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках научных проектов РФФИ № 14-05-00024, РФФИ № 14-05-00029 и РНФ № 14-17-00685.

### Литература

1. *Тертышников А.В., Большаков В.О.* Технология мониторинга ионосферы с помощью приемника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (GALILEO). // *Информация и космос*, 2010, т. 1, с. 100–105.
2. *Тертышников А.В., Соломенцев Д.В., Хаттатов Б.В., Хаттатов В.У., Полушковский Ю.А., Скрипачев В.О.* Определение ионосферных задержек распространения радиосигналов с помощью трехмерной ассимиляционной модели ионосферы. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. Т. 1. — М.: ИКИ РАН, 2013, с.209–214.
3. *Романов А.А., Романов А.А., Трусов С.В., Урличич Ю.М.* Спутниковая радиотомография ионосферы. — М.: Физматлит, 2013. — 295 с.
4. *Тертышников А.В., Пулинец С.А.* Способ зондирования ионосферы, тропосферы, геодвижений и комплекс для его реализации. Заявл. 07.07.2011 г. № 2011128236/(07041842)). Патент, 2011128236/07(041832).
5. *Тертышников А.В., Суворцева И.В., Фролов В.Л., Смирнов В.М.* Оценивание восстановленных по сигналам НКА ГЛОНАСС/GPS профилей электронной концентрации в ионосфере. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. Т. 3. — М.: ИКИ РАН, 2010, с. 115–119.
6. *Тертышников А.В.* Результаты эксперимента по диагностике состояния ионосферы над Байконуром по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS. — Электронный ресурс: [<http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=48>].
7. *Тертышников А.В.* Многочастотный навигационный приемник сигналов глобальных навигационных систем ГЛОНАСС/GPS Для систем бортового управления малых КА. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. Т. 4. — Москва: ИКИ РАН, 2012, с. 107–110.
8. *Чукин В.В., Алдошкина Е.С., Вахнин А.В., Канухина А.Ю., Мельникова О.А.* Мониторинг интегрального содержания водяного пара в атмосфере ГНСС-сигналами. // *Учёные записки РГГМУ*, 2010, № 12, с. 51–60.
9. *Чукин В.В., Алдошкина Е.С., Вахнин А.В., Канухина А.Ю., Мостаманди С.В., Нгуен Т.Т., Обрезкова И.В.* Восстановление вертикального профиля влажности воздуха по данным наземной регистрации спутниковых навигационных сигналов. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2010, т. 7, № 3, с. 69–74.
10. *Чукин В.В., Алдошкина Е.С., Вахнин А.В., Канухина А.Ю., Мостаманди С.В., Нигай С.Ю., Нгуен Т.Т., Савина З.С.* Ассимиляция данных ГЛОНАСС/GPS в региональную численную модель прогноза погоды WRF-ARW. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2011, т. 8, № 3, с. 76–82.