

А.В. Тертышников, Я.В. Глухов

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ
В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ВДОЛЬ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ
28.08.2011–16.09.2011**

A. V. Tertyshnikov, Y. V. Glukhov

**EXPERIMENTAL RESULTS OF SOUNDINGS HIGH LATITUDE
IONOSPHERE SOUNDINGS ALONG THE NORTHERN SEA ROUTE FROM
28.08.2011 TILL 16.09.2011**

Получены оценки состояния ионосферы Северного морского пути. Зондирование проводилось с патрульного судна береговой охраны по сигналам навигационных КА GPS/ГЛОНАСС. Результаты эксперимента показали возможность реализации технологии зондирования высокоширотной ионосферы с морских судов.

Ключевые слова: ионосфера, зондирование, эксперимент, позиционирование, КА, GPS/ГЛОНАСС, авроральный овал, главный ионосферный провал, навигационный приемник, судно.

Estimates of ionosphere's state of the Northern Sea Route are obtained. The sounding was conducted from the patrol vessel of coast-guard on signals of GPS/GLONASS navigational space vehicles. The results of experiment showed the ability to realize sounding technologies of high-latitude ionosphere from ship vessels.

Key words: ionosphere, sounding, experiment, positioning, satellite, GPS/GLONASS, auroral oval, the main ionospheric trough, navigation receiver, ship.

Введение

Нарастание конфликтного потенциала в Арктике и риски столкновения национальных интересов приарктических государств обуславливают совершенствование системы и технологий гелиогеофизического мониторинга высоких широт. При этом особую роль играет мониторинг околоземного космического пространства и ионосферы. Для зондирования ионосферы по всему миру используется более 150 наземных ионозондов, более 3 тысяч навигационных приемников сигналов КА GPS/ГЛОНАСС, разработаны технологии мониторинга ионосферы с помощью приемника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (Galileo) [1, 2].

Традиционной особенностью зондирования ионосферы по сигналам КА GPS/ГЛОНАСС является стационарное расположение навигационных приемников, функционирование которых критично к динамическим нагрузкам. Иначе сложно выполнить высокоточные измерения ионосферных задержек сигналов КА GPS/ГЛОНАСС. Условие квазистатичности мультисигментного навигационного приемника препятствует применению технологии зондирования ионосферы по сигналам КА GPS/ГЛОНАСС с борта морских и океанских судов, в том числе в высоких широтах вдоль Северного

морского пути. Ионосфера над огромными территориями морей и океанов остается мало исследованной.

Для зондирования ионосферы Земли над морями и океанами активно реализуются космические программы, используются модели ионосферы. Но возможность подвижного зондирования ионосферы по сигналам КА GPS/ГЛОНАСС остается весьма актуальной. Требуется проверка технологии зондирования ионосферы по сигналам КА GPS/ГЛОНАСС в реальных условиях с борта морского судна.

Основные сведения об эксперименте

В 2011 г. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения ФГУП ЦНИИМаш организовал эксперимент по оценке навигационной обстановки в высоких северных широтах вдоль Северного морского пути. В эксперименте испытывались различные типы спутниковой навигационной аппаратуры (рис. 1) при переходе патрульного судна береговой охраны ПС-824 (рис. 2) по маршруту Мурманск — Петропавловск-Камчатский — Невельск 28.08.2011—16.09.2011 (рис. 3). Попутно удалось провести проверку технологии зондирования ионосферы по сигналам КА GPS/ГЛОНАСС [1, 2] в реальных условиях с борта морского судна.



Рис. 1. Комплекты навигационной аппаратуры, использованные в эксперименте:
а — геодезический приемник Viva GS10 (Leica) с антенной (ООО «Навгеоком»);
б — геодезический приемник Triumph V.S. (Javad) с антенной и мачтой;
в — геодезический приемник Sigma (Javad) с антенной и бухтой кабеля

Эксперимент проводился в различных погодных гидрографических и гелиогеофизических условиях. Пройденное расстояние вдоль Севморпути составило более 10 000 км. На основе полученных с навигационных приемников характеристик сигналов КА GPS/ГЛОНАСС рассчитывались оценки состояния высокоширотной ионосферы.

Навигационные приемники для эксперимента отбирались по результатам предварительного тестирования устойчивости их работы на движущемся автомобиле. Имитация динамических возмущений из-за тряски, толчков, вибраций позволила оценить устойчивость эталонных генераторов и алгоритмов приемовычислителей навигационных приемников, уровень возникающих фазовых ошибок слежения. Этот этап позволил выявить серьезность намерений потенциальных участников эксперимента. Многие из претендентов на участие в эксперименте и представителей изготовителей известных навигационных приемников осознали риск потери имиджа и навигационного оборудования.



Рис. 2. Судно береговой охраны ПС-824

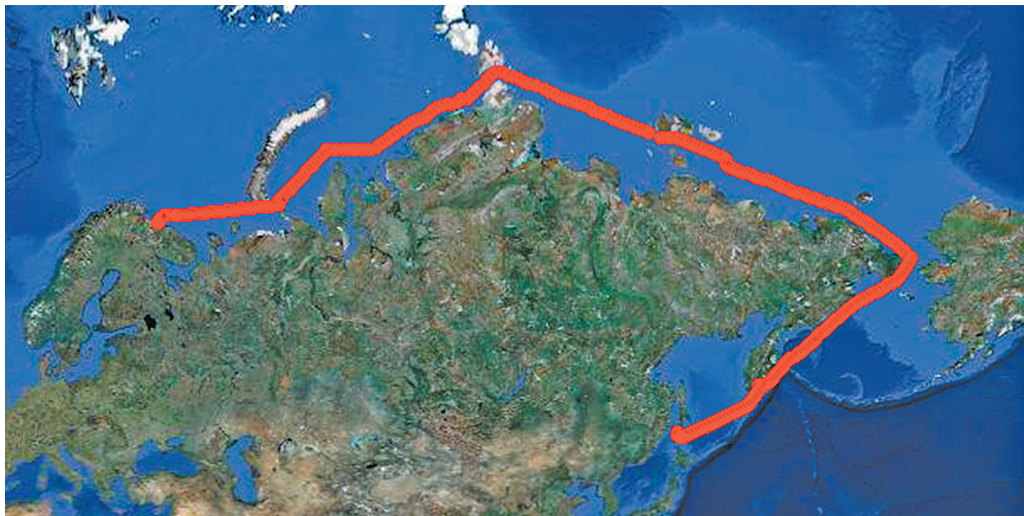


Рис. 3. Трасса перехода патрульного судна ПС-824
(с официальной страницы эксперимента ФГУП ЦНИИМаш)

Для зондирования ионосферных задержек и морфологии аномалий ионосферы по характеристикам сигналов КА GPS/ГЛОНАСС использовались модели ионосферы и кодовые измерения псевдодальности на 2-х частотах [1]:

$$I_{code} = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_2 - P_1) + \sigma P], \quad (1)$$

где σP — ошибка измерения дальности по P коду; f_1 и f_2 — рабочие частоты навигационных КА; P_1 и P_2 — псевдодальность, измеренная на рабочих частотах.

Данные, полученные подобным образом, сильно зашумлены, средний уровень шума подобных измерений составляет 30–50 %, однако позволяют добиться абсолютных значений ПЭС с точностью до аддитивной константы, зависящей от аппаратуры пар «навигационный спутник — приемник». Более стабильными являются расчеты при использовании измерений псевдодальности по набегу фаз [2]. Однако и в этом случае необходимо учитывать неопределенность в ошибке измерения фазы и неоднозначность фазовых измерений. Поэтому при расчете значений ПЭС с помощью значений характеристик сигналов GPS/ГЛОНАСС используется комбинация измерений псевдодальности и фазы. На рис. 4 представлено сравнение данных об относительных значениях ПЭС вдоль лучей «спутник-приемник», полученных с использованием измерений псевдодальности (рис. 4б) и комбинации измерений (рис. 4а).

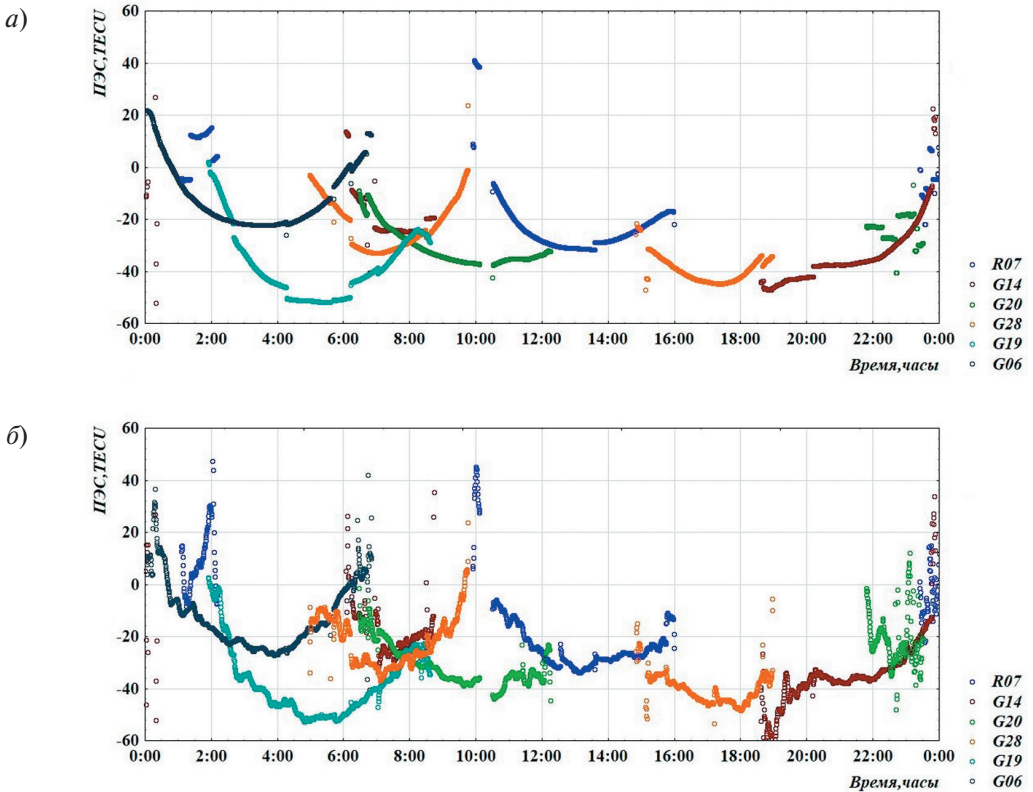


Рис. 4. Данные об относительных значениях ПЭС вдоль лучей «спутник–приемник»: а — комбинация измерений псевдодальности и фазы; б — псевдодальностные измерения

$$I_{\text{phase}} = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \left[(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + \text{const}_{1,2} + \sigma L \right], \quad (2)$$

где σL — ошибка измерения фазы; L_1 и L_2 — измерения фазы на рабочих частотах; $\text{const}_{1,2}$ — неоднозначность фаз; λ_1 и λ_2 — длины волн несущих частот.

Для минимизации эффектов тропосферной рефракции обычно используются наблюдения сигналов навигационных КА, положение которых близко к зениту. Для зондирования ионосферы в высоких широтах это невыполнимо. Наклон наблюдаемого КА учитывается при расчете «вертикальных задержек» принимаемых радиосигналов. Задержки пропорциональны интегральному или полному содержанию электронов (ПЭС или ТЕС) в вертикальном столбе атмосферы [1]. Ошибка в определении положения около 15 см соответствует примерно 1016 электронов (1ТЕСУ) в вертикальном столбе атмосферы единичной площади. При этом ионосфера представляется тонким слоем. Эти особенности реализованы в авторской программе [3], позволяющей оценивать мгновенные характеристики позиционирования приемника, которые могут существенно отличаться от усредненных результатов на выходе приемника. Но за какой период и как происходит осреднение — неизвестно. Это особенность внутренних алгоритмов, которые могут корректироваться при подготовке приемника.

Алгоритмы осреднения в блоках приемовычислителей навигационных приемников позволяют стабилизировать выдаваемые результаты. Однако подобная фильтрация кажущихся ошибок позиционирования не выгодна для диагностики спектра качки судна и волнения моря, рефракции радиосигналов при пересечении границ аврального овала и главного ионосферного провала, т.е. для диагностики морфологии высокоширотной ионосферы.

Кажущиеся ошибки позиционирования, рассчитываемые с помощью программы [3], интересны для диагностики геофизических эффектов. При этом, для учета движения и качки судна в расчеты позиционирования в [3] кроме мгновенных определений кажущегося позиционирования вводилось осреднение расчетных данных за достаточно продолжительный отрезок наблюдений. Таким образом, в [3] была реализована возможность имитации перенастройки внутренних алгоритмов фильтрации приемовычислителей навигационных приемников. Ширина используемого интервала осреднения расчетных данных в [3] при стандартной частоте выдачи приемниками результатов позиционирования в 1 Гц определялась по результатам спектрального анализа и стабилизации рассчитываемых оценок среднеквадратического отклонения (СКО) анализируемых характеристик. Наиболее приемлемой для проведения расчетов оказалась ширина окна осреднения в 30, 60, 180, 300 и 600 с. В спокойных условиях при незначительном волнении моря оценки СКО характеристик позиционирования стабилизировались за десять измерений, в штормовых условиях при сильной качке продолжительность стабилизации СКО возрастала до 15–20 мин. Валидация программы [3] проводилась при сравнении с данными модели ионосферы IRI — 2011.

Для определения координат приемника и вариаций ПЭС достаточно данных об измерении псевдодальности и разности фаз на 2–3-х частотах [4, 6]. В случае если одна из этих характеристик отсутствует в данных наблюдений, что может быть обусловлено диагностируемыми возмущениями атмосферы, то данные этого КА не учитываются при определении координат приемника.

Перед расчетом координат приемника проверяется количество сигналов спутников, характеристики которых являются полными. Если таковых не хватает для определения координат приемника, координаты не рассчитываются. Фиксируется сбой. Расчет координат осуществляется путем решения следующего матричного уравнения:

- при 4-х наблюдаемых спутниках: $X = -A^{-1}l$;
- при большем количестве наблюдаемых спутников: $X = -(A^T A)^{-1} (A^T l)$, где X – вектор поправок к приближенным координатам приемника в декартовой системе координат; A – матрица единичных векторов топоцентрического направления на спутник:

$$A = \begin{bmatrix} -u_X^1 & -u_Y^1 & -u_Z^1 & 1 \\ -u_X^2 & -u_Y^2 & -u_Z^2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -u_X^i & -u_Y^i & -u_Z^i & 1 \end{bmatrix},$$

\vec{u}^i – единичный вектор топоцентрического направления на спутник:

$$u^i = \begin{bmatrix} \frac{X^i - (X_A)^0}{(\rho_A^i)^0} & \frac{Y^i - (Y_A)^0}{(\rho_A^i)^0} & \frac{Z^i - (Z_A)^0}{(\rho_A^i)^0} \end{bmatrix},$$

X^i, Y^i, Z^i – координаты i спутника; $(X_A)^0, (Y_A)^0, (Z_A)^0$, – априорные координаты приемника; $(\rho_A^i)^0$, – приближенное значение геометрической дальности до спутника:

$$(\rho_A^i)^0 = \sqrt{(X^i - (X_A)^0)^2 + (Y^i - (Y_A)^0)^2 + (Z^i - (Z_A)^0)^2},$$

l – матрица свободных членов:

$$l_A^i = (\rho_A^i)^0 - P_A^i(t) + I_A^i + T_A^i - cdt^i(t - \tau_A^i),$$

i – индекс спутника; $P_A^i(t)$ – псевдодальность; I_A^i – значение ионосферной задержки сигнала, вычисленное двухчастотным способом; T_A^i – значение тропосферной задержки, вычисленное по модели стандартной атмосферы; $cdt^i(t - \tau_A^i)$ – величина поправки часов спутника, определенная по данным навигационного сообщения ГНСС.

Решение матричного уравнения проводится методом последовательных приближений, в качестве априорных координат приемника используются координаты, записываемые приемником в заголовке RINEX файла. В соответствии с [15] при ошибке положения в 8 000 км достаточно 4-х итераций.

Дополнительным этапом уточнения положения эпицентральной зоны сильных возмущений атмосферы является сравнение (при наличии) с результатами наблюдений сейсмической и инфразвуковой сети [1, 2].

Результаты обработки навигационных данных

На рис. 5 представлены результаты расчета оценок позиционирования экспедиционного судна в ходе эксперимента с помощью программы [3] по характеристикам принимаемых сигналов КА GPS/ГЛОНАСС с различной дискретностью представления анализируемых данных. При высокой частоте измерений проявляются существенные вариации оценок кажущегося позиционирования судна. Использование сглаживающего фильтра позволяет получать более правдоподобные результаты.

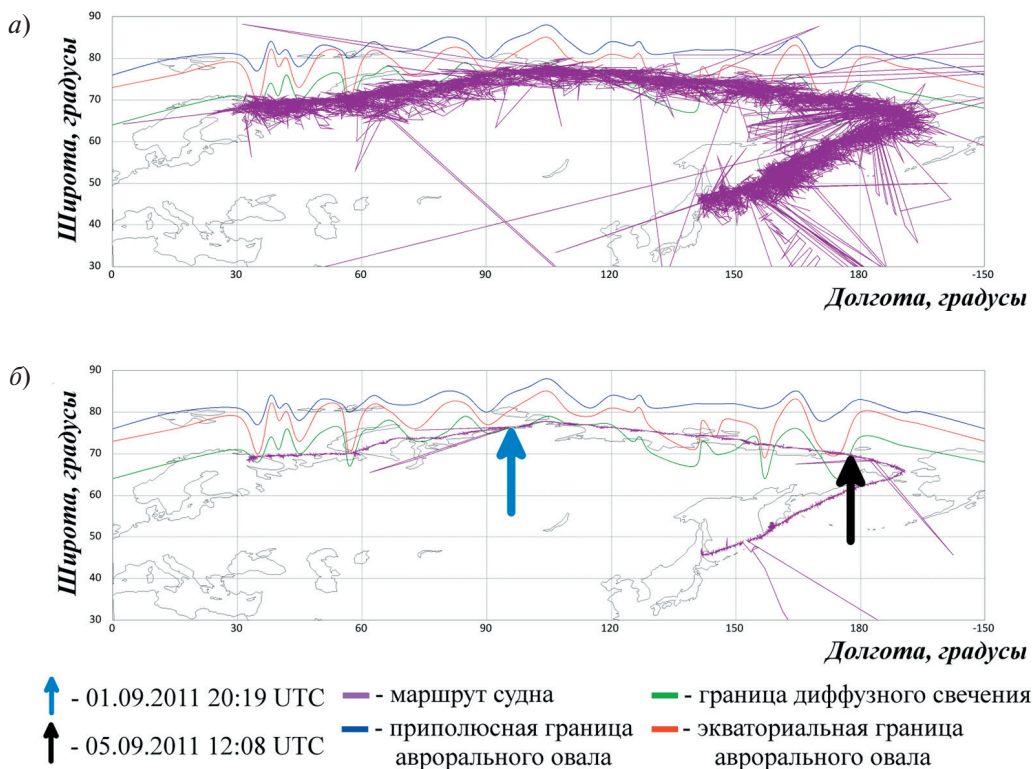


Рис. 5. Рассчитанный маршрут судна: *a* — с дискретностью оценок измерений 30 с и без фильтрации; нижний фрагмент; *b* — с дискретностью оценок измерений 15 мин и фильтром в 600 с

Для диагностики влияния морфологии высокоширотной ионосферы в различных гелиогеофизических условиях на прохождение сигналов навигационных КА проводилось графическое сопоставление рассчитанного по модели [4] положения аврального овала с результатами расчета траектории движения судна. Положение аврального овала определялось границами положения приполюсной границы, экваториальной границы овала и экваториальной границы диффузного свечения. Полученные результаты расчета относительного значения ПЭС по созвездию видимых навигационных КА

представлены на рис. 6 для данных с приемников Javad Sigma (рис. 6а), Javad Triumph V.S. (рис. 6б), Leica Viva GS10 (рис. 6в).

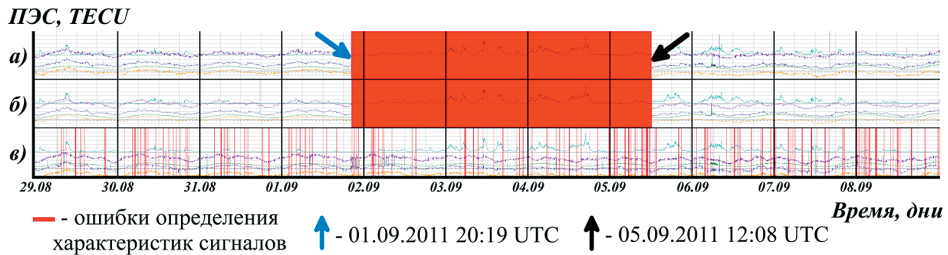


Рис. 6. Результаты расчета ПЭС над приёмниками в ходе эксперимента:
а — приемник Javad Sigma; б — приемник Javad Triumph; в — приемник Leica Viva GS10

Красными вертикальными линиями на графике обозначены срывы расчета относительного значения ПЭС в результате ошибок определения характеристик сигналов видимого созвездия спутников. По оси абсцисс отложено текущее время эксперимента. Синяя и чёрная стрелки на графике соответствуют границам 01.09.2011 20:19 UTC и 05.09.2011 12:08 UTC. За это время могло пересекать модельную границу аврорального овала несколько раз. При этом отсутствовало поступление данных с обоих приемников Javad. При возможном объяснении этого инцидента и отсутствии каких-либо поясняющих записей в журнале проведения эксперимента и судовом журнале можно предположить, что оба приемника не прошли предварительную подготовку для работы в высоких широтах. Однако в остальное время с этих приемников не наблюдалось существенных ошибок определения характеристик сигналов навигационных КА. Т.е. внутренние алгоритмы фильтров приемовычислителей, обеспечивающих стабильность навигационных определений, особенно для условий средних широт и за счет меньшей чувствительности к вариациям ПЭС, функционировали нормально. Чем было вызвано пятидневное молчание приборов остается неясным.

Для приемника Leica поток ошибок в данных уменьшался при удалении от границ аврорального овала. В период 01.09 20:19 — 05.09 12:08 количество ошибок увеличилось в 1,3 раза по сравнению с периодом 29.08 0:00 — 01.09 20:18 и в 1,4 раза по сравнению с 11.09 16:00 — 15.09 10:00. Возможно, что алгоритмы фильтров приемовычислителя приемника Leica имели более широкий диапазон или автоматическую подстройку. После выхода судна за границы аврорального овала ошибки в данных приемника Leica возникали после скачков АЕ-индекса [5] на значения порядка 100 нТл (рис. 7а и 7б).

Синей линией на рис. 7 обозначены относительные оценки ПЭС в точках над приемником, восстановленные по данным эксперимента, зеленой — оценки ПЭС по ионосферной модели IRI-2011, фиолетовой кривой — относительные оценки ПЭС по сигналам НКА ГЛОНАСС, оранжевой кривой — относительные оценки ПЭС по сигналам НКА GPS, синей кривой — относительные оценки по смешанным сигналам ГЛОНАСС/GPS, голубой — изменение геомагнитного индекса АЕ.

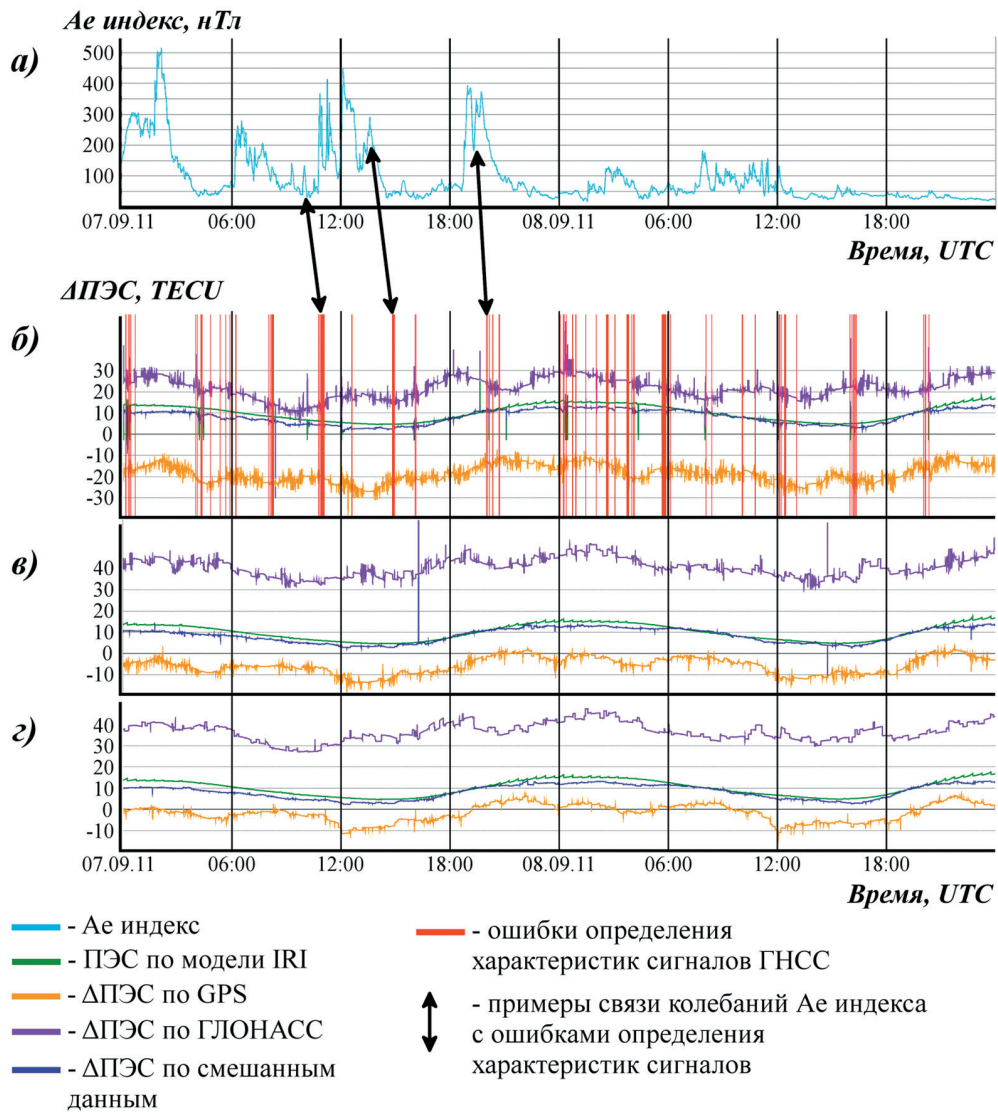


Рис. 7. Результаты обработки данных за 07–08.09.2011:
а – изменение Ae индекса; б – Leica; в – Sigma; з – Triumph

При сравнении рассчитанных данных ПЭС было установлено:

- относительные оценки ПЭС по данным GPS сигналов значительно ниже значений по модели IRI-2011;
- относительные оценки ПЭС по данным ГЛОНАСС сигналов выше данных по модели IRI-2011;
- сумма относительных оценок ПЭС более соответствует оценкам модели IRI-2011.

Во всех случаях значения ПЭС по модели IRI-2011 отличались от экспериментальных оценок на разную величину, что связано с разными значениями аддитивных констант для пар «спутник–приемник». Для компенсации этих констант и приведения данных всех пар «спутник–приемник» к общему виду было принято решение о разработке способа валидации данных приемников с использованием модельных данных.

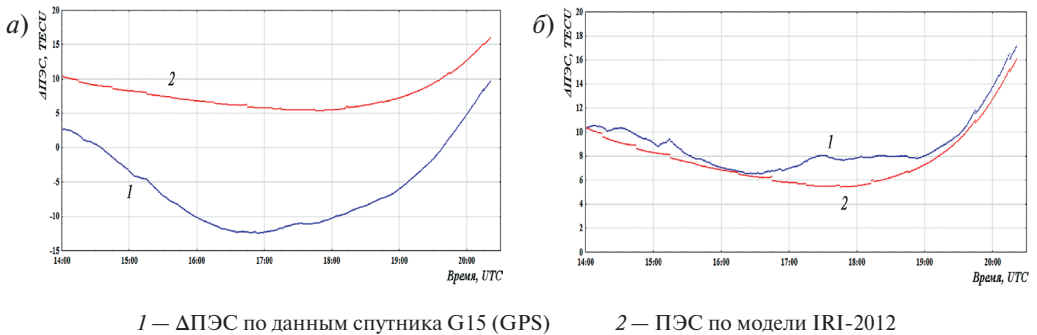
Способ валидации данных приемников сигналов ГНСС GPS/ГЛОНАСС

Общая суть способа валидации данных приемников основывается на том предположении, что величина аддитивной константы, получаемой при расчете величины ПЭС псевдодальностным методом (1), а следовательно, и при комбинации псевдодальностного и фазового метода зависит исключительно от задержек сигналов в аппаратуре спутника и приемника и является постоянной величиной для одних и тех же пар «спутник — приемник» на временных отрезках более нескольких дней. Расчет аддитивных констант заключается в приведении величин ПЭС к ионосферной модели IRI путем решения следующей регрессионной модели:

$$I_{IRI} = I + \cos \left[\arcsin \left(\frac{R_E}{R_E + H_{\max}} \cos \theta_S \right) \right] \sigma I, \quad (3)$$

где I_{IRI} — значение ПЭС по модели IRI-2012; I — экспериментально определенное значение ПЭС; R_E — радиус Земли; H_{\max} — высота максимума электронной концентрации; θ_S — угол направления на спутник; σI — искомая аддитивная константа.

Пример использования данного способа для спутника G15 представлен на рис. 8.



1 — ΔПЭС по данным спутника G15 (GPS) 2 — ПЭС по модели IRI-2012

Рис. 8. Пример применения способа валидации данных приемника:
а — до валидации; б — после валидации

В связи со слабым качеством моделирования ПЭС в высоких широтах было принято решение произвести расчет аддитивных констант для подионосферных точек, которые расположены ниже 60° с.ш., после чего применить полученные константы ко всему временному ряду экспериментальных данных. В результате сравнения

восстановленных значений ПЭС с данными модели IRI выявлено понижение качества моделирования в дневные часы. На рис. 9 красными стрелками обозначены точки графика, где значения модели отличаются от экспериментальных на величины около 7 TECU. Это обусловлено сложными гелиогеофизическими условиями [6]. Дальнейший анализ данных и разработка рекомендаций для моделирования высокоширотной ионосферы возможен при сравнении полученных результатов с ионограммами, полученными с высокоширотных станций вертикального зондирования ионосферы, а также при учете местного времени и солнечной активности.

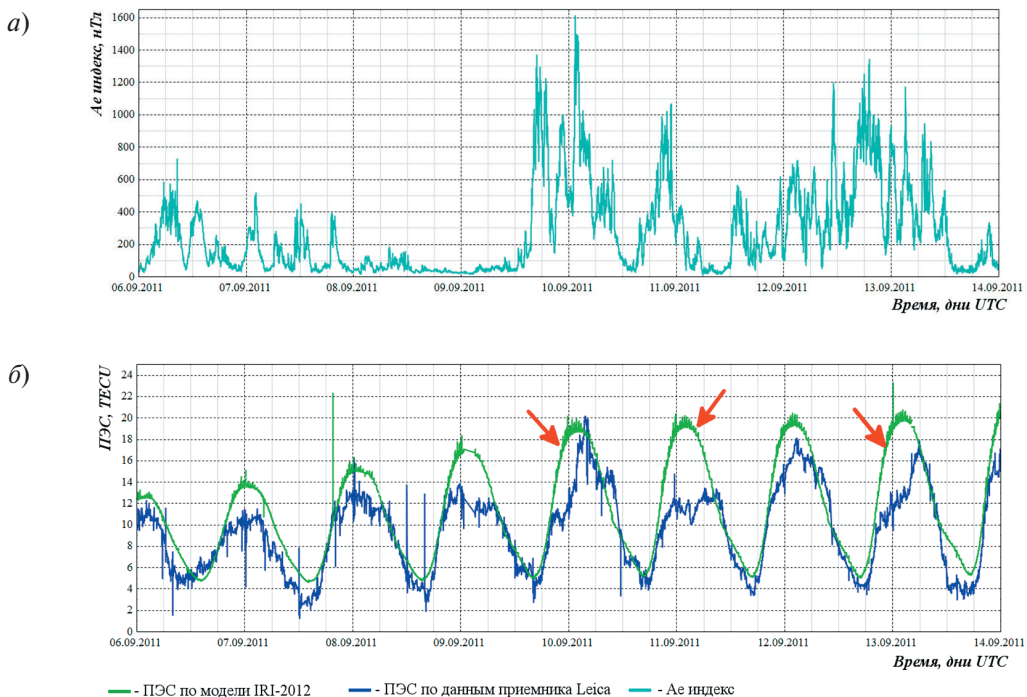


Рис. 9. Результаты восстановления значений ПЭС за период 06.09–14.09:
 а — колебания А_е индекса; б — восстановленные значения ПЭС

Выводы

В результате проведения эксперимента по зондированию высокоширотной ионосферы вдоль Севморпути с морского судна по сигналам НКА получены уникальные результаты о сложной морфологии аврорального овала и влиянию гелиогеофизических условий на качество навигационных определений. Получено доказательство возможности использования адаптированного способа зондирования ионосферы по сигналам НКА с борта морского судна вдоль Севморпути. По результатам обработки данных эксперимента установлено удовлетворительное соответствие данных измерений с результатами

моделирования высокоширотной ионосферы вне зоны аврорального овала в различных геомагнитных условиях. Разработан способ валидации данных приемников для расчета ПЭС в высокоширотной ионосфере. Отмечено существенное влияние магнитных возмущений на результаты зондирования морфологии аврорального овала.

Исследование высокоширотной ионосферы является важнейшим аспектом обеспечения радиосвязи на севере России. В связи с небольшим количеством станций вертикального и наклонного зондирования высокоширотной ионосферы крайне важно развивать технологию подвижного зондирования ионосферы и накапливать информацию о состоянии авроральной области ионосферы с целью повышения качества навигации и радиосвязи в высоких широтах и вдоль Севморпути.

Литература

1. *Тертышников А.В., Большаков В.О.* Технология мониторинга ионосферы с помощью приемника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (Galileo). // Информатика и космос, 2010, № 1, с. 100–105. *Tertyshnikov A.V., Bolshakov V.O.* Tekhnologiya monitoringa ionosfery s pomoshchyu priyemnika signalov navigatsionnykh KA GPS/GLONASS (Galileo). // Informatsiya i kosmos, 2010, № 1, s. 100–105.
2. *Тертышников А.В., Пулинец С.А.* Способ зондирования ионосферы, тропосферы, геодвижений и комплекс для его реализации. // Патент, 2011128236/07(041832) от 07.07.2011. *Tertyshnikov A.V., Pulinets S.A.* Sposob zondirovaniya ionosfery, troposfery, geodvizheniy i kompleks dlya yego realizatsii. // Patent, 2011128236/07(041832) ot 07.07.2011.
3. *Глухов Я.В.* Программа расчета относительных значений полного электронного содержания по характеристикам ГНСС ГЛОНАСС/GPS/Galileo. // Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619293, ФИПС, 01.10.2013. *Glukhov Ya.V.* Programma rascheta odnositelnykh znacheniy polnogo elek-tronnogo sodержaniya po kharakteristikam GNSS GLONASS/GPS/Galileo. // Svidetelstvo gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2013619293, FIPS, 01.10.2013.
4. *Важенин А.А., Паньшин Е.А.* Программа расчета границ аврорального овала и диффузионного свечения. // Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012619841, ФИПС, 01.09.2012. *Vazhenin A.A., Panshin Ye.A.* Programma rascheta granits avroralnogo ovala i diffuzionnogo svecheniya. // Svidetelstvo gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2012619841, FIPS, 01.09.2012.
5. *Тертышников А.В. и др.* Магнитные индексы. Учебное пособие. — Москва-Обнинск, 2013. — 278 с. *Tertyshnikov A.V. i dr.* Magnitnyye indeksy. Uchebnoye posobiye. — Moskva-Obninsk, 2013. — 278 s.
6. *Тертышников А.В.* Возможные коррективы критериев опасных гелиогеофизических явлений. // Гелиогеофизические исследования. — [<http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=178>]. *Tertyshnikov A.V.* Vozmozhnyye korrektyvy kriteriyev opasnykh geliogeofizicheskikh yavleniy. //Geliogeofizicheskiye issledovaniya. — [<http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=178>].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-05-00029 и № 14-05-10024.