



УДК 550.8.054

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ЗОНДИРОВАНИЮ ИОНОСФЕРЫ С КИСЛОВОДСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

А.В. Тертышников¹¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, г. Москва, Россия

Представлены примеры результатов зондирования ионосферы с Кисловодской обсерватории (ГАС ГАО РАН) с помощью геодезического навигационного приемника сигналов КА ГНСС МГУ (ГАИШ МГУ). Рассчитано интегральное содержание электронов в вертикальном столбе атмосферы и профили концентрации электронов по высоте. Представленная технология предлагается для исследования гелиогеофизических эффектов.

Ключевые слова: ИОНОСФЕРА, ГЛОНАСС, GPS, ИОНОСФЕРНАЯ ЗАДЕРЖКА, СОДЕРЖАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ, ПРИЕМНИК, ТЕХНОЛОГИЯ, МОДЕЛЬ, ЭКСПЕРИМЕНТ, ЗОНДИРОВАНИЕ

DOI: 10.54252/2304-7380_2021_30_9

1. ВВЕДЕНИЕ

При создании ведомственной сети зондирования ионосферы на основе геодезических приемников сигналов Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) Росгидромета рассматривалась возможность использования приемников других министерств и ведомств. При этом не был решен вопрос о ведущей организации по архивации и хранению данных. Архивация – одна из функций мониторинга [1, 2].

Межведомственного взаимодействия не получилось. Но были получены многочисленные результаты по апробации «чужих» навигационных приемников для зондирования ионосферы и влагосодержания атмосферы по сигналам ГНСС. Например, в эксперименте вдоль Северного морского пути [3], на «Суре» [4], в Приэльбрусье [5] и т.д. При взаимодействии с ГАИШ МГУ в 2015 г. в качестве примера был апробирован профессиональный геодезический приемник «Торсон». Он был установлен на Кисловодской Горной астрономической станции Главной астрономической обсерватории (ГАС ГАО РАН) и предназначен для диагностики геодвижений и временной привязки аппаратуры. На рис. 1 виден конус крышки его антенны на крыше обсерватории.

На авторскую технологию зондирования ионосферы, использованную при проведении эксперимента, было получено положительное решение на изобретение [6]. Технология позволяет зондировать интегральное и вертикальные профили содержания заряженных частиц в атмосфере на основе комплексной диагностики ионосферных и тропосферных (что для ГАС ГАО не столь актуально из-за высоты расположения 2200 м над уровнем моря) задержек сигналов навигационных космических аппаратов (НКА) ГНСС.



Рис. 1 Антенна приемника сигналов ГНСС на крыше здания ГАС ГАО РАН (май 2015 г.)

2. МЕТОДИКА ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Основной метод просвечивания ионосферы сигналами НКА является изменение характеристик радиосигналов со спутников в ионосфере и в тропосфере из-за уменьшения фазовой скорости радиоволн, поляризации молекул водяного пара в магнитном поле Земли [6-8]. Набег фазы при распространении сигнала НКА в неидеальной среде определяется протяженностью траектории распространения сигнала L между приемником и передатчиком и коэффициентом преломления среды n [6, 7]:

$$\phi = \frac{2\pi f}{c} \int_0^L n_l dl + \phi_0, \quad (1)$$

где, ϕ – набег фазы для рабочей частоты f сигнала, n_l – коэффициент преломления сигнала вдоль трассы прохождения сигнала, ϕ_0 – некоторая неизвестная начальная фаза сигнала, c – скорость света, f – частота.

В ионосфере, если пренебречь малым влиянием соударений частиц среды и магнитного поля:

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

где n_e – локальная концентрация электронов.

GPS/ГЛОНАСС (Galileo)-навигационное оборудование 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.

Дифференциальная задержка двух сигналов пропорциональна полному электронному содержанию ионосферы (ПЭС): $\Delta L = \Delta I + B$, $\Delta P = \Delta I + \delta$, где ΔI – дифференциальная ионосферная задержка (в которую, обычно, включают и тропосферную задержку), B – неизвестная начальная фаза, δ – неизвестная аппаратная 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.

Абсолютное значение ПЭС определяется обычно с помощью моделей ионосферы и базовых станций выверенными приемными устройствами. 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 на основе поправок системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ, SBAS) ГНСС ГЛОНАСС/GPS, где предусмотрены ретрансляторы – геостационарные КА.

Приемник сигналов навигационных КА 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. Вопросы расчета тропосферной задержки достаточно подробно освещены в [8].

По фазовым измерениям на двух частотах (f_1 и f_2) можно рассчитать оценку ПЭС= I_0 :

$$I_0 = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + const + nL], \quad (3)$$

где $L_1 \lambda_1$ и $L_2 \lambda_2$ можно заменить соответствующими значениями оценок псевдодальности до КА из RINEX-сообщений – стандартной после обработки бинарных данных формы представления характеристик принятых навигационных сигналов.

В расчетах ПЭС в вертикальном столбе необходима коррекция на наклон видимого НКА:

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

где α – зенитный угол направления на НКА, $H_{ионосф}$ – высота ионосферного слоя, R_3 – радиус Земли, t – время, φ – широта, λ – долгота приемника.

Вопросы восстановления вертикальных профилей концентрации электронов в ионосфере на основе решения интегральных уравнений Фредгольма первого рода, относящихся к классу обратных некорректно поставленных задач атмосферной рефракции, подробно изложены в [8-10].

Технология зондирования ионосферы по сигналам ГНСС включает следующие этапы:

- прием сигналов ГНСС с помощью приемовычислителей навигационного приемника с записью данных на карту памяти или на внутреннюю память процессора,
- конвертирование полученных данных в установленный для последующей обработки формат (обычно RINEX),
- обработка полученных данных и расчет характеристик позиционирования приемной антенны навигационного приемника,
- расчет ПЭС,
- расчет вертикальных профилей концентрации заряженных частиц,
- архивация полученных результатов зондирования.

Значительный объем получаемых данных обуславливает время обработки суточного файла наблюдений в течение 15-60 минут в зависимости от производительности используемых вычислительных средств.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ

Для примера полученных результатов были выбраны два дня наблюдений: 02.02.2015 г. и 06.02.2015 г. с магнитоспокойными условиями. К-индекс для 6.02.2015 г. был равен единице, а 02.02.2015 г. Кр=3– [11, 12].

Частота опроса данных зондирования в приемнике была установлена в 1 Гц. Среднесуточная оценка положения приемной антенны 06.02.2015 г. составила: 43,7414 градуса (ско=0,0004) с.ш., 42,6635 градуса (ско=0,0003) в.д. Среднесуточная оценка медианы положения приемной антенны 6.02.2015 г. составила: 43,74143 с.ш., 42,66353 в.д. Оценка медианы оказывается более помехоустойчивой характеристикой, чем среднесуточная оценка математического ожидания.

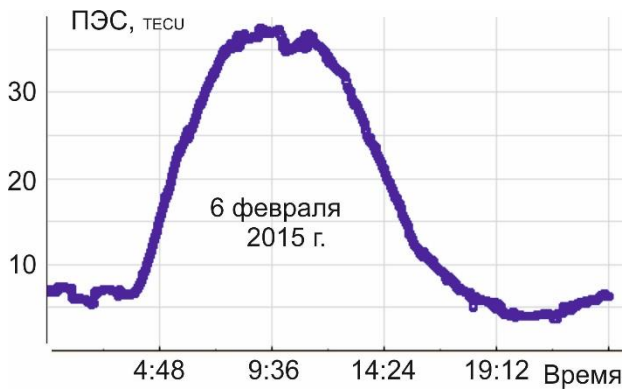


Рис. 2 Изменение ПЭС 6.02.2015 г. над ГАС ГАО РАН

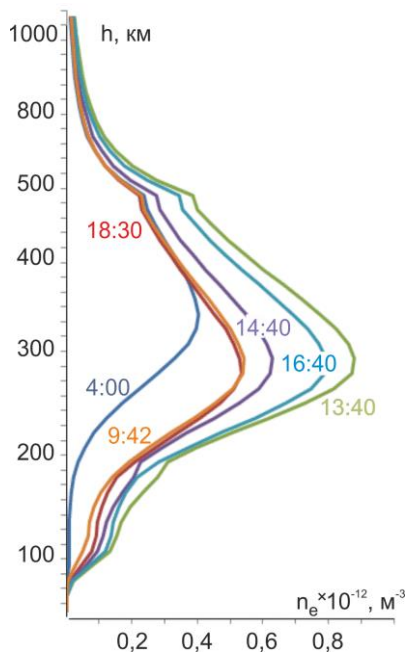


Рис. 3 Изменение концентрации электронов по высоте 6.02.2015 г. над ГАС ГАО РАН

Для 02.02.2015 г. данных наблюдений оказалось на треть меньше. Первый сбой в приеме информации произошел с 01:54:50 до 01:59:43. Не было данных с 03:59:59 до 14:00. Среднесуточная оценка положения приемной антенны 02.02.2015 г. составила: 43,74143 градуса (ско=0,00025) с.ш., 42,66356 градуса (ско=0,00017) в.д. При этом надо учитывать, что использованный одночастотный метод расчета характеристик позиционирования достаточно грубый. Расчеты координат приемной антенны проводились по псевдодальностям до всех видимых под углом более 10 градусов над горизонтом НКА ГЛОНАСС/GPS по первой рабочей ГНСС. Для наблюдений 06.02.2015 г. в конце второго часа с 01:38:40 до 01:59:59 UTC не удалось рассчитать оценки широты и долготы. Был зафиксирован сбой.

Соответствующие оценки ПЭС составили: по IRI-2011 – 17,04 TECU, а по расчетам по фазовым измерениям с калибровкой по модели IRI-2011 – 17,05 TECU.

Суточный ход ПЭС представлен на рис 2.

В эксперименте восстановление профилей осуществлялось в диапазоне высот 100-1000 км по 10...20 одновременно навигационным спутникам. Рассчитанные по технологии [6, 8] вертикальные профили концентрации электронов на 06.02.2015 представлены на рис. 3.

Суточный ход в рассчитанных характеристиках проявляется в увеличении плотности электронов практически на всех высотах, но особенно интенсивно на высотах F2-слоя ионосферы. Небольшой излом в верхней части профилей обусловлен переходом на логарифмическую шкалу высот.

На основе рассмотренной технологии зондирования ионосферы возможно исследование корреляционных связей различных гелиогеофизических эффектов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе эксперимента на Кисловодской ГАС ГАО РАН проведена апробация приемника сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS ГАИШ МГУ для технологии зондирования ионосферы.

Представлены примеры расшифровки данных зондирования ионосферы, соответствующие модельным результатам.

Получены оценки позиционирования приемной антенны навигационного приемника, установленного на ГАС ГАО РАН.

БЛАГОДАРНОСТИ: д.ф.-м.н. В.М. Смирнову за помощь в расшифровке профилей.

ЛИТЕРАТУРА

1. . *Тертышников А.В.* Основы технологий мониторинга гидрометеорологической безопасности. - М.: Издательство АГЗ МЧС РФ, 2006. 256 с. (вторая редакция - Учебное пособие. – Москва-Обнинск, 2013-2014. 278 с.).
2. *Тертышников А.В.* Организация прогнозирования природных ЧС. - М.: АГЗ МЧС России, 2010. - 282 с. (вторая редакция - Учебное пособие. – Москва-Обнинск, 2013-2014).
3. *Тертышников А.В., Глухов Я.В.* Результаты зондирования высокоширотной ионосферы в эксперименте вдоль северного морского пути 28.08.2011-16.09.2011 // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2014. № 36. С. 138-149.
4. *Тертышников, А.В.* Вариации оценок одночастотного позиционирования по сигналам ГНСС GPS на стенде «Сура» / *А.В. Тертышников, Я.В. Глухов, А.В. Алексеева* // Труды Международной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн - ИРЭМВ-2015» - Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. - 427- 429с.
5. *Тертышников, А.В.* Эффект магнитной бури 17.03.2015г. в полном электронном содержании ионосферы над Эльбрусом. / *А.В. Тертышников* // Гелиогеофизические исследования. Вып. 12. С.29 – 33. Режим доступа к журналу: с сайта ФГБУ «ИПГ» <http://ipg.geospace.ru> URL:<http://www.vestnik.geospace.ru>.
6. *Тертышников А.В., Пулинец С.А.* Способ зондирования ионосферы, тропосферы, геодвижений и комплекс для его реализации/ Патент, заявка № 2011128236 от 07.07.2011 на получение патента РФ на изобретение. Бюллетень Изобретения. 2013 № 4. Решение о выдаче патента РФ на изобретение от 01.02.2013.
7. *Тертышников А.В., Большаков В.О.* Технология мониторинга ионосферы с помощью приемника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (GALILEO) // Информация и космос. 2010. – № 1. С. 100-105.
8. Патент на изобретение № 2693842. Способ зондирования ионосферы и тропосферы / *А.В. Тертышников* - заявитель. Способ зондирования ионосферы и тропосферы / *А.В. Тертышников и др.* Заявка № 2018127892 от 30.06.2018. Оpubл. 05.07.2019.
9. *Тертышников А.В., Суровцева 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. - Москва: ИКИ РАН, 2010. – 3. С. 115-119.
10. Reverse Satellite Transionospheric Sounding: Advantages and Prospects /IntechOpen/ Reverse Satellite Transionospheric Sounding: Advantages and Prospects/ Satellite Information Classification and Interpretation DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.80240>
11. <http://www.celestrak.com>.
12. *Тертышников А.В.* Посещаемость сайта ФГБУ «ИПГ» и магнитная активность в 2018 г. // Гелиогеофизические исследования. Выпуск 21, 2019. С. 12–17. <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=526>.

IONOSPHERIC SOUNDING EXPERIMENT FROM THE KISLOVODSK OBSERVATORY

A.V. Tertyshnikov

Examples of the results of ionospheric sounding from the Kislovodsk Observatory using the geodesic navigation receiver of the GNSS spacecraft signals of the Moscow University are presented. The integral electron content in the vertical column of the atmosphere and the electron concentration profiles in height are calculated. The presented technology is proposed for the study of heliogeophysical effects.

KEYWORDS: IONOSPHERE, GLONASS, GPS, IONOSPHERIC DELAY, ELECTRON CONTENT, RECEIVER, TECHNOLOGY, MODEL, EXPERIMENT, SENSING