

# Определение ионосферных задержек распространения радиосигналов с помощью трехмерной ассимиляционной модели ионосферы

Д.В. Соломенцев<sup>1</sup>, В.О. Скрипачев<sup>3</sup>, А.В. Тертышников<sup>3</sup>,  
Б.В. Хаттатов<sup>2</sup>, В.У. Хаттатов<sup>1</sup>,  
Ю.А. Полушковский<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Центральная Аэрологическая Обсерватория (ГУ ЦАО Росгидромета),  
141700, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, д.3.

E-mail: d.solomentsev@gmail.com

<sup>2</sup>Fusion Numerics Inc. PO Box 4098, Boulder, Colorado, 80302  
tel/fax 1.206.338.3558 ,

<sup>3</sup>НТЦ «Космонит» ОАО «Российские космические системы»,  
117997 г.Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

E-mail: skripatchevv@inbox.ru

Рассмотрены возможности применения трехмерной ассимиляционной модели ионосферы для определения задержек распространения радиосигналов.

Показаны преимущества модели. Приведены результаты модельных расчетов распределений плотности электронов в ионосфере с усвоением экспериментальных данных о ПЭС от достаточно плотной сети наземных станций расположенных на территории Западной Европы. Показано, что при этом реализуется высокая чувствительность модели к ионосферным возмущениям, в том числе и локальным.

Одним из возможных практических применений данной ассимиляционной модели является оперативный расчет задержек сигналов навигационных систем ГЛОНАСС/GPS при их распространении в ионосфере. Предлагаемый подход позволит существенно повысить точность определения задержек, значения которых важны для задач навигации.

**Ключевые слова:** ионосфера, трехмерная ассимиляционная модель, определение задержки спутникового сигнала.

## Модель ионосферы

В последнее время активизировалось внимание к моделированию состояния ионосферы в связи с появлением новых результатов исследований эффектов взаимодействия геосфер [1].

Физическая модель ионосферы, лежащая в основе разработанной ассимиляционной модели, основана на решении уравнений магнитной гидродинамики в магнитной системе координат [2]. Такой выбор обусловлен тем, что он делает задачу моделирования ионосферной плазмы вдоль силовых линий магнитного поля Земли практически одномерной.

В уравнениях магнитной гидродинамики, применяемых в физической модели, учтены следующие основные процессы:

- Фотохимические процессы;
- Химические реакции;
- Столкновения заряженных и нейтральных частиц;
- E<sub>x</sub>B — дрейф.

Помимо внутренних ионосферных эффектов, которые необходимо учитывать в уравнениях модели, существуют также важные физические факторы, влияющие на состояние плазмы. В нижних областях ионосферы, важное влияние на распределение ключевых характеристик оказывает нейтральная атмосфера. Для расчета таких параметров как частоты столкновений, коэффициенты в реакциях рекомбинации и прочих важных параметров, необходимо знать скорости и температуры компонент нейтральной атмосферы. Для получения значений этих характеристик использовались эмпирические модели HWM [<http://modelweb.gsfc.nasa.gov/atmos/hwm.html>] (для определения скоростей нейтральных компонент атмосферы) и MSISE [[http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis\\_vitmo.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis_vitmo.html)] (для определения температур нейтрального состава атмосферы). Коэффициенты магнитного поля во всех точках сетки рассчитывались по модели магнитного поля Земли WMM-2005 [<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/DoDWMM.shtml>].

Экспериментальные данные, которые используются при корректировке модели, представлены в формате RINEX и содержат характеристики сигналов от навигационных спутников группировки GPS. По разности времени прохождения радиосигналов, принимаемых наземным приемником, вычисляется полное электронное содержание вдоль пути его распространения. Эта информация, с учетом орбиты спутника и заранее известными координатами наземного приемника, учитывается в модели. Одним из преимуществ построения региональной модели ионосферы, является возможность использования густой сети наземных станций. В случае с Европейским регионом, может быть добавлена плотная сеть приемников EUREF [<http://www.epncb.oma.be>]. На Рис. 1 представлены сети приемников, использованных при глобальном и региональном моделировании.

В расчетах использована модель ионосферы, представленная в [3], адаптированная под регион Западной Европы. Для этого были введены новые граничные условия для моделируемых силовых трубок магнитного поля.

Расчеты проводятся в два этапа. Численными методами решается система уравнений химии и динамики ионосферной плазмы на трехмерной сетке, связанной с линиями магнитного силового поля Земли, а затем осуществляется корректировка полученных расчетов с помощью фильтра Калмана [4] по данным о полном электронном содержании (ПЭС) в ионосфере с сети наземных станций GNSS.

На специальном сервере была реализована оперативно действующая система, позволяющая в режиме квазиреального времени определять параметры ионосферы, такие как скорости, температуры и концентрации электронов и семи типов ионов.

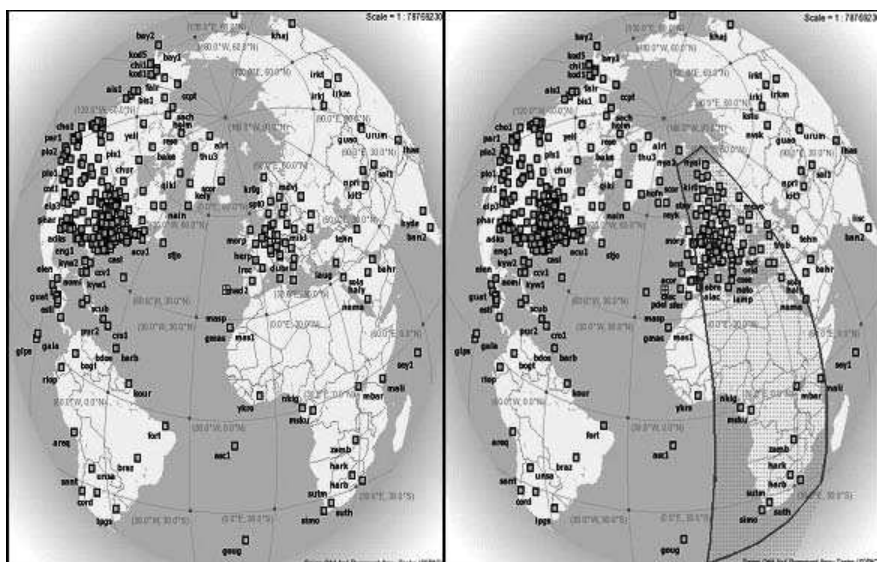


Рис. 1. Сеть стационарных наземных приемников GPS, использованных при глобальном (слева) и региональном (сектор справа) моделировании ионосферы

Использование фильтра Калмана имеет ряд преимуществ перед прочими методами ассимиляции данных (3D-VAR, 4D-VAR). Увеличение количества наземных станций ведет к существенному увеличению точности расчетов состояния ионосферы.

### Обсуждение результатов

На рис. 2 представлен пример результатов моделирования. Изоповерхность, выделенная красным цветом охватывает области моделируемого региона, в которых содержание электронов больше значения  $10^9$  в  $\text{м}^3$ .



Рис. 2. Результаты моделирования распределения электронного содержания на фоне части Земного шара

На рис. 3 представлены примеры мониторинга состояния ионосферы над г. Потсдам 11.07.2009 г. с помощью созданной региональной модели.

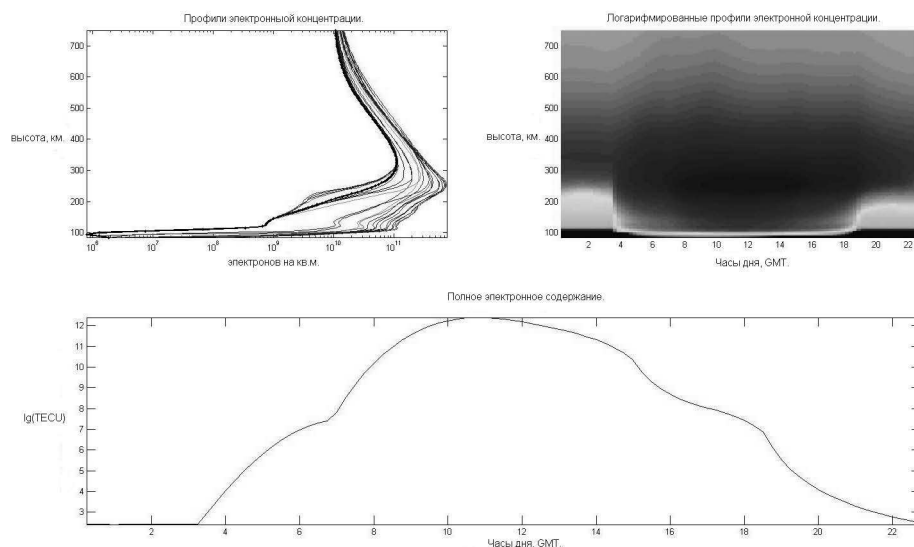


Рис. 3. Результаты моделирования ионосферы над г. Потсдам: профили вертикального содержания электронов с дискретностью 15 мин, состояние ионосферы в течение суток, изменение ПЭС

На основе данных о содержании заряженных частиц, и точной траектории распространения радиосигнала, можно рассчитать его ионосферную задержку [3]. Благодаря наличию информации о трехмерных распределениях заряженных частиц, можно избежать ошибок, связанных приближенным описанием ионосферы как тонкой оболочки.

На основе представленной модели ионосферы можно рассчитывать задержки спутникового навигационного радиосигнала спутниковой системы ГЛОНАСС. Это позволит существенно увеличить точность навигации с помощью одночастотных пользовательских приемников, рассчитанных на прием сигнала от системы ГЛОНАСС. В этих приемниках нет возможности учесть влияние ионосферы на распространение радиосигнала без приема внешней информации. Учет внешней информации о состоянии ионосферы может быть применен и для двухчастотных приемников.

В модели предусмотрена автоматическая валидация полученных результатов. Для этого из всех наземных станций, информация с которых поступает на сервер, случайным образом выбирается несколько приемников. Эти приемники не участвуют в ассимиляции, однако информация принятая с них, обрабатывается и сохраняется. Зная траектории спутников, координаты наземных станций, а так же номера спутников, видимых с данной станции в тот или иной период времени, рассчитывается трасса распространения радиосигнала от спутника к приемнику. По данным модели вычисляется ПЭС вдоль трассы распространения сигнала, сравнивается с экспериментальной информацией, полученной со станции, и проводится соответствующая корректировка результатов моделирования.

Эти вычисления выполняются регулярно. Приемники, периодически исключаемые из ассимиляционной схемы, меняются каждые 24 часа. Оценки среднеквадратичной ошибки определения ПЭС на каждом шаге ассимиляции (через каждые 10 мин) достаточно стабильны (порядка 3 TECU), изменения относительной ошибки определения ПЭС варьируют в пределах 5-25 %.

### **Заключение**

Полученные результаты подтверждают возможность применения трехмерной ассимиляционной модели ионосферы при мониторинге ионосферы и ионосферных задержек распространения радиосигналов.

Пространственное разрешение сетки географических координат в существующей конфигурации региональной модели позволяет отслеживать ионосферные неоднородности с характерным размером порядка сотни километров. Это делает разработанную модель перспективным инструментом для мониторинга состояния ионосферы.

### **Литература**

1. *Tertyshnikov A.V., Skripachev V.O.* Estimates of disturbances of space vehicle orbits in the upper ionosphere prior to strong earthquakes // *Cosmic Research*, Vol 47, № 5, 2009.
2. *Bailey and Balan*, A low-latitude ionosphere-plasmosphere model, in STEP: Handbook of Ionospheric Models, STEP Report, editor R.W. Schunk, 1996.
3. *Khattatov et al.* Ionospheric nowcasting via assimilation of GPS measurements of ionospheric
4. electron content in a global physics-based time-dependent model // *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 2005. pp. 3543–3559.
5. *Evensen, G.* The Ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation // *Ocean Dynamics*, 53, 2003. pp. 343–367.

# Ionospheric radio signals propagation delays determination using three- dimensional assimilative ionospheric model

D.V. Solomentsev<sup>1</sup>, V.O. Skripachev<sup>3</sup>, A.V. Tertyshnikov<sup>3</sup>,  
B.V. Khattatov<sup>2</sup>, V.U. Khattatov<sup>1</sup>, Yu. A. Polushkovsky<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Central Aerological Observatory, Dolgoprudny,  
Moscow Region, 3 Pervomaiskaya str.*

<sup>2</sup>*Fusion Numerics Inc. PO Box 4098, Boulder, Colorado, 80302*

<sup>3</sup>*S&T center «Cosmonit» JSC «RSS»,  
Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.*

*E-mail: skripatchevv@inbox.ru*

The possibilities of usage a three- dimensional assimilative ionospheric model for determination of signal propagation delays are discussed.

The most important advantages of the model are shown. Also we provide the results of model calculations for distributions of electron concentrations in ionosphere. The calculations were made using assimilation of Total Electron Content from GPS ground- based stationary receivers in Western Europe region. It is shown, in addition, that the model results are sensitive to ionospheric disturbances, including local variations.

One of the possible practical implementations for described assimilative model is operational calculations of satellite radio signal propagation delays for navigational satellites of GLONASS/ GPS. The suggested approach allows the significant increase of precision in delays calculus, which is very important for navigational applications.

**Keywords:** ionosphere , assimilative 3D model , satellite signal delays determination