

УДК 551.501:537.874.34

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРОПОСФЕРЫ

© 2012 г. В. В. Калинин, О. Г. Хуторова, Г. М. Тептин

Казанский государственный университет

420008 Казань ул. Кремлевская, 18

E-mail: vlad-kalinnikov@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011 г., после доработки 06.09.2011 г.

На основе двухчастотных фазовых измерений сигналов ГНСС наземными приемниками сделаны оценки зенитных задержек радиосигналов в тропосфере. Проведено сравнение этих оценок с данными погодных полей реанализа NCEP/NCAR. Показано, что стандартное отклонение значений зенитных задержек, полученных обоими способами, составляет в среднем около 1 см. Согласно произведенным расчетам, такой уровень точности позволяет исследовать межсуточную и внутрисуточную динамику тропосферы. При этом временное разрешение оценок по данным ГНСС составляет 2 часа, что дает возможность организовать мониторинг атмосферы с помощью наземной сети станций спутникового слежения.

Ключевые слова: тропосфера, рефракция радиоволн, реанализ, ГНСС, зенитная задержка.

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что при прогнозе метеорологической ситуации надо учитывать атмосферные процессы синоптического и внутрисуточного масштабов, так как они оказывают значительное влияние на динамику и энергетику всех слоев атмосферы [1]. В связи с этим несомненный интерес представляют методы оперативного мониторинга атмосферы.

Среди всех технологий, позволяющих зондировать нижнюю атмосферу, применение сигналов спутниковых навигационных систем имеет ряд преимуществ. К ним относится возможность непрерывного суточного мониторинга, высокое временное разрешение измерительных данных, а так же относительная дешевизна приемного оборудования. В США, Японии, Западной Европе достаточно много исследований посвящено измерениям вариаций трехмерных полей содержания водяного пара в тропосфере с помощью сетей наземных приемников GPS [2–4] и др.

В основе работы навигационных систем лежит измерение наземным приемником фазы сигнала, излученного навигационным спутником. Измерения фазового пути от спутника до наземного приемника имеют точность до нескольких миллиметров [5].

Измеренная фаза является результатом радиопросвечивания атмосферы и, следовательно, несет в себе информацию, характеризующую состояние ее слоев. Эта информация определяется высотным профилем индекса рефракции, который,

в свою очередь, связан с метеорологическими параметрами – парциальным давлением сухих газов P , температурой T , давлением водяного пара e [6]:

$$N = 77.6890 \frac{P}{T} + 71.2952 \frac{e}{T} + 375463 \frac{e}{T^2}. \quad (1)$$

Часто формула (1) дополняется обратными коэффициентами сжимаемости сухих газов и водяного пара, близкими к единице [7, 8]. Численные выражения для них представлены в [9].

Разные значения индекса рефракции приводят к разным временным задержкам радиосигналов в атмосфере. Параметром, характеризующим такое воздействие в тропосфере, может являться вертикальная (или зенитная) тропосферная задержка ZTD , которая может быть определена через интеграл от индекса рефракции [9]:

$$ZTD = \int_{\text{приемник}}^{H_{\max}} N \times 10^{-6} dh. \quad (2)$$

Этот интеграл берется от высоты антенны приемника до некоторой максимальной высоты H_{\max} (обычно около 100 км). Более высокие слои дают настолько малые значения задержки в нейтральной атмосфере, что они ниже точности измерения. Высотное распределение N известно, если известны профили давления сухих газов P , температуры T , давления влажных паров e .

В Казани существует сеть приемников GPS–ГЛОНАСС пространственно разнесенных на расстояния от 1 до 35 км. В работе [10] показано, что