

О перспективах исследования неоднородной структуры тропосферы с помощью сети приемников GPS-ГЛОНАСС

О.Г. Хуторова, А.А. Васильев, В.Е. Хуторов*

Казанский государственный университет
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18

Поступила в редакцию 18.01.2010 г.

Сеть из семи наземных приемников GPS-ГЛОНАСС, разнесенных на расстояние от 3 до 35 км, расположенных в г. Казани и ее окрестностях, дает возможность провести дистанционное зондирование пространственно-временной картины коэффициента рефракции радиоволн, которая зависит от динамики атмосферных параметров. Полученные вертикальные профили и суточные ходы индекса рефракции показали хорошее согласие с данными независимых измерений.

Ключевые слова: дистанционное зондирование тропосферы, спутниковые навигационные системы, мезомасштабные неоднородности; troposphere remote sensing, satellite navigation system, mesoscale inhomogenities.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется задачам развития систем, обеспечивающих адекватную оценку и прогноз неоднородной структуры тропосферы в реальном времени. В связи с этим несомненный интерес вызывают широкие возможности применения глобальных сетей позиционирования GPS и ГЛОНАСС.

Перспективным направлением дистанционного зондирования тропосферы является использование радиосигналов спутниковых навигационных систем (СНС). В США и Западной Европе достаточно много исследований посвящено измерениям вариаций трехмерных полей содержания водяного пара в тропосфере с помощью наземных приемников GPS [1–4] и др. Показано, что данные приемников GPS – инструмент исследования тропосферы с большим временным разрешением [4]. Пространственное разрешение зависит от плотности расположения приемников.

Цель данной работы – показать возможности исследования вертикальной и горизонтальной мезомасштабных структур тропосферы с помощью системы наземных приемников GPS-ГЛОНАСС, разнесенных в пространстве.

Спутники СНС излучают радиосигналы в диапазонах длин волн 19 и 24 см, что обеспечивает всепогодный прием на поверхности Земли. Наземные приемники измеряют параметры принятых радиосигналов (групповой и фазовый путь от спутника до антенны приемника, доплеровский сдвиг несущей

частоты и др.), флуктуации которых связаны с различными атмосферными процессами, в том числе с вариациями параметров тропосферы [1, 6].

Рассмотрим основные параметры нейтральной атмосферы, влияющие на распространение радиоволн дециметрового диапазона в приземном слое. Основной характеристикой атмосферы как среды распространения является индекс рефракции. Обычно используют следующее выражение, связывающее индекс рефракции N и коэффициент преломления n радиоволн с атмосферными параметрами [4]:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = 77,6 \frac{p}{T} + 3,73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2}, \quad (1)$$

где первое слагаемое определяется влиянием неполярных газов, а второе – водяным паром; p и T – давление и температура воздуха, мбар и К соответственно; e – парциальное давление паров воды, мбар. Это выражение позволяет оценить зависимость коэффициента преломления от параметров атмосферы и определить степень их влияния на условия распространения радиоволн.

Флуктуации измеряемых параметров радиосигналов СНС при распространении в неоднородной атмосфере обусловлены изменением индекса рефракции. Это изменение можно разделить на систематическое, связанное с изменением средних параметров атмосферы, и нерегулярное, связанное с неоднородностями атмосферных параметров. Систематическое изменение имеет в основном высотный ход. Высотный градиент метеопараметров в атмосфере формирует высотный профиль коэффициента преломления радиоволн и вызывает явление вертикальной рефракции. Температура и влажность часто изменяются с высотой немонотонно.

* Ольга Германовна Хуторова (olga.khutorova@ksu.ru); Алексей Анатольевич Васильев; Владислав Евгеньевич Хуторов.

Наличие температурных инверсий на различных высотах показывают как радиометрические [7], так и лидарные исследования [8], встречаются слои с резким падением температуры, а также облака до высот 10–12 км. Вертикальные градиенты показателя преломления в тропосфере достигают значений от нескольких единиц до 10–20 N -единиц/м (1 N -ед. = $(n - 1) \cdot 10^6$ соответствует изменению оптического пути 1 мм/км) [9]. Интенсивность изменений метеопараметров падает с увеличением высоты над земной поверхностью. Динамические процессы в реальной атмосфере формируют неоднородную изменчивую трехмерную структуру коэффициента преломления [4, 8].

Таким образом, вертикальный профиль индекса рефракции характеризует стратификацию атмосферы, а его изменчивость – пространственные флуктуации атмосферных параметров.

Расстояние до спутника, измеренное приемником, можно представить в виде

$$L_i^j = \rho_i^j + I_i^j + \Delta L_i^j + \varepsilon_i^j, \quad (2)$$

где индексы i и j – номера приемника и спутника соответственно; ρ – истинное расстояние между спутником и приемником (рассчитывается по известным координатам антенн и эфемеридам спутников [1]); I и ΔL – ионосферная и тропосферная задержки радиосигнала, измеряемые в единицах длины; ε – ошибки измерения, в том числе ошибки за счет ухода часов приемника и спутника.

Каждый приемник измеряет расстояние двумя способами – по времени распространения сигнала (кодовые измерения или псевдодальность, в этом случае ионосферные и тропосферные задержки зависят от групповой скорости распространения в среде) и по фазе принятого сигнала (здесь задержки определяются фазовой скоростью).

Дополнительный путь радиоволны от спутника до антенны, связанный с рефракцией в атмосфере [1, 4]:

$$I_i^j + \Delta L_i^j = 10^{-6} \int_s N(s) ds. \quad (3)$$

Интеграл взят по линии радиотрассы от спутника до антенны. Вклад ионосферы определяется выражением

$$I = \frac{40,3}{cf^2} \text{TEC},$$

где TEC – интегральное содержание электронов вдоль радиотрассы; f – частота несущей; c – скорость света. Частотная зависимость ионосферной поправки позволяет вычесть ее из (2), используя измерения на двух рабочих частотах [1, 4].

В Казанском госуниверситете организована сеть приемников GPS-ГЛОНАСС, пространственно разнесенных на расстояния от 3 до 35 км [10]. Расстояния между станциями выбраны для того, чтобы отслеживать вариации мезомасштабной структуры индекса рефракции [8].

Используемые приемники обладают характеристиками, представленными в таблице.

Технические характеристики приемников СНС

Антенна Novatel GPS-702 с платой приемника OEM-V3	Антенна с платой приемника Novatel SS-II
Двухсистемный	Односистемный
72 канала слежения	12 каналов слежения
Двухчастотный, рабочая частота 1575,42 и 1227,60 МГц	Одночастотный, рабочая частота 1575,42 МГц
Минимальная чувствительность 135 дБ	Минимальная чувствительность 135 дБ
Технология подавления многолучевости	Технология подавления многолучевости
Точность измерений фазы несущей 0,5 мм	Точность измерений фазы несущей 0,5 мм
Частота выдачи измерений 20 Гц	Частота выдачи измерений 1 Гц
Диапазон рабочих температур от –40 до +75 °С	Диапазон рабочих температур от –40 до +75 °С

Расположение антенн было выбрано таким образом, чтобы обзор каждого из приемников был как можно более полным, а влияние многолучевости было минимальным. Схема расположения станций представлена на рис. 1.

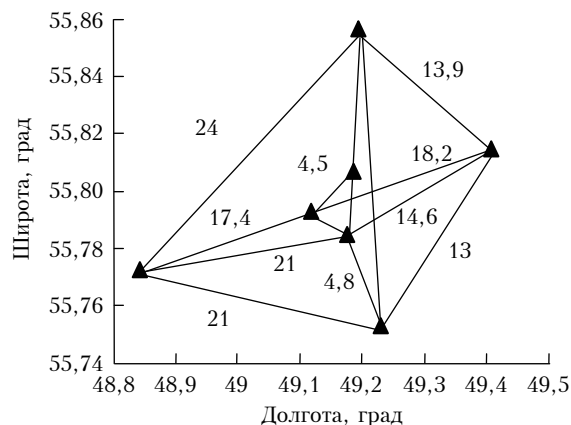


Рис. 1. Расположение сети приемных станций ГНСС GPS-ГЛОНАСС в г. Казань. Цифры – расстояния между антеннами, км

Наличие сети приемников GPS-ГЛОНАСС дает возможность снимать характеристики радиосигнала на трассах «Земля–спутник» и вычислять соответствующие тропосферные задержки в пространственно-разнесенных пунктах. Двухчастотная система приемников позволяет исключить влияние ионосферы на вычисление значений тропосферной задержки. С помощью системы спутников GPS-ГЛОНАСС можно одновременно наблюдать на небесной полусфере несколько источников радиосигнала и дистанционно зондировать сетью антенн различные участки тропосферы под разными углами места радиотрасс.

Для решения обратной задачи восстановления высотной и горизонтальной структуры тропосферы мы выбрали данные фазовых измерений дальности

до каждого спутника, так как они более точны, чем кодовые измерения. Для исключения ошибок, обусловленных уходом часов, применяется метод разностных измерений для разнесенных пунктов с известными координатами [1].

Тропосферная задержка радиосигнала ΔL (как правило, в единицах длины) измерена каждой антенной в приближении сферической симметрии атмосферы с учетом искривления луча:

$$\Delta L = \int_{h_a}^{H_t} \frac{(r_0 + h)N(h)}{\sqrt{(r_0 + h)^2 + \left(\frac{n_0}{1 + N(h)}\right)r_0^2 \cos^2(\theta)}} dh, \quad (4)$$

где θ – угол места трассы спутник–приемник; r_0 – радиус Земли; h – высота; n_0 – приземный коэффициент преломления. Интеграл взят от высоты приемной антенны h_a до высоты тропосферы H_t . Модельные расчеты индекса рефракции тропосферы показали, что высоту тропосферы можно взять приближенно равной 10 км. При фазоразностном методе влияние нейтральной атмосферы выше 10 км меньше, чем точность измерения фазы приемником.

Выражение (4) получено в [4] и учитывает влияние атмосферы и на искривление трассы, и на дополнительную задержку радиосигнала в тропосфере за счет того, что скорость распространения не равна скорости света, а уменьшается в n раз. При вертикальной трассе (угол места равен 90°) зенитная тропосферная задержка минимальна, ее значение меняется в пределах 1,9–2,8 м [1, 2]. Наклонная тропосферная задержка может достигать нескольких десятков метров [1–5].

Задача сводится к решению интегрального уравнения (4) относительно высотного профиля индекса рефракции. Уравнение (4) имеет нелинейное ядро, в которое входит искомый профиль, поэтому мы применили для его решения итерационный алгоритм и метод Тихонова решения обратных задач [11]. При решении учитывали эмпирические данные профилей индекса рефракции, полученные по радиозондовым данным за период 1997–2001 гг. В качестве начального приближения использовали среднесезонные профили для каждого сезона.

Минимизация функционала Тихонова проводилась в граничных условиях, также заданных данными эмпирической модели. Было установлено, что точность решения слабо зависит от начального приближения, подставляемого в ядро, но сильно зависит от параметра минимизации функционала Тихонова. Обычно решение сходится к третьему шагу итерационного алгоритма.

При разработке методики мы учитывали точностные характеристики фазовых измерений. Модельные расчеты показали, что решение достигается даже при ошибках измерения фазы, на порядок больших, чем в применяемой аппаратуре.

Для иллюстрации получаемых решений на рис. 2 представлены профили, полученные по данным сети СНС, в сравнении с профилями индекса рефракции, рассчитанными по данным реанализа [12]. Решения, полученные по 2-минутным интервалам измерения сетью станций, усреднялись, среднеквадратические отклонения также представлены на графиках. Видно, что для первого профиля (01.06.09) до высот 10 км решение хорошо соответствует реальному профилю, причем полученные среднее и среднеквадратические отклонения очень малы.

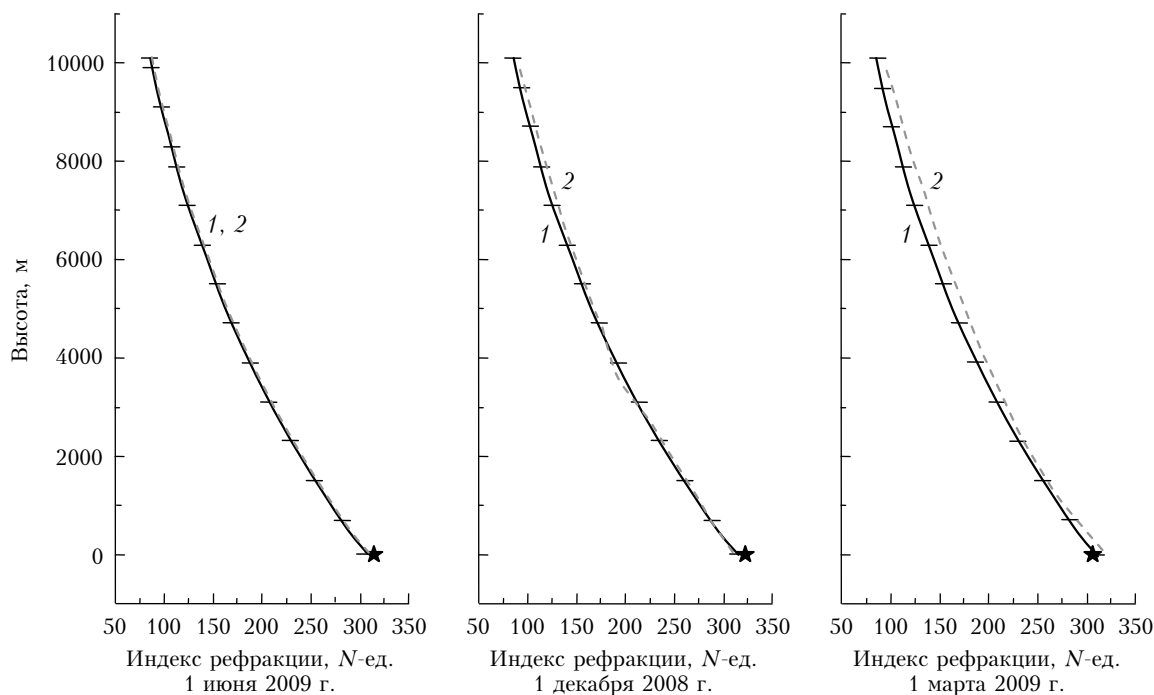


Рис. 2. Высотные профили индекса рефракции для различных сезонов: 1 – по данным сети, 2 – по данным реанализа. Звездочки – индекс рефракции по данным метеостанции

Второй пример (01.12.08) также показывает совпадение профилей в пределах среднеквадратического отклонения. Совпадение можно объяснить тем, что данные реанализа сильно сглажены, как и усредненный профиль, полученный по данным сети приемников, охватывающих территорию 35×20 км.

Третий пример (01.03.09) демонстрирует хорошее совпадение решений и независимых данных только на высотах 500–3000 м. Однако на поверхности Земли приведены расчеты индекса рефракции по данным метеостанции [13]. Очевидно отличное совпадение с измерениями метеостанции. Видимо, для этого момента времени локальные условия отличаются от усредненных моделей реанализа. По данным метеостанции было замечено, что в момент измерений действительно отмечены локальное повышение давления и понижение температуры, затем сменившиеся обратными процессами. То есть можно заключить, что решение обратной задачи по данным СНС точно отражает реальные условия (во всяком случае, вблизи поверхности Земли).

Высокая частота измерений позволяет получить вариации индекса рефракции радиоволн, обусловленные суточной динамикой метеопараметров. На рис. 3 представлены примеры суточного хода индекса рефракции радиоволн на поверхности Земли и на вы-

соте 100 м для 29.09.08 и 01.12.08. Для сравнения представлены также суточные ходы, рассчитанные по данным метеостанции [13].

Метеостанция расположена на расстоянии около 10 км от ближайшей антенны. Данные, полученные на метеостанции, представлены с разрешением 3 ч, суточный ход по данным сети приемников имеет временное разрешение 30 мин. Видно хорошее совпадение кривых вблизи поверхности Земли с учетом того, что в измерениях сети приемников СНС кроме суточного хода проявляются вариации внутрисуточные, обусловленные мезомасштабными или макротурбулентными процессами. Подобные вариации были нами исследованы ранее по приземным измерениям сети станций атмосферного мониторинга [11]. Видно, что на высоте 100 м суточный ход индекса рефракции в целом почти повторяет приземные вариации (см. рис. 3), однако расчеты показывают, что высотный градиент в течение суток непостоянен, меняется он и от суток к суткам.

Обратную задачу восстановления пространственных неоднородностей индекса рефракции можно решить аналогичным путем, не применяя приближения сферической симметрии атмосферы. В этом случае в (3) и (4) предполагается зависимость индекса рефракции как от высоты, так и от горизонтальных координат.

Основная идея использованного нами метода заключается в том, что измеренные тропосферные задержки радиосигналов можно аппроксимировать суммой линейно независимых функций от координат с учетом полученного решения среднего вертикального профиля. В результате имеем систему линейных уравнений, решая которую можно восстановить структуру отклонений индекса рефракции радиоволн от среднего профиля, характеризующую пространственное изменение метеопараметров атмосферы.

На рис. 4 представлены примеры горизонтальной структуры вариаций индекса рефракции радиоволн и ее динамики в приземном слое атмосферы, полученные по данным сети станций СНС 19.08.08 за период 10 мин.

Обнаружено, что для указанного момента времени наблюдаются неоднородности индекса рефракции размерами от 2 до 10 км. Такие же характерные размеры неоднородности индекса рефракции (5–10 N -ед.) с близкими амплитудами возмущения обнаружены по данным сети станций атмосферного мониторинга [8].

Таким образом, показано, что дистанционное зондирование тропосферы по сигналам СНС ГЛОНАСС и GPS, проведенное сетью приемников в г. Казани, позволяет исследовать высотные профили индекса рефракции, их суточную и внутрисуточную динамику и пространственную мезомасштабную неоднородную структуру тропосферы.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (Госконтракт № П1162).

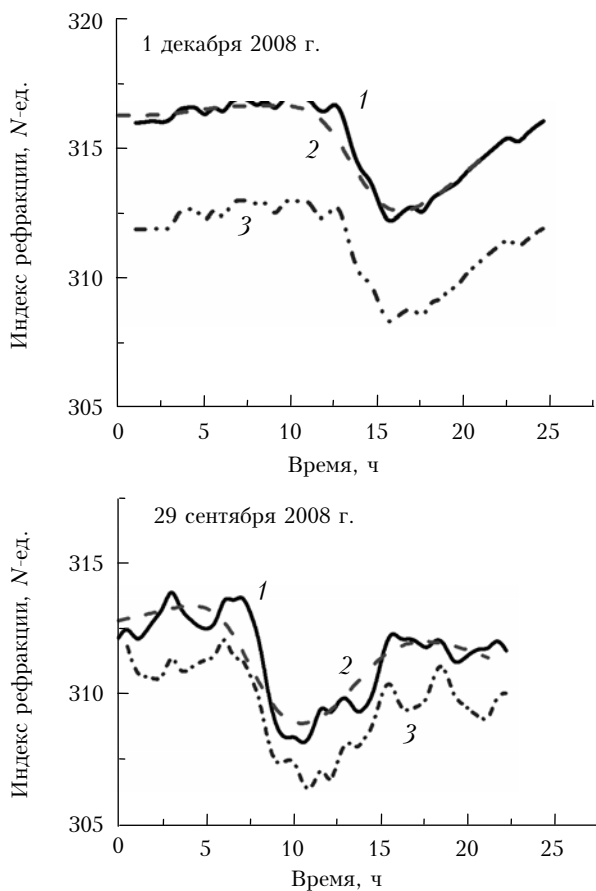


Рис. 3. Примеры суточного хода индекса рефракции: 1 – по данным сети СНС (приземное значение); 2 – метеостанция; 3 – по данным сети СНС (на высоте 100 м)

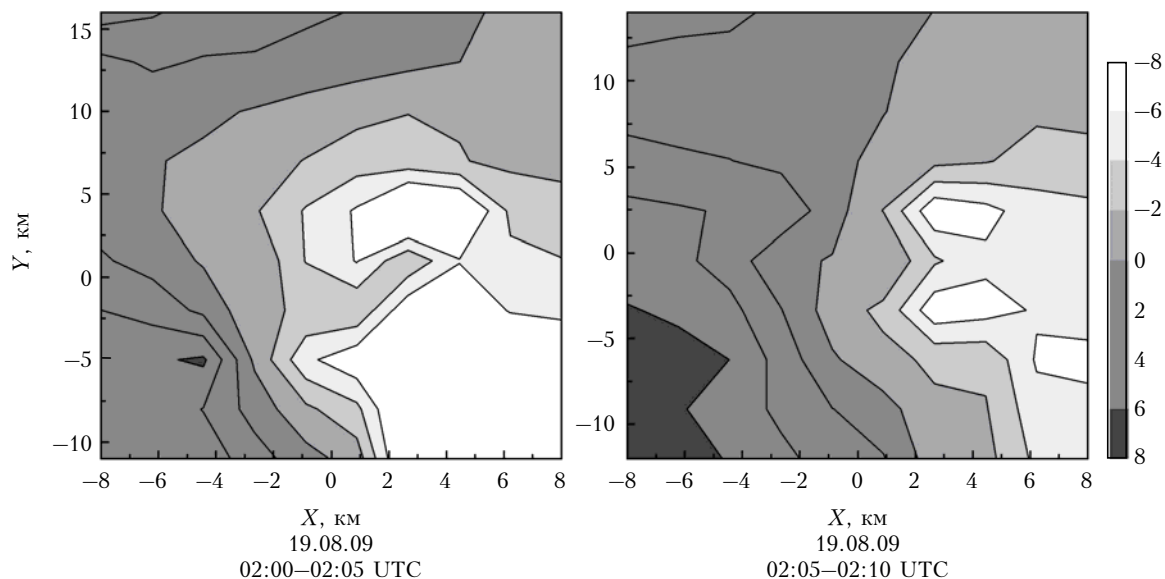


Рис. 4. Пространственные вариации индекса рефракции 19.08.2009. По осям – расстояние от геометрического центра антенной системы, км. Цветовая шкала – величина отклонения индекса рефракции от среднего по плоскости

1. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System. Theory and Practice. Wien; N.Y.: Springer-Verlag, 1994. 356 p.
2. Bevis M.S., Businger S., Herring T.A., Rocken C., Anthes R.A., Ware R.H. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 15787–15801.
3. Bender M., Raabe A. Preconditions to ground based GPS water vapour tomography // Ann. Geophys. 2007. V. 25. P. 1727–1734.
4. Davies O.T., Mitchell C.N. Application of GPS phase delay measurements in radio science and atmospheric studies // IEEE Proc. Microw. Antennas Propag. 2004. V. 151. N 1. P. 1–6.
5. Яковлев О.И. Космическая радиофизика. М.: Научная книга, 1998. 432 с.
6. Казаков Л.Я., Ломакин А.Н. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. М.: Наука, 1976. 165 с.
7. Миллер Е.А., Воробьева Е.А., Кадыгров Е.Н. Анализ межсезонных и межгодовых особенностей температурной стратификации городского острова тепла // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22. № 6. С. 552–557.
8. Зуев В.В., Балин Ю.С., Букин О.А., Бурлаков В.Д., Кабашиников В.П., Невзоров А.В., Осипенко Ф.П., Павлов А.Н., Пеннер И.Э., Самойлова С.В., Столярчук С.Ю., Чайковский А.П., Шмирко К.А. Результаты совместных лидарных наблюдений аэрозольных возмущений стратосферы на станциях сети CIS-LiNet в 2008 г. // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22. № 5. С. 450–456.
9. Хуторова О.Г. Волновые процессы в приземной атмосфере по синхронным измерениям примесей и метеопараметров. Казань: Инновационные технологии, 2005. 275 с.
10. Khutorova O.G., Vasilyev A.A., Maksimov A.G. Real-time lower-tropospheric data system based on global position system stations // Environ. Radioecol. Appl. Ecol. 2007. V. 13. N 1. P. 15–19.
11. Манжиров А.В., Полянин А.Д. Методы решения интегральных уравнений: Справочник. М.: Факториал, 1999. 272 с.
12. NCEP/NCAR Reanalysis. Model Description [Electronic resource]. URL: http://dss.ucar.edu/pub/reanalysis/rean_model.html
13. Данные из архива погодных условий [Эл. ресурс] – URL: <http://meteo.infospace.ru>

O.G. Khutorova, A.A. Vasilyev, V.E. Khutorov. On prospects of investigation of the nonhomogeneous troposphere structure using the set of GPS-GLONASS receivers.

The set of seven GPS-GLONASS receivers arranged at distance from 3 to 35 kilometers in Kazan gives a possibility of investigations of the time-space variations of the radiowaves refraction index, which depends on dynamics of atmospheric parameters. The received vertical profiles and daily trend show a good accordance with independent measurements.