

В. И. Луценко¹, И. В. Луценко¹, О. В. Сытник¹, Н. С. Ань², В. Н. Гудков³

¹Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, г. Харьков, 61085, Украина

E-mail: lutsenko@ire.kharkov.ua

²Институт геофизики Вьетнамской Академии науки и технологии

г. Ханой, Вьетнам

³«ООО Навис – Украина»

24, ул. Мазура, г. Смела, 20708, Украина

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ ТРОПОСФЕРЫ В ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТОЧКЕ ПРОСТРАНСТВА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ В ОПОРНЫХ ПУНКТАХ

Для определения местоположения объектов широкое распространение получили системы глобальной навигации. Однако возмущения и неоднородности ионосферы и тропосферы приводят к появлению ошибок измерения координат объектов, возможными путями снижения которых является учет влияния тропосферы при обработке информации в системе космического навигационного обеспечения (СКНО). Возможны два основных режима введения поправок: в реальном времени и послесансного введения. Оба эти подхода опираются на вычисление тропосферных задержек с использованием данных метеостанций на уровень моря. Проведенный для Украины анализ показал, что порядок аппроксимирующей модели практически не сказывается на ошибке измерения тропосферной задержки. На основании этого был сделан вывод о возможности использования нулевого порядка модели, т. е. средних по Украине данных. Но для более крупных стран использование усредненных по всей территории значений коэффициента преломления будет приводить к неоправданно большим ошибкам. Поэтому было рассмотрено использование стандартных данных метеоцентров для прогнозирования коэффициента преломления тропосферы в заданной точке пространства. Определены критерии выбора подобных (по поведению коэффициентов преломления атмосферы и значению функции потерь) опорных точек прогноза. На примерах Украины, России, Великобритании и Китая показана возможность использования предлагаемого подхода к формированию баз опорных точек для прогнозирования. Получены соотношения для прогноза значений коэффициентов преломления в заданной точке пространства. Предложенный метод может использоваться в СКНО страны при введении тропосферных поправок в приемники систем глобальной навигации. Ил. 8. Табл. 2. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: прогнозирование, коэффициент преломления, система навигационно-космического обеспечения, тропосферные поправки, система глобальной навигации.

В настоящее время для определения местоположения объектов получили широкое распространение системы глобальной навигации. Существует полностью развернутая система США *GPS* [1]. Россией ведутся интенсивные работы по разворачиванию полной системы спутников системы ГЛОНАСС [2–4], завершение которой планируется к 2012 г. В Европе заканчивается разработка системы *Galileo* [4, 5]. Различного рода возмущения и неоднородности ионосферы и тропосферы приводят к появлению ошибок измерения координат объектов. Ионосферные ошибки можно в значительной степени компенсировать, используя двухчастотный режим работы навигационного приемника. Поэтому в наибольшей мере влияет на результаты определения координат тропосфера, не учет которой приводит к погрешностям измерения псевдодальностей от 2,5 (в зените) до 25 м (при углах возвышения спутника порядка 5°). Возможными путями снижения ошибок измерения местоположения является учет влияния тропосферы при обработке информации в системе космического навигационного обеспечения (СКНО) [6, 7]. Возможны два основных режима введения поправок: в реальном времени и послесансного введения. При обработке в масштабе реального времени предполагается использование данных метеостанций, входящих в состав контрольно-корректирующих станций СКНО.

При этом должны обеспечиваться точности определения координат не хуже нескольких метров. При послесансной обработке поправки формируются на основании фазовых наблюдений станций сети СКНО. Получаемые ошибки измерения составляют единицы сантиметров. Для аппроксимации тропосферных задержек в реальном времени используют метеорологические параметры, снятые в ряде точек пространства, по которым формируют и предоставляют пользователям параметры функций, аппроксимирующих зависимость температуры, давления и влажности от широты и долготы в пределах территории страны. Кроме того, формируют и предоставляют пользователям параметры функций, аппроксимирующих зависимость зенитной тропосферной задержки от широты и долготы в пределах территории страны. Оба эти подхода опираются на вычисление тропосферных задержек с использованием данных метеостанций на уровень моря. Методическая погрешность оценки составляет около 2,5 %. Проведенный для Украины анализ [7] показал, что порядок аппроксимирующей модели практически не сказывается на ошибке измерения тропосферной задержки. Поэтому был сделан вывод о возможности использования нулевого порядка модели, т. е. средних по Украине данных. Основанием для такого вывода послужили низкие точности измерения метеопараметров. Вместе с тем

для более крупных, чем Украина стран, например, Россия, Китай, использование усредненных по всей территории значений коэффициента преломления, будет приводить к неоправданно большим ошибкам. Представляет интерес районирование этого параметра, а также изучение возможности повышения порядка модели, по крайней мере, до первого, для улучшения точности прогнозирования с использованием стандартных данных метеостанций и вычисления по ним коэффициентов преломления тропосферы [8]. В настоящей работе анализируется возможность использования метеоданных в произвольно заданных узлах для их прогнозирования в других точках пространства. Анализ проводится на примере Украины, а затем иллюстрируются возможности предложенного подхода для России, Китая и Великобритании.

1. Обоснование метода. Пусть в некоторых точках пространства $i \in (1, N)$ существует возможность измерения метеорологических параметров: температуры t , давления P , влажности e с достаточно высокой точностью. В настоящее время существующая сеть метеорологических станций Украины позволяет измерять температуру t с ошибкой $\pm 0,1^\circ$, давление $P - \pm 0,1$ мм рт. ст., относительную влажность $\eta \pm 1\%$. Эти данные позволяют вычислить значение коэффициента преломления. В радиометеорологии для получения значений коэффициента преломления N наиболее часто используют соотношение, непосредственно получаемое из приведенного в работе [9], с использованием эмпирической связи между абсолютной e и относительной η влажностями:

$$N = \frac{103,46}{t + 273} P + \frac{3730 \cdot 6,1 \cdot 10^{\frac{7,63t}{242+t}} \eta}{(t + 273)^2}. \quad (1)$$

Для прогнозирования коэффициента преломления N в точке пространства $\{x, y\}$ будем использовать данные по коэффициентам преломления $N_i, i \in (1...3)$ и их координатам в плоскости и по высоте $\{x_i, y_i, h_i\}$. Точки, выбранные в качестве опорных, и та точка, в которой осуществляется прогноз коэффициента преломления, должны обладать морфологическим подобием. Это означает, что характер изменения коэффициентов преломления в этих точках должен быть сходным, а значит, должна быть высокой их корреляция. При расчетах необходимо учитывать высоту расположения опорных и прогнозируемой точек. Это можно сделать в рамках экспоненциальной модели тропосферы:

$$N_i(h) = N_i \exp \alpha (h - h_i), \quad (2)$$

где $\alpha = \text{const} \approx 0,136 \cdot 10^{-4} \div 0,272 \cdot 10^{-4}$.

При этом все коэффициенты преломления пересчитываются к высоте расположения прогнозируемой точки. Исходными для расчета являются плоскостные координаты измерительного пункта $\{x_i, y_i\}$, их высоты $\{h_i\}$ и коэффициенты преломления $\{N_i = (n_i - 1) \cdot 10^{-6}\}$. Имея данные, минимум в трех точках пространства, можно провести через них плоскость и использовать ее уравнение для прогнозирования коэффициента преломления в интересующей точке пространства. Графическое изображение задачи имеет вид, представленный на рис. 1. Здесь показана карта Украины с географическими пунктами, которые выбраны в настоящий момент для размещения аппаратуры космического навигационного обеспечения страны. Для проверки предлагаемого метода был выбран ряд точек на территории Украины и России.

Разность координат в декартовой системе между опорным пунктом 1 и 2, 3 пунктами можно вычислить, используя их долготу β_i и широту φ_i :

$$\begin{aligned} \Delta y_{1i} &= (\varphi_i - \varphi_1) R, \\ \Delta x_{1i} &= (\beta_i - \beta_1) R \cos((\varphi_i + \varphi_1)/2), \end{aligned} \quad (3)$$

где R – радиус Земли.

С использованием соотношений (3) рассчитаны расстояния между выбранными опорными пунктами (табл. 1). Для того чтобы оценить целесообразность использования измерительного пункта для прогнозирования, используем норму расстояния между прогнозируемой m и i, j, k опорными точками:

$$\|r(mi, mj, mk)\| = \sqrt{\frac{1}{3}(l_{mi}^2 + l_{mj}^2 + l_{mk}^2)}. \quad (4a)$$

Введем функциональную связь между парными коэффициентами корреляции R_{ij} и расстояниями до выбранных опорных точек в виде функции $\delta(i, j, k)$, физический смысл которой есть ни что иное, как потери, обусловленные выбором i, j, k точек:

$$\delta(i, j, k) = \frac{(1 - R_{ij})l_{ij}^2 + (1 - R_{ik})l_{ik}^2 + (1 - R_{kj})l_{kj}^2}{(l_{ij}^2 + l_{ik}^2 + l_{kj}^2)}. \quad (4б)$$

где $R_{ij}, \Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}$ – парные коэффициенты корреляции и взаимные расстояния $l_{ij} = \sqrt{\Delta x_{ij}^2 + \Delta y_{ij}^2}$ между i и j точками, а $N = 3$ – количество опорных точек. Величина $\delta(i, j, k)$ характеризует, насколько удачно выбрано созвездие опорных точек для прогнозирования. Область ее значений $\delta(i, j, k) \in (0, 1)$, причем $\delta(i, j, k) = 0$ при полной корреляции коэффициентов преломления в опорных точках, а $\delta(i, j, k) = 1$ – при ее отсутствии.

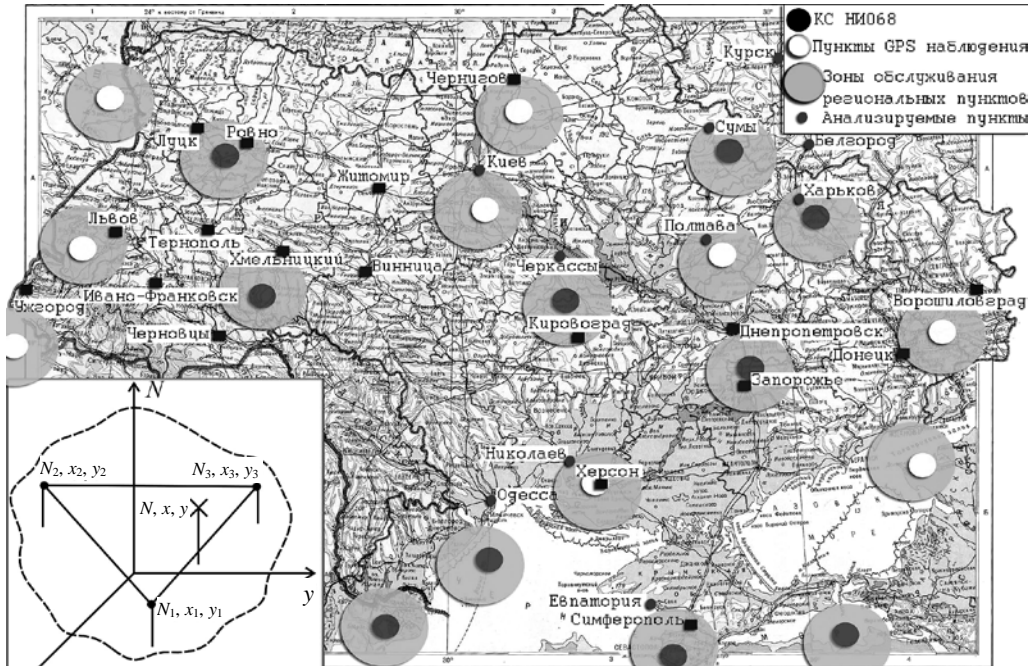


Рис. 1. Карта расположения сети СКНО Украины 2009 г. [6], □ – пункты выбранные для прогнозирования. Геометрия задачи

Таблица 1

Взаимные расстояния между метеорологическими станциями

	Белгород	Евпатория	Киев	Курск	Николаев	Одесса	Полтава	Сумы	Харьков	Черкассы
Белгород	0									
Евпатория	651	0								
Киев	435	616	0							
Курск	122	745	419,2	0						
Николаев	533,3	225	399	611,1	0					
Одесса	644,4	254,3	436	714,5	115,4	0				
Полтава	183	498,4	308,5	228	347	447	0			
Сумы	131	641,5	309	130	478,2	569,2	144	0		
Харьков	75	568	421	191	452	557,3	129,5	151	0	
Черкассы	352,6	408,2	159,2	389	272,5	342	182	256,3	308,3	0

Поскольку местоположение прогнозируемой точки относительно опорных в расчетах не учитывается, дополнительно для характеристики точки прогноза можно использовать фактор положения, зависящий от относительной нормы прогнозируемой точки m относительно нормы базовых опорных точек (i, j, k) :

$$L((m, i, j, k)) = \frac{\|r(mi, mj, mk)\|^2}{\|r(ij, kj, ik)\|^2}, \quad (4в)$$

где пара индексов i, j указывает, между какими точками берется расстояние l_{ij} .

Таким образом, задача поиска оптимального набора опорных точек, обеспечивающего минимум потерь в соответствии с критерием (4б),

(4в), сводится к задаче параметрической оптимизации следующего вида:

$$Q(i, j, k) = \arg \min_{l_{ij}, l_{ik}, l_{kj} \in \Lambda} \{L(m, i, j, k) \delta(i, j, k)\}, \quad (5)$$

где Λ – область, в пределах которой производится выбор опорных точек. Мультипликативное объединение функций и позволяет оценить, в конечном итоге, насколько удачно выбрано для прогнозируемой точки созвездие опорных точек.

Используя данные по температуре, давлению и влажности и соотношение (1), рассчитаны коэффициенты преломления в выбранных пунктах, а также ежемесячно коэффициенты их парной взаимной корреляции, которые для июня и января представлены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты взаимной корреляции коэффициентов преломления

	Белгород	Евпатория	Киев	Курск	Николаев	Одесса	Полтава	Сумы	Харьков	Черкассы
январь 2009 г.										
Белгород	1	0,4	0,84	0,94	0,61	0,55	0,87	0,88	0,93	0,8
Евпатория	0,021	1	0,54	0,34	0,79	0,77	0,39	0,43	0,46	0,55
Киев	0,45	0,23	1	0,81	0,73	0,7	0,8	0,79	0,81	0,88
Курск	0,85	-0,02	0,60	1	0,58	0,48	0,82	0,86	0,87	0,74
Николаев	0,28	0,31	0,46	0,26	1	0,93	0,68	0,71	0,72	0,78
Одесса	0,01	0,56	0,43	0,11	0,51	1	0,62	0,63	0,67	0,73
Полтава	0,74	-0,10	0,37	0,67	0,35	-0,06	1	0,94	0,95	0,87
Сумы	0,82	-0,12	0,58	0,90	0,20	0,01	0,76	1	0,94	0,87
Харьков	0,89	-0,13	0,23	0,72	0,27	-0,16	0,78	0,65	1	0,86
Черкассы	0,39	0,19	0,88	0,55	0,50	0,36	0,39	0,53	0,19	1
июнь 2009 г.										

Такой выбор месяцев обусловлен тем, что наибольшая изменчивость и значения коэффициента преломления наблюдаются в летние месяцы (июнь, июль), а наименьшие – зимой (декабрь, январь) [10]. Матрицы, представленные в табл. 1, 2, дают возможность с использованием (4б) оценить потери прогнозирования при выборе конкретных опорных точек и тем самым позволяют выбрать оптимальную базу для прогнозирования. При выборе опорных точек необходимо исходить из подобия поведения тропосферы в этих точках и прогнозируемой, оцениваемого по парным коэффициентам корреляции. Анализ представленных данных показывает, что существуют группы точек, изменения коэффициентов преломления атмосферы в которых сильно коррелированы. При выборе опорных точек необходимо, чтобы они были морфологически подобны. Морфологическое подобие – достаточно сложный многопараметрический критерий. В нашем случае мы будем понимать под морфологическим подобием точек принадлежность их одинаковым ландшафтным структурам (степь, лесостепь, низменность, гористая местность, прибрежные морские города, города на берегах крупных рек), одинаковость по уровню выпадения осадков в различные сезоны и испаряемости, а также одинаковости поведения коэффициента преломления в течение года. Так, например, можно выделить точки в сухопутной части (Курск, Белгород, Сумы, Харьков), в прибрежной части (Евпатория, Николаев, Одесса) и по берегу Днепра (Киев, Черкассы), которые имеют высокую корреляцию коэффициентов преломления, а значит, можно говорить об их морфологическом подобии. Оценка оптимизационной функции потерь для этих то-

чек (5) показывает, что ее значение около 0,26 и меньше, чем при выборе других созвездий опорных точек прогнозирования. Минимизация функции позволяет оптимизировать выбор созвездия точек для прогнозирования.

Если систему координат совместить с первой опорной точкой, то уравнение для оценки коэффициента преломления в прогнозируемой точке в предположении, что она должна лежать на плоскости, проходящей через три опорные точки, имеет вид

$$N_0 = \frac{\Delta - \Delta_A x_0 - \Delta_B y_0}{\Delta_C}, \tag{6a}$$

где

$$\Delta_A = \begin{vmatrix} 1 & 0 & N_1 \\ 1 & \Delta y_{12} & N_2 \\ 1 & \Delta y_{13} & N_3 \end{vmatrix}, \quad \Delta_B = \begin{vmatrix} 0 & 1 & N_1 \\ \Delta x_{12} & 1 & N_2 \\ \Delta x_{13} & 1 & N_3 \end{vmatrix}, \tag{6б}$$

$$\Delta_C = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \Delta x_{12} & \Delta y_{12} & 1 \\ \Delta x_{13} & \Delta y_{13} & 1 \end{vmatrix}, \quad \Delta = \begin{vmatrix} 0 & 0 & N_1 \\ \Delta x_{12} & \Delta y_{12} & N_2 \\ \Delta x_{13} & \Delta y_{13} & N_3 \end{vmatrix}.$$

На рис. 2 приведены значения коэффициентов корреляции в зависимости от расстояния между городами, полученные по данным табл. 1, 2. Номер значка соответствует номеру города и им обозначены значения коэффициента корреляции и расстояния от этого города до другого. Значения коэффициентов корреляции приведены для двух месяцев: января и июня. На рисунке показаны аппроксимации по методу наименьших квадратов экспериментальных данных экспоненциальной функцией и гауссовой кривой.

Видно, что обе аппроксимации дают неплохие результаты.

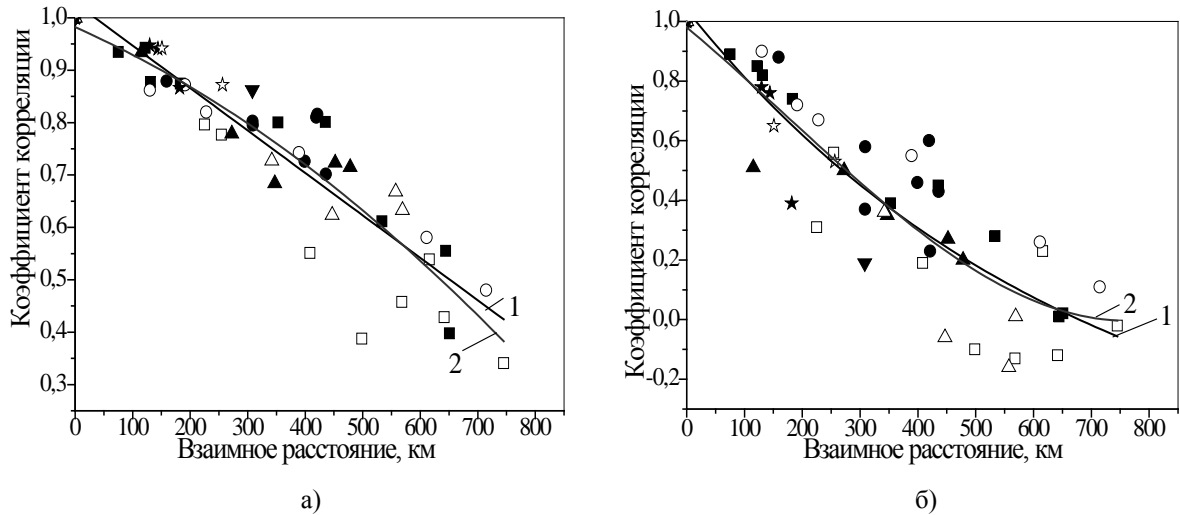


Рис. 2. Значения взаимных коэффициентов корреляции показателя преломления в зависимости от расстояния между городами: а) – январь 2009 г.; б) – июнь 2009 г.: 1 – □ – Белгород; 2 – □ – Евпатория; 3 – ♣ – Киев; 4 – □ – Курск; 5 – □ – Николаев; 6 – □ – Одесса; 7 – ★ – Полтава; 8 – ☆ – Сумы; 9 – □ – Харьков; 1 – экспоненциальная аппроксимация; 2 – аппроксимация функцией Гаусса

Если для летнего месяца пространственный радиус корреляции по уровню 0,5 составляет 250...275 км (рис. 2, а), то в зимние месяцы достигает 600...625 км (рис. 2, б).

Иллюстрируют предложенный подход рис. 3 и 4. В качестве опорных точек для прогнозирования коэффициента преломления в г. Белгород (рис. 3, а) использовались метеорологические данные в г. Харьков, Сумы, Курск (рис. 4, а).

Поведение коэффициента преломления в выбранных городах подобно его поведению в г. Белгород. Коэффициенты парной корреляции составляют от 0,82 до 0,89. Полученные по измерениям метеопараметров коэффициенты преломления (рис. 3, а) пересчитаны с учетом высотной зависимости относительно высоты прогнозируемого г. Белгород с использованием соотноше-

ния (2) и позволяют с учетом соотношений (6) определить сначала коэффициенты в уравнении аппроксимирующей плоскости, а затем и значения прогнозируемого коэффициента преломления.

Полученные в ходе прогнозирования и экспериментальные данные приведены на рис. 4, а. Коэффициент корреляции расчетных и экспериментальных данных составляет около 0,92. Аналогичным образом были спрогнозированы данные по коэффициенту преломления в г. Черкассы – рис. 3, б, 4, б.

В качестве опорных точек для прогноза были взяты данные по г. Харьков, Киев, Николаев. Коэффициенты парной корреляции при этом были существенно ниже, чем в первом случае. Для г. Киев – 0,88, г. Николаев – 0,5 и г. Харьков – 0,19 ($\delta(i, j, k) = 0,6$, $L(m, i, j, k) = 0,35$).

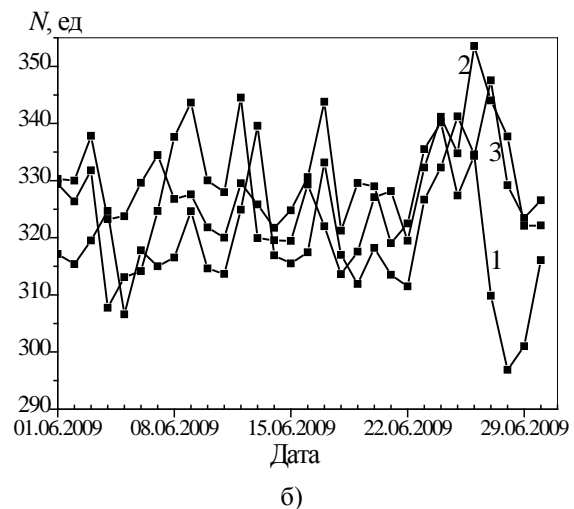
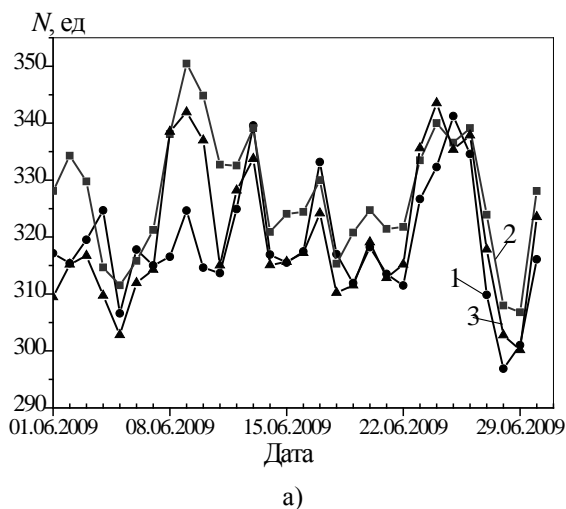


Рис. 3. Поведение коэффициента преломления в опорных точках: а) – 1 – Харьков, 2 – Сумы, 3 – Курск; б) – 1 – Харьков, 2 – Киев, 3 – Николаев

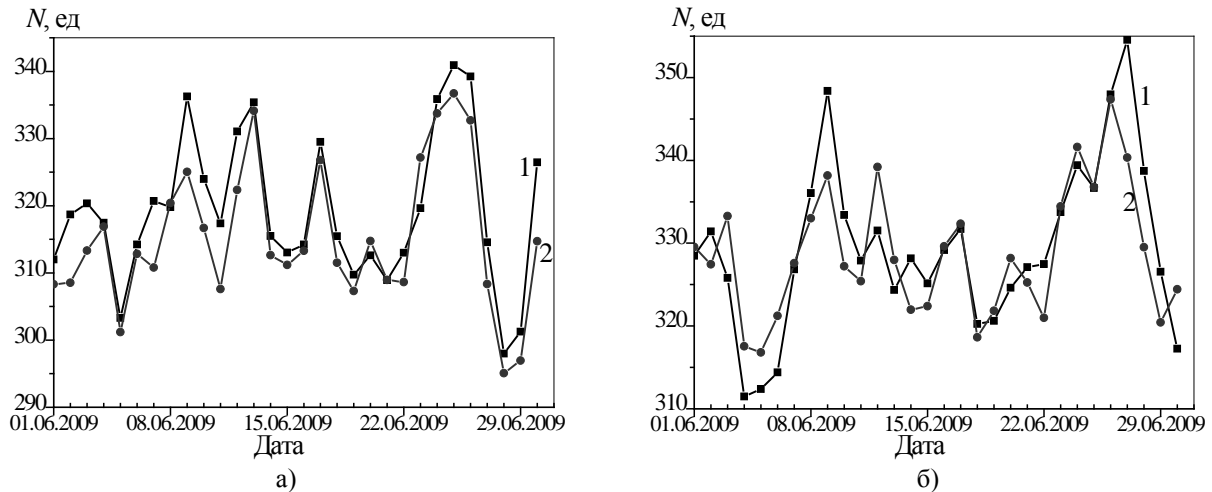


Рис. 4. Прогнозирование коэффициентов преломления: а) – Белгород; б) – Черкассы; 1 – прогнозируемые значения; 2 – экспериментальные значения

Поэтому ниже получилось и значение коэффициента корреляции расчетных (прогнозируемых) и экспериментальных данных – около 0,82. Из этого следует, насколько важен при прогнозе выбор подобных, по поведению коэффициента преломления, точек в качестве опорных. И выбор этот можно основывать на значениях парного коэффициента корреляции, а также введенных оптимизационных функций (4), (5). Прогнозирование значений коэффициента преломления осуществлялось для периода конец мая – июнь, т. е. в весенне-летний период, когда обычно наблюдаются сильные суточные и сезонные его изменения. Несмотря на это, предложенный подход дал неплохие результаты прогноза коэффициента преломления.

2. Использование метода в других регионах. Один из наших измерительных пунктов, оборудованный приемником системы *GPS*, располагался в пос. Монглинген (Швейцария), однако данные метеоцентров для этого пункта отсутствовали, что существенно затрудняло проверку соответствия прогнозируемых данных экспериментальным. В связи с этим для проверки предлагаемого подхода был выбран г. Санкт-Галлен (Швейцария), расположенный на расстоянии 20 км от поселка, для которого и осуществлялось прогнозирование значений коэффициентов преломления и сопоставление их с данными метеостанции в этом измерительном пункте. С использованием предложенного подхода рассчитаны прогнозируемые значения N для г. Санкт-Галлен (Швейцария). В качестве опорных пунктов выбраны: Цюрих-Клотен, 47°29'с.ш. 8°32'в.д. (Швейцария); Кемптен, 47°43'с.ш. 10°20'в.д. (Германия); Вадуц, 47°08'с.ш. 9°31'в.д. (Лихтенштейн). При выборе исходили из описанного ранее свойства подобия коэффициентов преломления. Проанализированы сезонные и суточные изменения значе-

ний коэффициентов преломления для этих городов, которые показали, что в течение года наблюдаются характерные изменения коэффициента преломления тропосферы: его увеличение в летний период и уменьшение в зимний.

Для зимнего периода характерна слабая изменчивость значений N в течение суток, в то время как в летний период значения N существенно изменяются. Таким образом, и для горных районов Швейцарии наблюдаются те же особенности сезонного и суточного поведения коэффициентов преломления тропосферы, которые были характерны для равнинных районов Украины [11].

Используя соотношения (3) и (6) посчитаны прогнозируемые значения коэффициентов преломления для г. Санкт-Галлен (рис. 5 и 6).

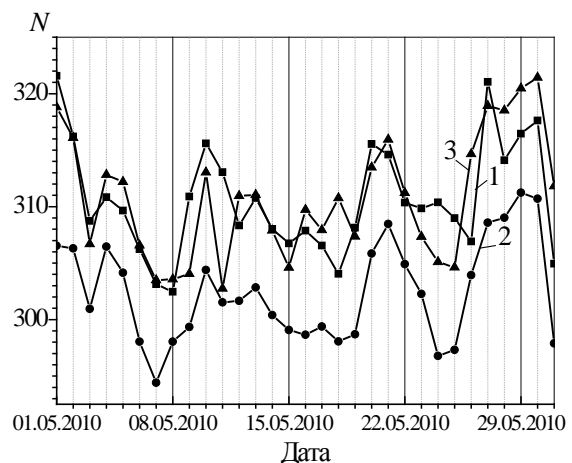


Рис. 5. Поведение коэффициента преломления в опорных точках: 1 – Цюрих, 2 – Кемптен, 3 – Вадуц

Видно хорошее соответствие прогнозируемых данных экспериментальным – коэффициент корреляции 0,87.

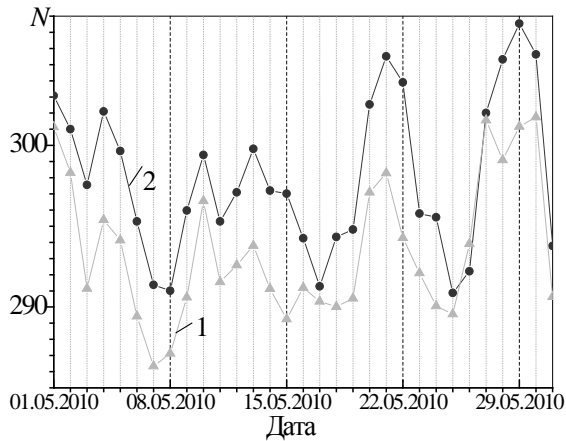


Рис. 6. Прогнозируемые и экспериментальные значения коэффициентов преломления для Санкт-Галлен: 1 – расчет; 2 – эксперимент

Полученные результаты показали, что предлагаемый метод прогнозирования может использоваться не только для прогноза в условиях равнин, но и высокогорья. Для выработки критериев отбора морфологически подобных точек проведено исследование поведения коэффициентов преломления тропосферы еще в нескольких регионах Земли.

В качестве полигонов для отработки метода были выбраны: Великобритания, Россия и Китай (рис. 7 и 8). Если для Великобритании, как островного государства характерен морской климат, то Россия и Китай из-за своих размеров и существенного перепада высот рельефа имеют различные по своим свойствам регионы и поиск морфологически подобных точек для прогнозирования имеет значительный интерес. Кроме того, Россия уделяет значительный интерес к разворачиванию навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС и разработка методов навигационно-космического обеспечения столь больших территорий является для России, несомненно, актуальной проблемой. Аналогичным образом и для Китая, – страны с динамично развиваемой экономикой, большой и разнообразной по рельефу территории, – этот вопрос, конечно, актуален. По каждой из этих стран было выбрано от 14 до 20 городов, для которых с использованием соотношений (1) и данных метеоцентров о температуре, давлении влажности были посчитаны коэффициенты преломления тропосферы для периода с июня 2009 г. по июнь 2010 г. Количество измерений для каждой из стран составляло в среднем около 35 – 40 тыс. за год. Был проведен ежемесячно, а затем и за год парный корреляционный анализ изменения коэффициентов преломления. Они использованы для составления карт морфологически подобных точек, в которых значения коэффициента преломления велики – рис. 7 и 8. Линиями связаны точки, модуль коэффициента корреляции коэффициентов преломле-

ния в которых превышает 0,5: темная – июль, светлая – январь. Для Китая эти данные наложены на карту выпадения годовых осадков, а для России – на карту годовой испаряемости. Следует отметить, что информация об испаряемости отдельных регионов может быть полезна при выборе исходного массива точек, который будет проверяться на подобие поведения коэффициентов преломления. Аналогичным образом может использоваться и карта выпадения осадков. Кроме осадков и испаряемости существенную роль играет рельеф. Так, например, точка 10 (г. Урумчи), находящаяся в горных районах Китая, только в зимний период имеет подобное поведение коэффициента преломления с рядом равнинных точек, что связано с существенно более спокойной динамикой развития ситуаций зимой, чем летом. В летние месяцы эта точка слабо коррелирована с другими городами Китая. Коэффициент корреляции за июль 2009 г. составил от 0,01 до 0,4 (г. Шеньян) В зимний же период имеет сильную отрицательную корреляционную связь с г. Сянган: $-0,52$; Ухань: $-0,62$; Шеньян: $-0,5$ и положительную Сиань: $0,89$.

Такое же особое поведение коэффициента преломления наблюдается и в г. Магадан (№ 7, Россия). Как в летний период, так и в зимний отсутствует какая-либо значительная корреляционная связь с другими городами России. Коэффициенты корреляции для июля месяца 2009 г. порядка $-0,001...0,38$, для января 2010 г. порядка $0,06...0,4$.

Для г. Якутск подобие наблюдается с г. Хабаровск и то только в летний период. В зимний период для этого региона характерно особое поведение коэффициента преломления, о чем указывалось ранее в работах [12–14]. Необходимо отметить, что выбор опорных точек по результатам среднегодовой корреляции является достаточно грубым. Его уточнение возможно при использовании ежемесячных данных по корреляции коэффициентов преломления в отдельных пунктах. Для окончательного выбора опорных точек необходимо использовать введенные фактор положения (4) и оптимизационную функцию (5).

Таким образом, представляется целесообразным при создании СКНО для каждого из регионов, которые могут охватывать несколько стран, выбрать ряд опорных пунктов, обладающих подобием поведения коэффициента преломления тропосферы. Для этого на первом шаге на основании анализа карт выпадения осадков и карт годовой испаряемости выбрать пункты, имеющие примерно одинаковые показатели по осадкам и испаряемости, располагаемые на примерно одинаковых высотах и для которых осуществляется измерение метеорологических характеристик с достаточной для дальнейшего прогноза точностью: температуры с ошибкой $\pm 0,1^\circ$, давления $\pm 0,1$ мм рт. ст., относительной влажности ± 1 %.

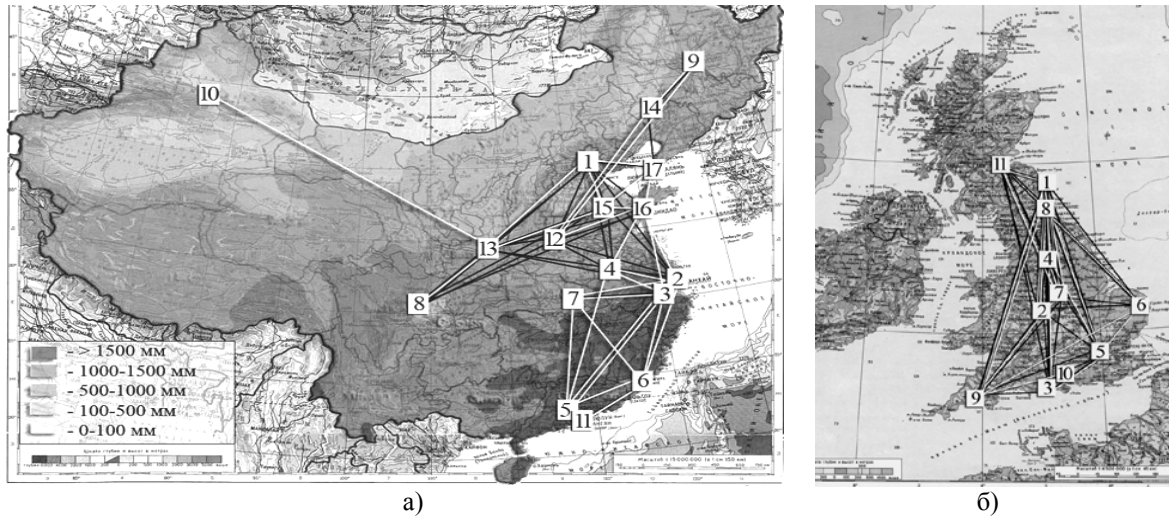


Рис. 7. Карты морфологически подобных точек: а) – Китай: 1 – Пекин; 2 – Шанхай; 3 – Ханчжоу; 4 – Нанкин; 5 – Гуанчжоу; 6 – Сямынь; 7 – Ухань; 8 – Чэнду; 9 – Харбин; 10 – Урумчи; 11 – Сянган; 12 – Чжен Чжоу; 13 – Сиань; 14 – Шеньян; 15 – Цзинань; 16 – Циндао; 17 – Далянь; б) – Великобритания: 1 – Боулмер; 2 – Бирмингем; 3 – Борнмут; 4 – Лидс; 5 – Лондон; 6 – Норидж; 7 – Ноттингем; 8 – Ньюкасл; 9 – Плимут; 10 – Саутгемптон; 11 – Эдинбург. Корреляция данных более 0,5: **—** – июль; **- - -** – январь

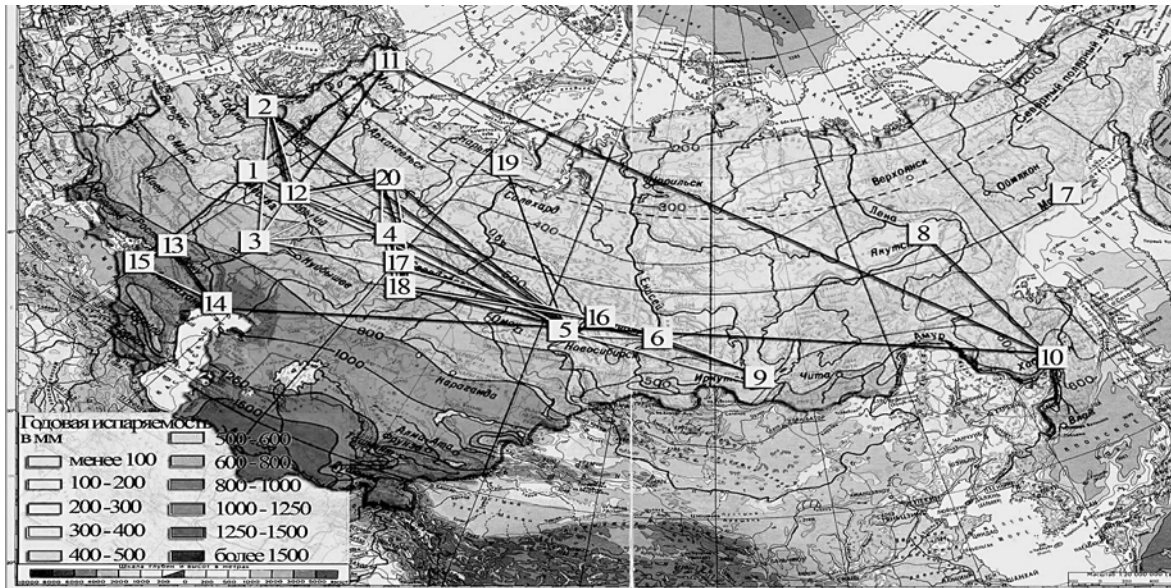


Рис. 8. Карты морфологически подобных точек: Россия: 1 – Москва; 2 – Санкт-Петербург; 3 – Саратов; 4 – Пермь; 5 – Новосибирск; 6 – Красноярск; 7 – Магадан; 8 – Якутск; 9 – Иркутск; 10 – Хабаровск; 11 – Мурманск; 12 – Н.-Новгород; 13 – Ростов на Дону; 14 – Астрахань; 15 – Краснодар; 16 – Томск; 17 – Екатеринбург; 18 – Челябинск; 19 – Воркута; 20 – Сыктывкар. Корреляция данных более 0,5: **—** – июль; **- - -** – январь

Вычислив помесячную парную корреляцию между пунктами, необходимо выбрать группы из не менее трех пунктов, обладающие наиболее высокой корреляцией и покрывающие в своей совокупности всю территорию региона, для которого необходимо осуществлять прогноз. Следует отметить, что при выборе сетки покрытия региона необходимо, чтобы опорные пункты располагались не реже 300...350 км. Выбирают те опорные пункты, внутри зоны покрытия которых лежит пункт прогноза. Данные по коэффициентам преломления опорных пунктов с использованием

соотношения (2) пересчитывают к высоте прогнозируемого пункта. Затем, применяя соотношения (6), определяют коэффициент преломления для прогнозируемого пункта местности, который и используют для введения поправки на тропосферную рефракцию.

Выводы. Предложен метод оценки коэффициента преломления, использующий данные метеоцентров в трех морфологически подобных точках пространства. Показано, что расстояние между выбираемыми опорными пунктами сетки при покрытии региона не должно превышать

250 км для летних месяцев и 600 км для зимних. Предложено для подбора опорных точек использовать подобие поведения коэффициента преломления, оцениваемое по коэффициенту парной корреляции. Для предварительного отбора точек при анализе можно использовать годовые карты выпадения осадков и испаряемости, а также физические карты региона. При этом выбираются группы точек, соответствующие примерно одинаковым условиям по осадкам и испаряемости, высотам, а также региональным особенностям (наличие морей, крупных рек). Для решения задач навигационно-космического обеспечения Украины, России, Великобритании и Китая впервые оценена степень подобия коэффициентов преломления тропосферы в различных районах этих стран. Это позволяет оптимизировать выбор опорных пунктов прогнозирования коэффициента преломления в точке нахождения потребителя навигационной информации, который можно использовать для введения региональной тропосферной поправки в приемник системы глобальной навигации.

Работа выполнена при частичном финансировании по договору № ДЗ/467-2011 с Госинформнаукой Украины.

Библиографический список

1. Kaplan E. D. Understanding GPS: Principles and Applications / E. D. Kaplan, Christopher J. Hegarty. – Boston, London: Artech House, 1996. – 692 p.
2. ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. – 3-е изд., перераб. – М.: Радиотехника, 2005. – 688 с.
3. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В. С. Шебшаевич, П. П. Дмитриев, Н. В. Иванцев и др. / под ред. В. С. Шебшаевича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.
4. Лукьяненко Н. В. Учет современных тенденций развития GNSS-технологий при разработке и производстве отечественной аппаратуры потребителей спутниковых навигационных систем / Н. В. Лукьяненко // 3 Междунар. радиоэлектрон. форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ 2008), Междунар. конф. Современные перспективные системы радиолокации, радиоастрономии и спутниковой навигации (СРРАСН-2008): сб. науч. тр. – Х., 2008. – Ч. 1. – С. 14–18.
5. European Space Agency (ESA), Galileo navigation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.esa.int/esaNA/galileo.html>.
6. Система космического навигационно-временного обеспечения Украины и ее место среди Европейских сетей мониторинга ГНСС / А. П. Верещак, К. Ф. Волох, Е. Е. Малафеев и др. // Междунар. радиоэлектрон. форум (МРФ 2005), Междунар. конф. по системам локации и навигации (МКСЛН-2005): сб. научн. тр. – Х., 2005. – Т. 2. – С. 44–52.
7. Лукьянов А. М. Коррекция тропосферных задержек сигналов спутниковых радионавигационных систем в СКНОУ / А. М. Лукьянов // Там же. – С. 536–539.
8. Diagnostics of refraction coefficient on results of meteorological parameters measurement in arbitrary points of area [Электронный ресурс] / V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, I. V. Popov et al. // Proc. 2010 Intern. Kharkov Symp. on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and

- Submillimeter Waves. – Kharkiv, 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
9. Бин Б. Р. Радиометеорология / Б. Р. Бин, Е. Дж. Даттон; пер. с англ. под ред. А. А. Семенова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1971. – 362 с.
 10. Сезонная изменчивость высотных профилей коэффициента преломления тропосферы над сушей / В. И. Луценко, И. В. Луценко, С. И. Хоменко, А. В. Зацеркляная // 20-я Междунар. Крымская конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2010): материалы конф. – Севастополь, 2010. – Т. 2. – С. 1231–1232.
 11. Оценка тропосферной рефракции по множителю ослабления радиоволн при распространении на приземных загоризонтных трассах / В. И. Луценко, И. В. Луценко, Е. Н. Белов, С. И. Хоменко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2004. – 9, № 1. – С. 248–258.
 12. Гомбоев Н. Ц. Рефракционные свойства атмосферы континентальных районов / Н. Ц. Гомбоев, Ч. Ц. Цыдыпов. – Новосибирск: Наука, 1985. – 126 с.
 13. Гомбоев Н. Ц. Дисперсия коэффициента преломления воздуха в Якутии / Н. Ц. Гомбоев // Распространение электромагнитных волн: сб. статей / Ин-т естеств. наук РАН, Сиб. отд-ние, Бурят. науч. центр. – Улан-Удэ, 1993. – С. 5–13.
 14. Гомбоев Н. Ц. Изменчивость индекса рефракции на западе Восточной Сибири / Н. Ц. Гомбоев // Всерос. науч. конф. Физика радиоволн: тез. докл. – Томск, 2002. – С. 147–148.

Рукопись поступила 05.07.2012 г.

V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, O. V. Sytnik,
N. X. Ahn, V. N. Gudkov

PREDICTION OF THE REFRACTION COEFFICIENT IN ARBITRARY POINTS OF SPACE USING RESULTS OF MEASUREMENTS OF METEOROLOGICAL PARAMETERS IN BASE STATIONS

The systems of global navigation are widely used for detection of objects location. However, disturbances and inhomogeneities of ionosphere and troposphere lead to errors in measurement of objects coordinates. A possible way to decrease errors is taking into account the troposphere influence while processing information in the system of space navigation providing (SSNP). Two main modes of correction introduction are possible: in real time and after session introduction. Both approaches are based on calculation of troposphere delays with the use of meteorological stations data on a sea level. The analysis carried out for Ukraine showed that the order of approximating model practically does not affect measurement error of troposphere delay. The conclusion was drawn on possibility of using model zeroth order, i. e. average data in Ukraine. But for larger countries the use of average data of refraction coefficient values all over the territory will lead to unreasonably great mistakes. That is why the use of standard data of meteorological stations was considered for forecasting troposphere refraction coefficient at the given point of space. The criteria of choosing forecast reference points (similar in terms of behavior of atmosphere refraction coefficients and value of loss function) have been determined. The possibility of using the suggested approach to formation of bases of reference points for forecasting is shown on examples of Ukraine, Russia, Great Britain and China. Correlations for prediction of refraction coefficient values at the given point of space have been obtained. The proposed method could be used in the SSNP of the country while applying troposphere corrections in receivers of the global navigation system.

Key words: forecasting, refraction coefficient, system of space navigation providing, troposphere correction, system of global navigation.

В. І. Луценко, І. В. Луценко, О. В. Ситнік,
Н. С. Ань, В. М. Гудков

**ПРОГНОЗУВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЗАЛОМЛЕННЯ
ТРОПОСФЕРИ У ДОВІЛЬНІЙ ТОЧЦІ ПРОСТОРУ
ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИМІРУ МЕТЕОПАРАМЕТРІВ
У ОПОРНИХ ПУНКТАХ**

Для визначення місця розташування об'єктів широке поширення отримали системи глобальної навігації. Проте збурення і неоднорідності іоносфери і тропосфери призводять до появи похибок виміру координат об'єктів. Можливими шляхами зниження, яких є урахування впливу тропосфери при обробці інформації в системі космічного навігаційного забезпечення (СКНЗ). Можливі два основні режими введення поправок: в реальному часі і післясеансного введення. Обидва ці підходи спираються на обчислення тропосферних затримок з

використанням даних метеостанцій на рівень моря. Проведений для України аналіз показав, що порядок апроксимуючої моделі практично не позначається на похибці виміру тропосферної затримки. На підставі цього був зроблений висновок про можливість використання нульового порядку моделі, тобто середніх по Україні даних. Але для більших країн використання усереднених по усій території значень коефіцієнта заломлення, призводитиме до невинновано великих похибок. Тому було розглянуто використання стандартних даних метеоцентрів для прогнозування коефіцієнта заломлення тропосфери в заданій точці простору. Визначені критерії вибору подібних (за поведінкою коефіцієнтів заломлення атмосфери і значенням функції втрат) опорних точок прогнозу. На прикладах України, Росії, Великобританії і Китаю показана можливість використання запропонованого підходу до формування баз опорних точок для прогнозування. Отримано співвідношення для прогнозу значень коефіцієнтів заломлення в заданій точці простору. Запропонований метод може використовуватися в СКНЗ країни при введенні тропосферних поправок в приймачі систем глобальної навігації.

Ключові слова: прогнозування, коефіцієнт заломлення, система навігаційно-космічного забезпечення, тропосферні поправки, система глобальної навігації.