

GPS-siqnalların zenit troposfer gecikməsinin yeni hesablanma metodikasının işlənilməsi

R.Ə. Eminov, t.e.n.

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti

Açar sözlər: GPS siqnallar, rütubət gecikməsi, zenit troposfer gecikməsi, korrelyasiya funksiyası, korrelyasiya indeksləri, hesablanma metodikası.

e-mail: eminovramiz@mail.ru

DOI.10.37474/0365-8554/2021-5-15-21

Разработка новой методики вычисления зенитной тропосферной задержки GPS-сигналов

Development of new calculation method for zenith troposphere delay of GPS signals

R.A. Eminov, t.e.n.

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности

R.A. Eminov, Cand. in Tech. Sc.

Azerbaijan State University of Oil and Industry

Ключевые слова: GPS-сигналы, влажная задержка, зенитная тропосферная задержка, корреляционная функция, корреляционные индексы, методика вычислений.

Keywords: GPS signals, wet delay, zenith troposphere delay, correlation function, correlation indexes, calculation technique.

Начиная с 1980-х гг. наблюдается устойчивый рост общего количества осадочной воды или общего количества водяных паров в атмосфере почти над всеми регионами Земли. Над океанами изменение этого показателя сильно коррелирует с температурой поверхности морской воды как во времени, так и по пространству. Очевидно, что увеличение общего количества осадочной воды или суммарного количества водяных паров приводит к повышению соответствующей компоненты тропосферной задержки сигналов GPS, которая называется "влажной задержкой". Для достижения поставленной цели в первую очередь исследованы корреляционные свойства "влажной задержки" сигналов GPS, связанных с закономерными изменениями суммарного количества осадочной воды в атмосфере.

Beginning from 1980s, the steady increase of total amount of deposited water or general amount of water vapor in the atmosphere almost above all regions of the Earth is observed. The changing of this parameter over the oceans strongly correlates with the temperature of sea water surface both in time and space. Obviously, the increase of total amount of deposited water or sum amount of water vapor leads to the growth of corresponding components of troposphere delay of GPS signals called "wet delay". To achieve the goal set, foremost, the correlation properties of "wet delay" of GPS signals associated with the regularities of changing of total amount of deposited water in the atmosphere have been studied.

Проведенный анализ существующего фактического материала корреляционных свойств "влажной" тропосферной задержки показал наличие факторов, противоположным образом влияющих на коэффициент корреляции суммарного количества осадочной воды. Предложены специальные корреляционные индексы позволяющие регулировать баланс отдельных составляющих корреляционной функции "влажной задержки". Показан экстремальный характер предложенных индексов, который позволяет регулировать баланс составляющих корреляционной функции. Разработана новая методика вычисления зенитной влажной задержки по заданной величине интегрированных показателей водяного пара в атмосфере.

Carried out analysis of actual materials of correlation properties of "wet" troposphere delay justified the presence of the aspects negatively affecting the correlation ratio of total amount of deposited water. Special correlation indexes allowing to regulate the balance of separate components of correlation function of "wet delay" are offered and their extreme nature shown as well. A new calculation technique for zenith wet delay by set value of integrated parameters of water vapor in the atmosphere has been developed.

1980-ci illərdən başlayaraq Yerın bütün regionlarında atmosferdə çökmüş suların, yaxud da su buxarlarının ümumi miqdarının sabit artımı müşahidə olunur [1].

F08, F10, F11, F13, F14 və F15 DMSP peyklərində quraşdırılmış SSM/I aparatlarından alınmış məlumatlara görə 1988–2003-cü illərdə qlobal okean zonasında çökmüş suların ümumi miqdarının 0.40 ± 0.09 mm/dekada yaxud 1.3 ± 0.3 % dekada⁻¹ qiyməti qədər müsbət artım trendi müşahidə olunmuşdur.

Okeanlar üzərində bu göstəricinin dəyişməsi onların sularının səthi hərəkətinin həm zamanla, həm də ərazi boyu dəyişilməsi ilə sıx korrelyasiya olunur. Tropik zonalarda göstərilən trend yağışların təsiri nəzərə alınmadan, onlar isə öz növbəsində külayin təsiri altında havanın rütubətli axınının hərəkəti ilə bağlıdır.

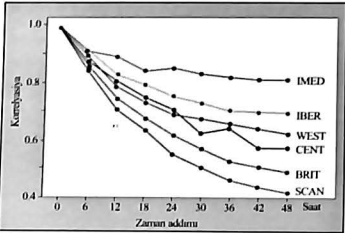
Çökmüş suların ümumi və yaxud da su buxarlarının cəm miqdarının artması GPS siqnalının "rütubət gecikməsi" adlanan troposfer gecikməsinin münasib komponentinin artmasına gətirib çıxarır.

GPS siqnalının, atmosferdəki çökmüş suların cəm miqdarının dəyişməsi qanunauyğunluğu ilə əlaqədar olan, "rütubət gecikməsinin" korrelyasiya xassələrini tədqiq etmək tələb olunur.

İlk növbədə münasib korrelyasiya tədqiqatlarının nəticələrini təhlil edək [2]. Burada göstərilir ki, Avropanın 63 aeroloji stansiyasında il ərzində alınmış eksperimental məlumatların emalı nəticəsində çökmüş suların (PWV) cəm qiymətilə ΔL_z zenit rütubət gecikmə arasında aşağıdakı empirik asılılıq alınmışdır

$$\Delta L_z [\text{cm}] = 6.277 \cdot \text{PWV} [\text{r/cm}^2]. \quad (1)$$

Aparılmış eksperimental tədqiqatlar nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, çökmüş suların cəm miqdarının zamana görə alınmış korrelyasiya asılılıq funksiyaları ayrı-ayrı iqlim zonalarında yerləşmiş stansiyaların funksiyalarından xeyli fərqlənir [3].



Şəkil 1. Altı Avropa zonası üçün çökmüş suların cəm miqdarının korrelyasiya əmsalının zaman addımından asılılıq ayrılışı:

SCAN – Cənubi Skandinaviya; BRIT – Britaniya adaları; CENT – Mərkəzi Avropa; WEST – Qərbi Avropa; İBER – İberiya yarımadası; İMED – Aralıq dənizinin İtalyan sahəsi

Şəkil 1-də altı regional zona üçün çökmüş suların cəm miqdarının korrelyasiya əmsalının zaman addımından asılılıq ayrılışı göstərilmişdir [2].

Şəkil 2-də çökmüş suların cəm miqdarının ətraf korrelyasiyasının eksperimental tədqiqatlar nəticələri və həmin parametrlər korrelyasiya əmsallarının çökmüş suların cəm miqdarının qiymətindən asılılıq ayrılışı verilmişdir [2].

Beləliklə, alınmış eksperimental nəticələrə əsaslanaraq, demək olar ki, çökmüş suların cəm miqdarı üç parametrlə korrelyasion əlaqədədir [2].

Korrelyasiyanın (avtokorrelyasiya) funksiyası üç arqumentin funksiyası kimi təmsil oluna bilər

$$R = R(X_1, X_2, X_3), \quad (2)$$

burada X_1, X_2 – seçmələr götürülməsinin zaman və ərazi addımları; X_3 – çökmüş suların cəm qiymətidir.

Yuxarıdakıları nəzərə alaraq, çökmüş suların cəm miqdarının, eləcə də (1) ifadəsini nəzərə alaraq, GPS siqnalının rütubətli troposfer gecikməsinin korrelyasion xassələrinin parametrizasiyası məsələsini nəzərdən keçirək.

Ümumi halda seçmələr alınmasının və onların ortalanmasının riyazi proseduru aşağıdakı düsturla ifadə olunacaq

$$\sigma^2(Y) = (\overline{Y_i - Y_{i-1}})^2 = (\overline{Y_i^2} - 2\overline{Y_i \cdot Y_{i-1}} + \overline{Y_{i-1}^2}) = 2D(Y)(1 - R), \quad (3)$$

burada $D(Y)$ – Y -in dispersiyası; Y – çökmüş suların cəm miqdarının cari qiyməti; $\sigma(Y)$ – Y -in orta kvadratik kənarlaşmasıdır.

(2) və (3) ifadələrini nəzərə alsaq

$$R(X_1, X_2, X_3) = 1 - \frac{\sigma^2(Y)}{2D(Y)}. \quad (4)$$

Bu halda $R(X_1, X_2, X_3)$ funksiyası çökmüş suların ümumi miqdarının statistik xassələrini bütövlükdə xarakterizə edir.

Birinci yaxınlaşmada $R = R(X_1, X_2, X_3)$ funksiyası aşağıdakı şəkildə yazıla bilər

$$R(X_1, X_2, X_3) = \frac{\partial R}{\partial X_1} \cdot \Delta X_1 + \frac{\partial R}{\partial X_2} \cdot \Delta X_2 + \frac{\partial R}{\partial X_3} \cdot \Delta X_3. \quad (5)$$

(X_1, X_3) və (X_2, X_3) parametrlərinə görə R kəmiyyətinin əksfəzalı dəyişmələrini nəzərə alaraq və $R(X_1, X_2)$ və $R(X_2, X_3)$ asılılıqlarını düz xətlərlə approksimasiya edərək, (5)-ci ifadədən bunu alarıq

$$R(X_1, X_3) = a_1 \cdot \Delta X_1 + a_3 \cdot \Delta X_3, \quad (6)$$

$$R(X_2, X_3) = a_2 \cdot \Delta X_2 + a_3 \cdot \Delta X_3, \quad (7)$$

burada $a_i, i = 1, 3 - \partial R / \partial X_i$ -in orta qiymətidir, yəni

$$a_1 = \left(\frac{\partial R}{\partial X_1} \right)_{\text{cp}}; a_2 = \left(\frac{\partial R}{\partial X_2} \right)_{\text{cp}}; a_3 = \left(\frac{\partial R}{\partial X_3} \right)_{\text{cp}}. \quad (8)$$

Çökmüş suların cəm miqdarının korrelyasiya xassələrinin parametrizasiyası məqsədlə baxılması üçün aşağıdakı korrelyasiya indekslərini daxil edək

$$K_1(X_1, X_3) = a_1 \cdot a_3 \cdot \Delta X_1 \cdot \Delta X_3, \quad (9)$$

$$K_2(X_2, X_3) = a_2 \cdot a_3 \cdot \Delta X_2 \cdot \Delta X_3. \quad (10)$$

Daxil etdiyimiz $K_1(X_1, X_3)$ və $K_2(X_2, X_3)$ korrelyasiya indekslərinin ekstremal xassələrə malik olduğunu göstərək. Qeyd edək ki, yuxarıda irəli sürdüyümüz stübutların riyazi proseduru həm $K_1(X_1, X_3)$, həm də $K_2(X_2, X_3)$ üçün eynidir. Bu səbəbdən biz həm burada, həm də sonra $K_1(X_1, X_3)$ indeksini nəzərdən keçirəcəyik.

(6)-cı ifadədəki ΔX_3 qiymətinin sabitliyini nəzərə alsaq

$$a_1 \Delta X_1 + a_3 \Delta X_3 = C, \quad (11)$$

burada $C = const$.

Aşağıdakı şərtin də yeri var

$$(a_1 \Delta X_1 + a_3 \Delta X_3)^2 = C_1, \quad (12)$$

burada $C_1 = C^2$.

(12)-ci ifadədən bunu alarıq

$$(a_1 \Delta X_1)^2 + 2 a_1 \Delta X_1 \cdot a_3 \Delta X_3 + (a_3 \Delta X_3)^2 = C_1. \quad (13)$$

(13)-cü ifadəni bu şəkildə yazmaq

$$(a_1 \Delta X_1)^2 - 2 a_1 a_3 \Delta X_1 \Delta X_3 + (a_3 \Delta X_3)^2 + 3 \cdot K_1(X_1, X_3) = C_1. \quad (14)$$

$C = const$ olduğunu nəzərə alsaq, aşağıdakı şərt

95232
Azərbaycan Milli
Kitabxanası

$$K_1(X_1, X_2) \rightarrow \max \quad (15)$$

bu şərtə ekvivalent olacaq

$$\left[(a_1 \Delta X_1)^2 - a_1 a_2 \Delta X_1 \Delta X_2 + (a_2 \Delta X_2)^2 \right] \rightarrow \min. \quad (16)$$

(11)-ci və (16)-cı ifadələri nəzərə alaraq aşağıdakı optimizasiya məsələsini tərtib edək: (11)-ci ifadəni məhdudlaşdırmaq, (16)-nın şərtini təmin edən, $a_1 \Delta X_1$ və $a_2 \Delta X_2$ arasındakı qarşılıqlı əlaqəni hesablamaq. Yuxarıda qoyduğumuz optimizasiya məsələsini həll etmək üçün çarimə funksiyalar metodunu tətbiq edək. Çarimə funksiyası kimi aşağıdakı ifadədən istifadə olunur

$$M = \beta (a_1 \Delta X_1 + a_2 \Delta X_2 - C), \quad (17)$$

burada β – çarimə parametridir.

(14)-cü və (17)-ci ifadələri nəzərə almaqla aşağıdakı optimizasiya funksionalını tərtib edək

$$F = (a_1 \Delta X_1)^2 - a_1 a_2 \Delta X_1 \Delta X_2 + (a_2 \Delta X_2)^2 + 3 \cdot K_1(X_1, X_2) + \beta (a_1 \Delta X_1 + a_2 \Delta X_2 - C). \quad (18)$$

(18)-ci ifadənin fərdi törəməsini ΔX_1 və ΔX_2 görə hesablayıb, alınmış ifadələri sıfıra bərabər edərək, ΔX_1 və ΔX_2 üçün:

$$\Delta X_1 = \frac{3\beta \cdot 3a_1 \cdot C - 3a_1 a_2 \Delta X_2 - 2\beta \cdot 3 \cdot a_1 a_2 \Delta X_2}{2 \cdot 9 \cdot a_1^2 + 2 \cdot \beta \cdot 9 \cdot a_1^2} \quad (19)$$

$$\Delta X_2 = \frac{3\beta \cdot 3 \cdot a_2^2 \cdot \beta \cdot C}{3 \cdot 9 \cdot a_2^2 + 4 \cdot 9 \cdot a_2^2 \cdot \beta} \quad (20)$$

(19)-cu və (20)-ci ifadələrdən $\beta \rightarrow \infty$ şərti altında aşağıdakı həll yolunu alarıq

$$\Delta X_1 = \frac{C}{2}; \quad 3 \cdot a_1 \cdot \Delta X_1 = \frac{C}{2}.$$

Beləliklə, yenidən daxil edilmiş multiplikativ $K_1(X_1, X_2)$ göstəricisi, ΔX_1 və $3 \cdot a_1 \cdot \Delta X_2$ parametrləri bərabər olduqda maksimum qiymətinə çatır.

Analoji olaraq, yuxarıdakı proseduru təkrar edib, $K_2(X_1, X_2)$ parametrlərinin maksimal qiymətə çatdırılmasının şərtini hesablamaq olar.

Yeni daxil edilmiş $K_1(X_1, X_2)$ və $K_2(X_1, X_2)$ korrelyasiya parametrlərinin elmi dəyəri ondan irəli gəlir ki, bu parametrlər $a_1 \Delta X_1$ və $a_2 \Delta X_2$ komponentlər arasındakı balans saxlamağa imkan verməklə yanaşı, onlardan birinin digərinə nisbətən həddindən çox azalmasına və ya da artmasına yol vermir, başqa halda bu, digər parametrlərin əksinə dəyişməsinə səbəb ola bilər.

Su buxarının inteqrallaşmış göstəricilərinin verilmiş qiymətlərinə görə zenit rütubət gecikməsinin hesablanması üçün yeni metodikamızın işlənilməsi imkanı nəzərdən keçirilir.

Məlumdur ki, zenit rütubət gecikməsinin ZWD qiymətilə su buxarlarının IWV ümumi miqdarı arasında aşağıdakı asılılıq mövcuddur

$$ZWD = \omega \cdot IWV, \quad (21)$$

$$\text{burada } \omega = 10^{-6} \left(k_2^2 + \frac{k_3}{T_m} \right) \cdot R_w, \quad (22)$$

burada k_2 və k_3 – refraktivlik sabiti; $k_2^2 = 22.1 \text{ K/hPa}$; $k_3 = 370100 \text{ K}^2/\text{hPa}$; R_w – su buxarı üçün spesifik qaz sabitidir.

PW çökmüş sular miqdarı ilə su buxarlarının IWV ümumi miqdarı arasında aşağıdakı əlaqə düsturu

mövcuddur [4]

$$PW = \frac{IWV}{\rho_{Lw}}, \quad (23)$$

burada ρ_{Lw} – mayeli suyun sıxlığıdır.

İlk növbədə ω əmsalının mövcud hesablanma metodikasını nəzərdən keçirək [5].

(21), (22) və (23)-cü ifadələri nəzərə alsaq, ZWD/PW nisbətinin aşağıdakı əmsalını alarıq:

$$Q = \frac{ZWD}{PW} = 10^{-6} \cdot \rho_{Lw} \cdot \frac{R_0}{M_w} \left[k_2^2 + \frac{k_3}{T_m} \right] = 0.10200 + \frac{1708.08 [K]}{T_m}, \quad (24)$$

burada M_w – su buxarının molyar kütləsi; R_0 – universal qaz sabitidir, $8.31434 \text{ [Coul} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$. Atmosferin orta hərəkətinin hesablanması üçün məlum modellər nəzərdən keçirilib [5]. Bevis və əməkdaşları aşağıdakı düsturu təklif etmişlər [5, 6]

$$T_m = 70.2 [K] + 0.72 \cdot T_0, \quad (25)$$

burada T_0 – səth üzərində temperatur, K ; T_m – atmosferin orta temperaturudur, K .

(25)-ci düstur dünyanın müxtəlif regionlarında tətbiq oluna bilər.

Mendesin və əməkdaşlarının aşağıdakı düsturu təklif olunur [5, 7]

$$T_m = 50.4 [K] + 0.789 T_0, \quad (26)$$

Qeyd olunur ki, (26)-cı düstur radiozond ölçmələr nəticələrinin emalı yolu ilə alınmış. Solbriqin aşağıdakı düsturu təklif olunur [8, 9]

$$T_m = 54.7 [K] + 0.77 T_0, \quad (27)$$

(27)-ci düstur (25)-ci düstur kimi dünyanın bütün regionlarında tətbiq oluna bilər.

Beləliklə, (21) – (27)-ci düsturlar zenit rütubət gecikməsinin sonrakı təyini üçün ω yaxud Q əmsallarının məlum hesablanma metodikasının əsasını təşkil edir.

Həmin metodikamızın əsas çatışmazlığı, burada fəsilə görə və eləcə də GPS stansiyalarının yerləşməsinin coğrafi göstəricilərinə görə ω , yaxud Q qiymətlərinin diferensiasiyası imkanın olmamasıdır.

Beləliklə, bu məqalədə ω qiymətinin təyini üçün əla bir yeni metodika işlənilibdir ki, ω aşağıdakı parametrlərə görə diferensiasiya etməyə imkan verir: fəsilə görə; stansiyanın dəniz səviyyəsindən yuxarıda yerləşməsinin H orta yüksəkliyinə görə; φ – dərəcə ilə en dairəsinə, yəni verilmiş fəsilədə $\omega = \omega(\varphi, H)$ funksiyasının təyini üçün en dairəsinə görə.

Qarşıda qoyulan məqsədə nail olmaq üçün verilmiş tədqiqat nəticələrindən istifadə edək [10]. $\omega = \omega(\varphi, H)$ funksiyasının ərazi dəyişməsi aşağıdakı funksiya şəklində modelləşdirilə bilər [2]

$$\omega(\varphi, H) = \exp[a + bH + c\varphi^2], \quad (28)$$

burada a, b, c – radiozondlar vasitəsilə edilən ölçmə nəticələrinin interpolation metodu əməlinə alınan sabit kəmiyyətlər; H – yüksəklik; φ – stansiya yerləşməsinin coğrafi en dairəsidir.

Yaxşı nəticələr göstərmiş (21), (22) və (28) modellərdən ikisini tutuşdurmaqla, a, b, c sabit kəmiyyətlərinin təyini metodu işlənib, təklif olunur.

ω kəmiyyətinin qiymətləndirilməsi bərabərliyini nəzərə alsaq [5, 10], bunu yazmaq olar:

$$\exp[a + bH + c\varphi^2] = 10^{-6} \left(k_2^2 + \frac{k_3}{T_m} \right). \quad (29)$$

(29)-cu ifadəni loqarifmləsək,

$$a + bH + c\varphi^2 = \ln \left[10^{-6} \left(k_2^2 + \frac{k_3}{T_m} \right) \right]. \quad (30)$$

(27)-ci və (30)-cu ifadələri nəzərə alsaq,

$$a + bH + c\varphi^2 = \ln \left[10^{-6} \left(k_2 + \frac{k_3}{54.7 + 0.77 \cdot T_0} \right) \right] \quad (31)$$

Sabit a, b, c kəmiyyətlərini təyin etmək üçün, müxtəlif $\varphi, i = 1, 3$ coğrafi en dairələrində və fərqli $H, i = 1, 3$ yüksəkliklərdə yerləşən üç stansiya üçün, (31) tipli üç tənlikdən ibarət sistem tərtibi təklif olunur:

$$a + bH_1 + c\varphi_1^2 = \ln \left[10^{-6} \left(k_2 + \frac{k_3}{54.7 + 0.77 \cdot T_{01}} \right) \right], \quad (32)$$

$$a + bH_2 + c\varphi_2^2 = \ln \left[10^{-6} \left(k_2 + \frac{k_3}{54.7 + 0.77 \cdot T_{02}} \right) \right], \quad (33)$$

$$a + bH_3 + c\varphi_3^2 = \ln \left[10^{-6} \left(k_2 + \frac{k_3}{54.7 + 0.77 \cdot T_{03}} \right) \right], \quad (34)$$

burada $T_{0i}, i = 1, 3$ – yer səthində hava hərərinin ölçülmüş orta qiymətləridir.

Nəzərdə tutduğumuz GPS stansiyalarının yerləşmə zonasında ölçülmüş $T_{0i}, i = 1, 3$ qiymətlərini nəzərə almaqla, (22)–(24)-cü tənliklər sisteminin birgə həlli a, b, c sabitlərinin qiymətlərini almağa imkan verir. a, b, c kəmiyyət qiymətlərinin sonrakı ortalaşdırılması üçün aşağıdakı hesablama alqoritmı təklif etmək olar:

– tədqiq olunan regionda qəbuləddici GPS stansiyaların əldə olan parkı üç stansiyadan ibarət triadaya bölünür;

– hər triada üçün a, b, c qiymətlərini hesablamaq məqsədilə, onlar üçün (32) – (33) tipli tənliklər sistemi tərtib olunur;

– aşağıdakı düstura görə a, b, c qiymətlərinin ortalanması edilir

$$a_{sp} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}; \quad b_{sp} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{n}; \quad c_{sp} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{n}, \quad (35)$$

burada n – qəbul edən GPS stansiyaların tədqiq olunan triadalarının sayıdır.

Qeyd etmək lazımdır ki, a, b, c qiymətləri həmçinin fəsilərə görə də ayrı-ayrılıqda təyin oluna bilər. Məsil kimi Misir ərazisi üçün verilmiş eksperimental ölçmə nəticələri maraqlıdır [11]. Burada yer səthi üzərindəki hava hərətlərinin orta fəsil və orta illik ölçmə nəticələri təhlil olunmuşdur.

Minimal hərərat		Maksimal hərərat		Fəsil
Misir ərazisinin hissələri	Qiymətlər, °C	Misir ərazisinin hissələri	Qiymətlər, °C	
şimal-şərq	11	cənub-şərq	19	qış
şimal	18	cənub	26	yaz
şimal	25	cənub-şərq	33	yay
şimal-şərq	20	cənub-şərq	28	payız
şimal	20	cənub-şərq	28	orta illik

Cədvəldə Misirin müxtəlif hissələrində 1948–2005-ci illərdə temperaturun maksimal və minimal qiymətləri verilmişdir. Cədvəldə görünür ki, yer səthində ölçmələr aparılan müddətdə havanın orta hərəratı il boyu fəsildən-fəsildə dəyişib. Havanın maksimal (33 °C) hərəratı yaz fəsilində Misirin cənub hissəsində, minimal (11 °C) isə Misirin şimal hissəsində qış fəsilində müşahidə edilmişdir.

Bəsləklə, təklif olunan zenit rütubət gecikməsinin təyini metodu aşağıdakıları nəzərdə tutur:

- müxtəlif fəsillərdə tədqiq olunan ərazi üçün T_0 kəmiyyətinin ölçmələri aparılır;
- münasib müşahidə fəsil üçün (35)-ci düsturla hesablanmış a_{sp}, b_{sp} və c_{sp} qiymətlərinə və eləcə də φ və

H kəmiyyətlərinin məlum qiymətlərinə görə $\omega = \omega(\varphi, H)$ funksiyasının növü təyin olunur

$$\omega(\varphi, H) = \exp \left[a'_{sp} + b'_{sp} \cdot H + c'_{sp} \cdot \varphi^2 \right], \quad (36)$$

burada $a'_{sp}, b'_{sp}, c'_{sp} = a_{sp}, b_{sp}, c_{sp}$ kəmiyyətlərinin münasib fəsil qiymətləridir. Münasib fəsil üçün zenit rütubət gecikmənin qiyməti bu cür təyin olunacaq

$$ZWD = IWWW \cdot \exp \left[a'_{sp} + b'_{sp} \cdot H + c'_{sp} \cdot \varphi^2 \right].$$

Nəticələr

1. “Rütubət” troposfer gecikməsinin korrelyasiya xassələrinin mövcüd materialların aparılmış təhlili, çökmüş suların cəm miqdarının korrelyasiya əmsalına əks təsir edən amillərin olmasını göstərmişdir.
2. “Rütubət gecikməsinin” korrelyasiya funksiyasının ayrı-ayrı tərkiblərinin balansını nizamlamağa imkan verən xüsusi korrelyasiya indeksləri təklif olunmuşdur.
3. Korrelyasiya funksiyası tərkibinin balansını nizamlamaq üçün indekslərin ekstremal xarakterini göstərmişdir.
4. Atmosferdəki su buxarının inteqrallanmış göstəricilərinin verilmiş qiymətlərinə görə zenit rütubət gecikməsinin yeni hesablanma metodikası işlənmişdir.

Ədəbiyyat siyahısı

1. Trenberth, K.E., Fasullo, J., Smith, L. Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor // *Climate Dynamics*, 2005, No. 24, pp. 741-758.
2. Kamnath, K.L., Trenel, H.N. Analysis of spatial and temporal correlations of meteorological parameters associated with tropospheric delay modeling Refraction of transatmospheric signals in geodesy // *Proceedings of the symposium*, The Hague, the Netherlands, 1992, May 19-22.
3. Dyrud, L., Jovanovic, A., Brown, A., Wilson, D., Ganguly, S. Ionospheric measurement with GPS // *Radio Science*, 2008, December, v. 43, No.6; http://www.cfrs.com/pdf/newreceivervbrochure_gpswofinal.pdf
4. Schuler, T., Posfay, A., Hein, G.W., Biberger, R.A. Global analysis of the mean atmospheric temperature for GPS water vapor estimation // *Proceedings of ION-GPS 2001*, The Institute of Navigation, Salt Lake City, Utah, September 11-14, 2001, pp. 2476-2489.
5. Schuler, T., Hein, G.H., Eissfaller, B. Tropospheric delay prediction in wide area augmentation systems using numerical weather fields // *Institute of Geodesy and Navigation (IEN)*, University FAF Munich D-85577 Neubiberg, Germany, pp. 498-509.
6. Bevis, M. GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System // M. Bevis, S. Businger, T. Herring [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, v. 97, No D14, pp. 15787-15801.
7. Mendes, V.B. and Langley, R.B. Optimization of tropospheric delay mapping function performance for high-precision geodetic applications // *Toulouse, France, Proceedings of DORIS Days*, 27-29 April, 1998; <http://gauss.ggc.unb.ca/papers/pdf/dorisdays.pdf>
8. Дьячкова, Н.Г., Эминов, Р.А., Исмаилов, Н.В. Оптимизация прогнозирования температуры атмосферы с помощью GPS радиозатменных измерений. – М.: Геодезия и картография, 2017, № 1, с. 53-56.
9. Solbrig, P. Untersuchungen über die Nutzungsgemischer wetter modell zurwasserdampf bestimmung mit Hilfe des global positioning systems // *Diploma thesis*, Institute of Geodesy and Navigation, University FAF Munich, Germany, 2000.
10. Jade, S., Vijayan, M.S.M. GPS-based atmospheric precipitable water vapour estimation using meteorological parameters interpolated from NCEP global reanalysis data // *Journal of Geophysical Research*, 2008, v. 113, D03106, pp. 1-12; doi:10.1029/2007JD008758.
11. Hafez, Y.Y., Robaa, S.M. The relationship between the mean surface air temperature in Egypt and ENSO // *The Open Atmospheric Journal*, 2008, No. 2, pp. 8-17.
12. Tselioudis, G. Temperature dependence of low cloud optical thickness in the GISS GCM: Contributing mechanisms and climate implications // *G. Tselioudis, A. Delgenio, W. Jr [et al.] // Journal of Climate*, 1998, v. 11, pp. 3268-3281.

References

1. Trenberth, K.E., Fasullo, J., Smith, L. Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor // *Climate Dynamics*, 2005, No. 24, pp. 741-758.
2. Kamnath, K.L., Trenel, H.N. Analysis of spatial and temporal correlations of meteorological parameters associated with tropospheric delay modeling Refraction of transatmospheric signals in geodesy // *Proceedings of the symposium*, The Hague, the Netherlands, 1992, May 19-22.
3. Dyrud, L., Jovanovic, A., Brown, A., Wilson, D., Ganguly, S. Ionospheric measurement with GPS // *Radio Science*, 2008, December, v. 43, No.6; http://www.cfrs.com/pdf/newreceivervbrochure_gpswofinal.pdf
4. Schuler, T., Posfay, A., Hein, G.W., Biberger, R.A. Global analysis of the mean atmospheric temperature for GPS water vapor estimation // *Proceedings of ION-GPS 2001*, The Institute of Navigation, Salt Lake City, Utah, September 11-14, 2001, pp. 2476-2489.
5. Schuler, T., Hein, G.H., Eissfaller, B. Tropospheric delay prediction in wide area augmentation systems using numerical weather fields // *Institute of Geodesy and Navigation (IEN)*, University FAF Munich D-85577 Neubiberg, Germany, pp. 498-509.
6. Bevis, M. GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System // M. Bevis, S. Businger, T. Herring [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, v. 97, No D14, pp. 15787-15801.
7. Mendes, V.B. and Langley, R.B. Optimization of tropospheric delay mapping function performance for high-precision geodetic applications // *Toulouse, France, Proceedings of DORIS Days*, 27-29 April, 1998; <http://gauss.ggc.unb.ca/papers/pdf/dorisdays.pdf>
8. Дьячкова, Н.Г., Эминов, Р.А., Исмаилов, Н.В. Оптимизация прогнозирования температуры атмосферы с помощью GPS радиозатменных измерений. – М.: Геодезия и картография, 2017, № 1, с. 53-56.
9. Solbrig, P. Untersuchungen über die Nutzungsgemischer wetter modell zurwasserdampf bestimmung mit Hilfe des global positioning systems // *Diploma thesis*, Institute of Geodesy and Navigation, University FAF Munich, Germany, 2000.
10. Jade, S., Vijayan, M.S.M. GPS-based atmospheric precipitable water vapour estimation using meteorological parameters interpolated from NCEP global reanalysis data // *Journal of Geophysical Research*, 2008, v. 113, D03106, pp. 1-12; doi:10.1029/2007JD008758.
11. Hafez, Y.Y., Robaa, S.M. The relationship between the mean surface air temperature in Egypt and ENSO // *The Open Atmospheric Journal*, 2008, No. 2, pp. 8-17.
12. Tselioudis, G. Temperature dependence of low cloud optical thickness in the GISS GCM: Contributing mechanisms and climate implications // *G. Tselioudis, A. Delgenio, W. Jr [et al.] // Journal of Climate*, 1998, v. 11, pp. 3268-3281.