

ISSN 1028-821X. Radiofiz. Electron. 2021. Vol. 26, No. 2: 10–15

DOI: <http://doi.org/10.15407/rej2021.02.010>

УДК 621.375.018.756

І.М. Миценко, Д.Д. Халамейда

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України

12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

E-mail: khalameyda@ire.kharkov.ua

Добова залежність ослаблення радіосигналу X-діапазону на трасі «геостаціонарний штучний спутник Землі – Земля»

Предмет і мета роботи. Статистичні дані щодо впливу змін характеристик різних шарів тропосфери та гідрометеоутворень у її нижніх шарах на рівень супутникового сигналу необхідні розробникам систем діагностики погодних умов і характеристик гідрометеоутворень. Метою цієї роботи є узагальнення багаторічних результатів досліджень добової залежності ослаблення радіосигналу X-діапазону на трасі «геостаціонарний штучний супутник Землі (ГШСЗ) – Земля», а також встановлення зв'язків зміни рівня сигналу в точці приймання з геофізичними явищами в тропосфері.

Методи і методологія роботи. У роботі застосовано метод експериментальних досліджень. З використанням розробленого авторами приймального вимірювально-реєструючого комплексу встановлювався зв'язок зміни рівня радіосигналу ГШСЗ у точці приймання з геофізичними явищами в атмосфері.

Результати роботи. У статті наведено опис роботи схеми приймального вимірювально-реєструючого комплексу, розглянуто геометричні параметри траси поширення радіосигналу ГШСЗ. Узагальнено результати вимірювань рівня сигналу супутника *Hot Bird* упродовж 03–17 січня 2019 року та запропоновано їх узагальнену інтерпретацію.

Висновки. Ослаблення радіосигналу на трасі «ГШСЗ – Земля» в X-діапазоні радіохвиль має добову залежність. Зміни рівня радіосигналу не пов'язані зі змінами просторово-технічних параметрів ГШСЗ і приймальної апаратури. Відмінності в ослабленні радіосигналу в денний і нічний періоди пов'язані з тривалістю дня і кутом падіння сонячних променів, включаючи сутінки, на ділянки тропосфери, які знаходяться в діаграмі направленості приймальної антени на трасі поширення, і, змінюючи їх температурний режим, впливають на вміст у них вологи. Фізичні явища, які відбуваються в найвищих шарах тропосфери, коли Сонце освітлює їх, перебуваючи далеко за горизонтом, можуть бути інтерпретовані для далекого тропосферного поширення радіохвиль, коли використовуються ці ділянки тропосфери. Іл. 4. Бібліогр.: 6 назв.

Ключові слова: геостаціонарний штучний супутник Землі, супутниковий конвертор, тропосфера, гідрометеоутворення.

Геостаціонарні супутники обертаються навколо Землі над екватором з висотою орбіти 36 000 км і швидкістю, що дорівнює кутовій швидкості обертання Землі навколо осі. Це дає можливість постійно опромінювати конкретну частину поверхні Землі і приймати супутникові сигнали. Площа поверхні Землі, яку опромінює геостаціонарний штучний супутник Землі (ГШСЗ), залежить від поставлених завдань і визначається формою діаграми направленості передавальної системи транспондера. З огляду на це ГШСЗ знайшли широке застосування в супутниковому телебаченні. Простота і до-

ступність приймальної апаратури супутникового телебачення, застосовувані частотні діапазони та екологічна безпека дали можливість використовувати радіосигнали ГШСЗ для радіофізичних досліджень [1, 2] і вирішення прикладних завдань [3, 4].

Геометричні параметри траси поширення «ГШСЗ – Земля» представлені на рис. 1, де H – висота розташування ГШСЗ; h – висота розташування гідрометеоутворення; R – відстань від приймальної антени до гідрометеоутворення; β – кут місця напрямку на ГШСЗ; $R_3 \approx 6370$ км – радіус Землі. Відстань R від приймальної антени

ни до будь-якої точки на трасі поширення визначається рівнянням [5]:

$$R = \sqrt{(R_3 + h)^2 - R_3^2 \cos^2 \beta} - R_3 \sin \beta. \quad (1)$$

Приймальний вимірювальний комплекс, за допомогою якого приймали і реєстрували рівень радіосигналу ГШСЗ з кутом місця $X \approx 30^\circ$, знаходився в м. Харкові ($49^\circ 58' 50''$ пн. ш. $36^\circ 15' 09''$ сх. д.). Для цього випадку, відповідно до (1), відстань між приймальною антеною і ГШСЗ дорівнюватиме $R \approx 39\,000$ км. Метою цієї роботи є дослідження добової залежності ослаблення радіосигналів X-діапазону на трасі «ГШСЗ – Земля» і встановлення зв'язків зміни рівня сигналу в точці приймання з геофізичними явищами в атмосфері, перш за все в її нижньому шарі – тропосфері. Як відомо [5], атмосферу зазвичай прийнято ділити на три шари: тропосферу, стратосферу та іоносферу. Тропосфера простягається до висоти 10...12 км, стратосфера – від 10...12 і до 60 км, іоносфера – вище 60 км. У тропосфері відбувається ослаблення радіохвиль досліджуваного діапазону через поглинання їх як газами атмосфери, так і атмосферними утвореннями – туманами, хмарами та ін. У стратосфері особливості поширення радіохвиль такі самі, що і в тропосфері, але слабше виражені. Вважатимемо, що іоносфера для радіохвиль X-діапазону прозора і не впливає на їх поширення.

Розглянемо фактори, що впливають на зміни рівня радіосигналу ГШСЗ у деякій місцевості. Одним з таких факторів є дрейф штучного супутника на геостационарній орбіті, що пов'язаний з еліптичною формою Землі, тяжінням Сонця і Місяця, а також іншими чинниками, які сприяють відхиленню ГШСЗ від своєї орбіти. У результаті має місце лібрація зі сходу на захід або рух вперед і назад. Подолання наслідків такого руху здійснюється за допомогою спеціальних двигунів і на добову залежність рівня сигналу в точці приймання практично не впливає. Іншим недоліком геостационарної орбіти є зменшення або повна відсутність сигналу в момент, коли Сонце і супутник знаходяться на одній лінії з приймальною антеною (положення «Сонце за супутником»). Це явище (сонячна інтерференція) властиве й іншим орбітам, але проявляється особливо яскраво, коли

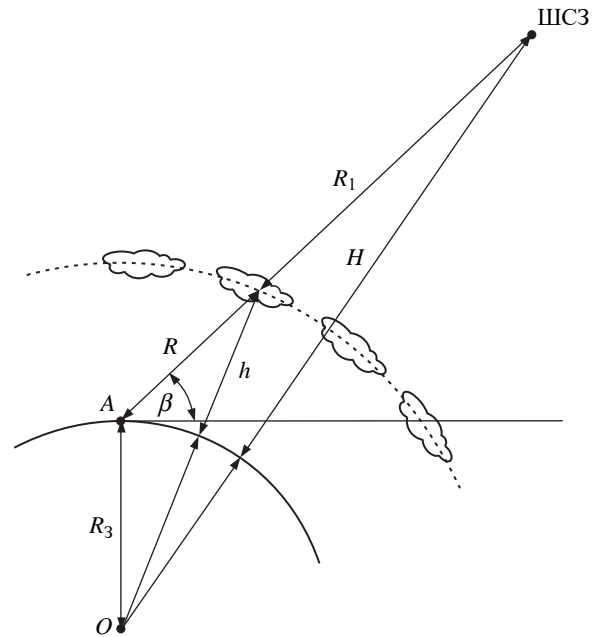


Рис. 1. Геометричні параметри траси поширення

супутник на небі «нерухомий». У середніх широтах північної півкулі сонячна інтерференція тривалістю до 10 хвилин спостерігається з 22 лютого до 11 березня і з 3 до 21 жовтня. У такі моменти в ясну погоду сфокусовані сонячні промені можуть навіть пошкодити конвертор супутникової антени. Під час проведення експериментів [6] автори спостерігали збільшення рівня вихідної напруги на детекторі приймально-вимірювального комплексу, особливо в ясну погоду, коли в азимутальній площині напрямки на супутник і на Сонце збігалися. Це пов'язано з тим, що частина сонячного радіовипромінювання потрапляє в діаграму направленості приймальної антени. Таке явище спостерігається короткочасно і не впливає на добову залежність рівня сигналів ГШСЗ.

Наступним явищем, яке може призвести до зміни рівня радіосигналів ГШСЗ, є атмосферна рефракція. За певних метеорологічних умов, радіосигнал, який прямує під невеликим кутом до горизонту (кілька градусів), може відхилитися до поверхні Землі. У разі застосування вузьконаправлених антен це призводить до зсуву наведення антени на максимум сигналу ГШСЗ. При проведенні експериментів це явище було враховано – використовувалися сигнали ГШСЗ з великим кутом місця $\beta \approx 30^\circ$ і шириною діаграми направленості антени приймальної системи $\sim 1,5^\circ$, тому вплив атмосферної рефракції

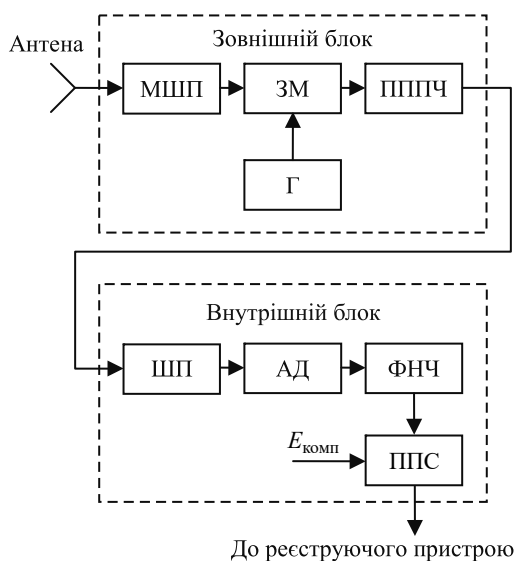


Рис. 2. Приймальний вимірювально-реєструючий комплекс: МШП – малошумливий підсилювач; ЗМ – змішувач; ПППЧ – попередній підсилювач проміжних частот; ШП – широкопasmовий підсилювач; АД – амплітудний детектор; ФНЧ – фільтр низьких частот; ППС – підсилювач постійного струму

було виключено. Таким чином, можна зробити висновки, що зміни просторових і технічних параметрів самого ГШСЗ не впливають на добову залежність рівня сигналу – вона визначається перш за все фізичними процесами, що відбуваються в тропосфері. Перейдемо до розгляду експериментальних досліджень.

1. Приймальний вимірювально-реєструючий комплекс. Для досліджень використовувалися радіосигнали геостационарного супутника *Hot Bird* (13° сх. д., $\beta \approx 30^\circ$). Потужність сигналу, що випромінюється супутником, визначається потужністю P_0 передавача транспондера і посиленням G_0 бортової антени. Еквівалентна ізотропно випромінювана потужність (ЕІВП) цього супутника для Харкова становить 50 дБ/Вт ($ЕІВП = P_0 G_0$), що дозволяє здійснювати впевнене приймання радіосигналів на параболічну антену діаметром 0,9 м. Структурну схему приймального вимірювально-реєструючого комплексу наведено на рис. 2.

В якості зовнішнього блока застосовувався стандартний конвертор супутникового телебачення з такими параметрами: діапазон частот 10,7...12,75 ГГц; коефіцієнт шуму 0,3 дБ; смуга пропускання тракту проміжної частоти 950...2 150 МГц; загальне посилення конвертора 65 дБ. Вихідний сигнал конвертора по кабе-

лю подається на внутрішній блок. У внутрішньому блоці за допомогою широкопasmового підсилювача ШП ($K_{підс.} = 18$ дБ) відбувається подальше посилення сигналу проміжної частоти (950...2 150 МГц). Потім посилений сигнал подається на амплітудний детектор АД, на виході якого включений фільтр низьких частот ФНЧ з пропускнуою здатністю 0...600 Гц. Амплітудний детектор зібраний на германієвих діодах, що дозволяє використовувати його лінійну ділянку вольтамперної характеристики при мінімальних рівнях вихідного сигналу. Подальше посилення детектованого сигналу здійснюється за допомогою операційного підсилювача ППС, який також служить узгоджувальним елементом з реєструючим пристроєм. В якості останнього використано цифровий спектроаналізатор *Velleman*, пов'язаний з комп'ютером. Запис сигналу проводився протягом декількох діб.

2. Аналіз результатів експериментальних досліджень. На рис. 3 наведено часові залежності рівня сигналу ГШСЗ, які були отримані в грудні 2019 року за допомогою приймального вимірювально-реєструючого комплексу (рис. 2). Практично на всіх часових залежностях у період 18:00...24:00 рівень сигналу монотонно спадає і досягає свого мінімального значення упродовж 24:00...01:00, а потім починає повільно зростати і досягає свого максимального значення в період 05:00...07:00. До 10:00 відбувається невелике зменшення рівня сигналу і він набуває значення, яке в середньому спостерігається в межах від 10:00 до 18:00.

Для наочності наведемо добові залежності (рис. 3) в узагальненому вигляді (рис. 4), який не відображає деяких особливостей отриманих експериментальних кривих, але дає можливість пов'язати часові інтервали з положенням Сонця під час експериментів.

Як видно з рис. 3, ослаблення радіосигналів на трасі «ГШСЗ – Земля» в нічний період у порівнянні з денним у середньому збільшується в 1,14 разу, що відповідає $\sim 1,3$ дБ.

Розглянемо геофізичні явища в атмосфері, які є причиною добової зміни рівня радіосигналів на трасі «ГШСЗ – Земля». Вертикальний розподіл температури в тропосфері залежить від особливостей поглинання сонячного та земного випромінювання в тропосфері і від конвективної передачі тепла. Сонячні промені лег-

ко проходять через тропосферу, а тепло, яке випромінює нагріта сонячними променями Земля, накопичується в тропосфері (вуглекислий газ, метан, водяна пара утримують тепло). Цей механізм прогрівання атмосфери від Землі, нагрітої сонячною радіацією, називають парниковим ефектом. Таким чином, джерелом тепла для атмосфери є Земля.

Основний поглинач випромінювання в атмосфері – водяна пара, вміст якої з висотою швидко зменшується, у зв'язку з чим знижується і температура повітря. Це сприяє виникненню конвекції, яка переносить нагріте повітря від земної поверхні в атмосферу, змінюючи вертикальний розподіл. У результаті в тропосфері встановлюється середній вертикальний градієнт температури (0,6 °C на 100 м). Середньорічна температура повітря на верхній межі тропосфери становить –55 °C.

Мінливість вмісту водяної пари в тропосфері визначається взаємодією процесів випаровування, конденсації і горизонтального перенесення. У результаті конденсації водяної пари утворюються хмари та опади у вигляді дощу, граду і снігу.

Таким чином, можна припустити, що першо-причиною всіх процесів, які призводять до зміни параметрів ділянок тропосфери, що знаходяться в діаграмі направленості приймальної антени на трасі поширення і впливають на зміну рівня сигналів у денний і нічний час, є Сонце (сонячна радіація). Ослаблення радіосигналу в тропосфері обумовлене процесами поглинання і розсіяння.

Кожна крапля води має значну провідність, і радіохвиля збуджує в ній високочастотні струми, а отже, теплові втрати. Ці струми викликають не тільки теплові втрати, але і є джерелом допоміжного розсіяного випромінювання, яке ослаблює прямий сигнал. Крім цього, радіохвилі опромінюють одночасно безліч крапель, які мають широкий спектр розмірів (полідисперсне середовище). Завдяки зміні дня і ночі, температура земної поверхні і повітря протягом доби зазнає значних коливань, що впливає на вміст пароподібної вологи в атмосфері.

Чіткий ритм добових коливань виявляється при аналізі змін відносної вологості повітря: максимум її припадає на передранкові години, мінімум – на 13:00...18:00. Вологість повіт-

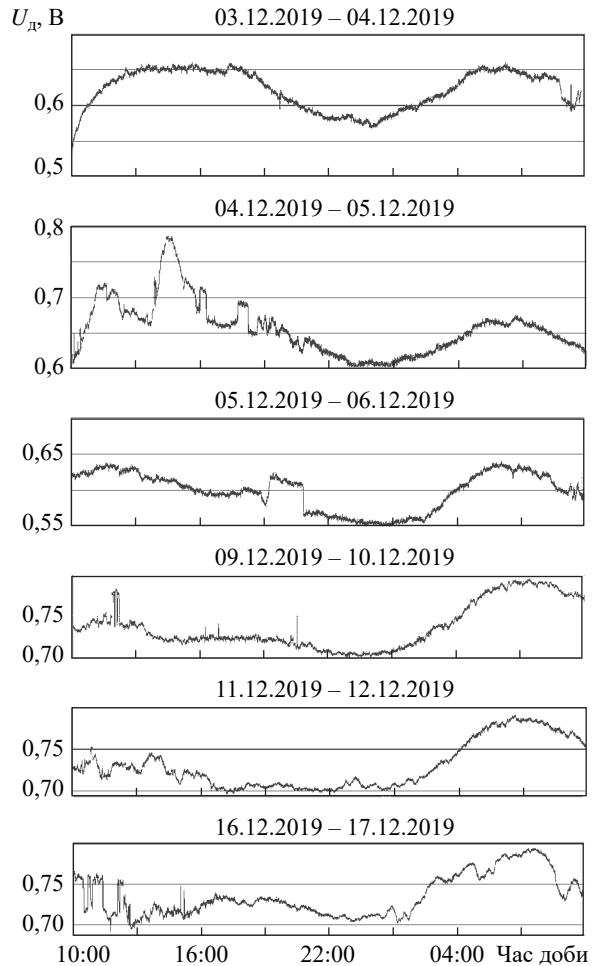


Рис. 3. Часові залежності рівня сигналу ГШСЗ

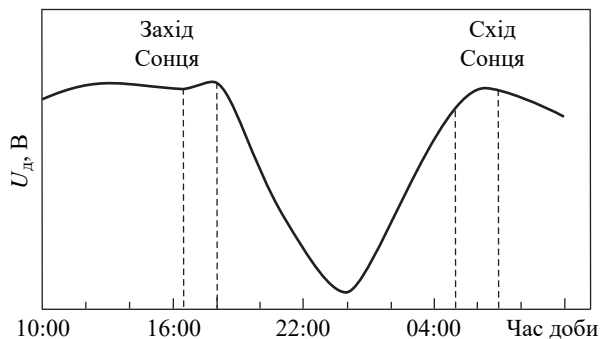


Рис. 4. Узагальнена добова залежність рівня сигналу на трасі «ГШСЗ – Земля»

ря тісно пов'язана з температурним режимом і абсолютно не залежить від атмосферного тиску. Загальна причина зміни вологості – сонячне тепло.

Відносна вологість змінюється з висотою не так явно, але в цілому вона також зменшується з висотою. На висотах, де відбувається хма-

роутворення, відносна вологість підвищена. У шарах з температурними інверсіями вона зменшується різко, що пов'язано з підвищенням температури.

Повітря під впливом сонячної радіації нагрівається і, втрачаючи вологу порівняно зі станом насичення, стає більш «сухим», що приводить до зменшення ослаблення радіосигналів ГШСЗ на трасі поширення. У разі зменшення або відсутності сонячної радіації, повітря охолоджується, наближається до стану насичення і при малому запасі вологи стає насиченим – вологим.

У цьому випадку ослаблення радіосигналів ГШСЗ на трасі поширення збільшується.

За відповідних умов циркуляції частина вологи, що міститься в повітрі, конденсується і випадає у вигляді опадів, а вологовміст повітря швидко підвищується. Якщо повернутися до розгляду експериментальних добових залежностей рівня сигналу (рис. 3) і узагальненої залежності (рис. 4), можна побачити, що через ~1,5 години після заходу Сонця сигнал починає монотонно спадати аж до 24:00. Затримку в 1,5 години можна пояснити інерційністю фізичних процесів у тропосфері і, можливо, впливом підстильної поверхні (земна поверхня і прилеглий шар повітря не відразу охолоджуються). Унаслідок охолодження ділянок, що потрапляють у діаграму направленості приймальної антени, повітря навіть при малому запасі вологи стає більш насиченим і вологим, що призводить до збільшення поглинання і розсіювання радіохвиль, а також ослаблення прямого сигналу. Чому цей процес відбувається повільно і триває майже п'ять годин (18:00...24:00)? Це пов'язано з тим, що траса поширення «ГШСЗ – Земля» перетинає тропосферу практично від земної поверхні і до самих верхніх її меж (10...12 км). Після заходу сонячні промені ще впливають на температурний режим верхніх шарів тропосфери на трасі, затримуючи охолодження. Починаються цивільні сутінки (Сонце зайшло за горизонт на $0...6^\circ$), за ними настають навіга-

ційні ($6...12^\circ$) і астрономічні ($12...18^\circ$) сутінки. Потім спостерігається невеликий період, коли рівень сигналу незмінний і мінімальний (24:00...01:00). Після цього сигнал починає повільно посилюватися аж до п'ятої години ранку і досягає свого максимуму. Таким чином, підвищення рівня сигналу починається до сходу Сонця. Сонячна радіація починає впливати на верхні шари тропосфери, які знаходяться в діаграмі направленості приймальної антени, ще до сходу Сонця, що змінює їх температурний режим в бік потепління і робить повітря більш «сухим». Це приводить до зменшення поглинання і розсіювання радіохвиль, зменшення ослаблення сигналу. З початком денного періоду Сонце починає розігрівати земну поверхню, збільшуючи конвективні потоки в атмосфері, що пояснює поведінку рівня сигналу вдень.

Висновки. Ослаблення радіосигналу на трасі «ГШСЗ – Земля» в X -діапазоні радіохвиль має добову залежність: у нічний період (24:00...01:00) ослаблення збільшується в середньому на ~1,3 дБ.

Зміни рівня радіосигналів не пов'язані зі змінами просторово-технічних параметрів ГШСЗ і приймальної апаратури. Відмінності в ослабленні радіосигналів у денний і нічний періоди пов'язані з тривалістю дня і кутом падіння сонячних променів, включаючи сутінки, на ділянки тропосфери, які знаходяться в діаграмі направленості приймальної антени на трасі поширення, і, змінюючи їх температурний режим, впливають на вміст у них вологи.

Фізичні явища відбуваються і в найвищих шарах тропосфери, коли Сонце освітлює їх, перебуваючи далеко за горизонтом. Ці фізичні явища можуть бути інтерпретовані для далекого тропосферного поширення радіохвиль, коли використовуються ці ділянки тропосфери.

Експерименти проводилися взимку 2019 року. Автори мають намір продовжити їх влітку 2021 року, провести порівняльний аналіз із зимовим періодом і опублікувати результати досліджень у наступній роботі.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Мыценко И.М., Халамейда Д.Д., Хоменко С.И. Использование радиосигналов ИСЗ для определения параметров гидрометеообразований. *Радиофизика и электроника*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. Харьков, 2007. Т. 12, № 1. С. 195–198.

2. Мыщенко И.М., Халамейда Д.Д. Активно-пассивный метод определения водности гидрометеорообразований по радиосигналам радиолокационных станций и геостационарных искусственных спутников Земли. *Радиофизика и электроника*. 2012. Т. 3(17), № 1. С. 41–44.
3. Ерёмка В.Д., Кабанов В.А., Логвинов Ю.Ф., Мыщенко И.М., Разказовский В.Б., Роечко А.Н. *Нетрадиционные методы и средства радиолокации*. Харьков: Полиграфический центр «В лавке», 2015. 315 с.
4. Яковлев О.И. *Распространение радиоволн в космосе*. Москва: Наука, 1985. 214 с.
5. Черный Ф.Б. *Распространение радиоволн*. Москва: Советское радио, 1972. 464 с.
6. Мыщенко И.М., Халамейда Д.Д. О влиянии солнечных затмений на распространение радиоволн в тропосфере. *Радиофизика и электроника*. 2015. Т. 6(20), № 1. С. 58–61.

Стаття надійшла 12.08.2020

REFERENCES

1. Mytsenko, I.M., Khalameida, D.D., Khomenko, S.I., 2007. Using of geostationary satellites radiation for determination of hydrometeors parameters. In: V.M. Yakovenko, ed. 2007. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **12**(1), pp. 195–198 (in Russian).
2. Mytsenko, I.M., Khalamayda, D.D., 2012. Active-passive method for determining the water content of hydrometeorological formations by radio signals from radar stations and geostationary artificial Earth satellites. *Radiofiz. Elektron.*, **3**(17)(1), pp. 41–44 (in Russian).
3. Eremka, V.D., Kabanov, V.A., Logvinov, Yu.F., Mytsenko, I.M., Razkazovsky, V.B., Roenko, A.N., 2015. *Nontraditional methods and means of radar*. Kharkov: Polygraphic center “V lavke” (in Russian).
4. Yakovlev, O.I., 1985. *Radio wave propagation in space*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
5. Chernyy, F.B., 1972. *Propagation of radio waves*. Moscow: Sovetskoe Radio Publ. (in Russian).
6. Mytsenko, I.M., Khalameida, D.D., 2015. Effect of solar eclipses on radiowave propagation in the troposphere. *Radiofiz. Elektron.*, **6**(20)(1), pp. 58–61 (in Russian).

Received 12.08.2020

I.M. Mytsenko, D.D. Khalameyda

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NASU
12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

DAILY DEPENDENCE OF X-BAND RADIO SIGNAL ATTENUATION BETWEEN A GEOSTATIONARY SATELLITE AND EARTH TERMINALS

Subject and Purpose. Statistical data on how the satellite signal level varies with changes in the characteristics of tropospheric layers and lower-troposphere hydrometeors serve designers a useful guide in the development of systems for diagnosing weather conditions and hydrometeor characteristics. The aim of the work is to generalize results from the long-term research into daily dependences of X-band radio signal attenuation between the geostationary satellite and Earth terminals. On this basis it is possible to find relationship between signal level changes at the point of reception and geophysical atmospheric agents.

Methods and Methodology. A receiving measuring and recording complex developed by the authors is employed for the purpose of establishing relationship between geostationary satellite signal level at the receiving point and geophysical atmospheric agents.

Results. A block-diagram of the receiving measuring and recording complex is presented, its operation described. Geometric parameters of the radio signal path of propagation have been considered. Signal level measuring results obtained using a Hot Bird geostationary satellite in the period from 03 to 17 January 2019 have been generalized and interpreted.

Conclusions. X-band radio signal attenuation on the path from a geostationary satellite to the Earth has a daily dependence. The radio signal level variations are not connected with alterations in spatial and technical parameters of the geostationary satellite or receiving equipment. The day and night changes in radio signal level are attributed to different daytime durations and different angles of sunbeam (including twilight) incidence on tropospheric areas associated with the receiving antenna pattern in the propagation direction, which entails changeable temperature regime and moisture content in these areas. Geophysical agents in the highest tropospheric layers insolated from far beyond the horizon can also be interpreted for long-distance tropospheric radio wave propagation in these tropospheric regions.

Key words: geostationary satellite, satellite converter (LNB), troposphere, hydrometeors.