

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

Том 19
6(85) + 2013

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ + ЗАСНОВАНО В ЛЮТОМУ 1995 р. + ВИХОДИТЬ 6 РАЗІВ ЗА РІК + КИЇВ



ЗМІСТ

Дегтярев О. В. Про забезпечення ракетно-космічної галузі сучасними конструкційними та спеціальними матеріалами

Ефименко Н. В. Взаимная привязка внутренних систем координат астродатчиков в задаче высокоточного определения ориентации космического аппарата

Лялько В. І., Костюченко Ю. В., Артеменко І. Г., Попадюк Л. М., Федина Р. М., Волошаненко А. С. Аналіз невизначеностей в задачах оцінки кліматичних змін на регіональному рівні за даними супутникових спостережень парникових газів

Костюченко Ю. В., Білоус Ю. Г., Соловйов Д. М., Копачевський І. М. Використання засобів супутникового спостереження в комплексі методів оцінки ризиків метеорологічних і кліматичних надзвичайних ситуацій на урбанізованих територіях

CONTENTS

3 *Degtyarev O. V.* Space rocketry supplying with modern structural and special materials

12 *Efimenko N. V.* Mutual relations of internal coordinate systems of star sensors in the problem of accurate determination of spacecraft orientation

18 *Lyalko V. I., Kostyuchenko Yu. V., Artemenko I. G., Popad-juk L. M., Fedyna R. V., Voloshanenko A. S.* An uncertainty analysis in the climatic change estimation problem on regional level with the use of satellite observations of atmospheric concentration of greenhouse gases

27 *Kostyuchenko Yu. V., Bilous Yu. H., Solovyov D. M., Kopa-chevsky I. M.* Utilization of satellite observations in the risk assessment methods of meteorological and climatic disasters in urban areas

Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Федоренко В. Н., Цымбал А. М. Спутниковые наблюдения ионосферных возмущений, последовавших за падением Челябинского метеорита

Янків-Вітковська Л. М. Методика визначення параметрів іоносфери у мережі супутникових станцій західної України

Вовк В. С., Козырев Е. С., Куличенко Н. А., Сибирякова Е. С., Шульга А. В. Первые результаты регулярных наблюдений низкоорбитальных космических объектов в НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория»

Атаманенко Б. А., Редчиць Н. Є. Прозорливість та зміцнення довіри в космосі

НАШІ АВТОРИ

АВТОРСЬКИЙ ПОКАЖЧИК

38 Chernogor L. F., Milovanov Yu. B., Fedorenko V. N., Tsymbal A. M. Satellite observations of ionospheric disturbances which followed the Chelyabinsk meteorite passage

47 Yankiv-Vitkovska L. M. A procedure for the determination of ionosphere parameters on the basis of the GNSS network in Western Ukraine

53 Vovk V. S., Kozryev Y. S., Kulichenko N. A., Sybiryakova Y. S., Shulga O. V. The first results of regular observations of low Earth objects in RI “Nikolaev astronomical observatory”

60 Atamanenko B. A., Redchyts N. E. Transparency and confidence-building measures in outer space

70 OUR AUTHORS

72 INDEX

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 1232 від 2 лютого 1995 р.

Підписано до друку 17.12.13. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офс.
Ум. друк. арк. 7,77. Обл.-вид. арк. 8,16. Тираж 100 прим. Зам. № 3780.

Оригінал-макет виготовлено та тираж видруковано Видавничим домом «Академперіодика» НАН України, 01004, Київ, вул. Терещенківська, 4

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

УДК 669.715+678

О. В. Дегтярев

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

ПРО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ГАЛУЗІ СУЧАСНИМИ КОНСТРУКЦІЙНИМИ ТА СПЕЦІАЛЬНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Створення перспективних зразків РКТ вимагає застосування матеріалів, які не виготовляються або виготовляються в недостатніх обсягах на підприємствах України. У роботі аналізується стан підприємств для виробництва таких матеріалів, як алюмінієві та титанові сплави, спеціальні сталі, неметали у формі зв'язувальних матеріалів, вуглецевих армувальних наповнювачів, композиційні матеріали, гуми, гумотехнічні вироби, тонкошарові теплоізоляційні покриття, герметики, клеї, озонобезпечні знежирювальні засоби. Розроблено пропозиції щодо розширення даних підприємств та організації нових підприємств для забезпечення необхідних обсягів постачання матеріалів.

Ракетно-космічна галузь є однією з небагатьох високотехнологічних галузей в Україні, що розвивається. Свідомством цього, зокрема, є створення у міжнародній кооперації за відносно короткі строки і комерційна експлуатація відомих ракетно-космічних комплексів «Морський старт», «Наземний старт», «Дніпро», а також розроблення американо-української ракети-носія «Антарес», українсько-бразильського комплексу «Алкантара-Циклон-4» та інших. Тільки у 2012 р. галузю було виготовлено й реалізовано продукції на суму 4.3 млрд грн. У порівнянні з 2011 р. обсяги виробництва зросли на 20 %, обсяг реалізованої продукції — на 19 %. Частка експорту продукції в загальному обсязі реалізації склала 62 %.

Створення перспективних ракет і ракет-носіїв з урахуванням ресурсних обмежень, з більш високим коефіцієнтом вагової досконалості й підвищених вимог до міцнісних і температурних характеристик систем вимагає розроблення нових, як правило унікальних конструкторських рішень із застосуванням спеціальних сучасних матеріалів. До них слід зарахувати титан, алюміній, алюмінієві і титанові сплави, спеціальні сталі, а також неметали у формі зв'язувальних матеріалів, армувальних наповнювачів, композиційних матеріалів, гуми, гумотехнічних виробів, тонко-

шарових теплоізоляційних покриттів, герметиків, клеїв, озонобезпечних знежирювальних засобів та інших. Номенклатура цих матеріалів і відповідних напівфабрикатів, що використовуються під час виробництва РКТ, перевищує сотні найменувань. Перераховані матеріали застосовуються в інших галузях, що певною мірою сприяє підтримці існуючих виробництв.

Специфіка створення зразків РКТ пов'язана в ряді випадків із застосуванням матеріалів і напівфабрикатів, які не виготовляються або виготовляються в недостатніх обсягах на вітчизняних підприємствах, що призводить до проблем їхнього постачання. Використання експортних матеріалів призводить до невиправданого завищення вартості виробів. Проблемою є також застосування матеріалів і напівфабрикатів, на які накладаються торговельні обмеження.

З урахуванням планів щодо створення перспективних зразків РКТ становить інтерес аналіз стану підприємств для виробництва перерахованих вище матеріалів на підприємствах і розроблення пропозицій щодо їхнього розширення й, у разі потреби, організації нових підприємств для забезпечення необхідних поставок.

АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ

Ситуація, яка склалася на сьогоднішній день на внутрішньому ринку України, свідчить про знач-

не перевищення попиту на алюміній і продукцію з алюмінію над пропозицією.

Основними споживачами зазначеної продукції, крім ракетно-космічної галузі, є авіаційна промисловість, суднобудування, автомобілебудування, виробництво залізничних локомотивів, будівельна промисловість та інші. Крім цього, тенденції впровадження нових технологій і композиційних матеріалів на основі алюмінію, що розвиваються в машинобудуванні, дозволяють прогнозувати подальший ріст споживання цього металу в Україні.

На цей час українська алюмінієва галузь включає такі основні виробництва:

- ВАТ «Миколаївський глиноземний завод» (МГЗ) — спеціалізується на випуску глинозему, алюмінієвих концентратів і дроту;

- ВАТ «Запорізький алюмінієвий комбінат» (ЗАЛК) — єдиний і найпотужніший в Україні виробник алюмінію й легованих алюмінієво-кремнієвих сплавів на його основі; має повний металургійний цикл; продукція, що випускається комбінатом, споживається в основному підприємствами автомобільного та сільськогосподарського машинобудування;

- ВАТ «Сумське НВО ім. М. В. Фрунзе». На підприємстві введено в експлуатацію виробництво з виготовлення із алюмінієвих сплавів пресованих напівфабрикатів методом прямого екструдкування; виробництво оснащене сучасним устаткуванням провідних європейських фірм, до його складу входять плавильне й екструзійне відділення; профілі, що випускаються підприємством, використовуються в машинобудуванні, хімічній і меблевій промисловості, будівництві, архітектурі та інших галузях;

- ЗАТ «Алюмаш». Одним з напрямків заводу «Алюмаш» є виробництво алюмінієвих профілів загального призначення: шини (смуги), кутики, швелери, таври й труби. «Алюмаш» упевнено лідирує у виробництві високоякісних алюмінієвих труб. Крім того, на заводі освоєне виробництво холоднодеформованих труб малих діаметрів;

- Київський завод алюмінієвих будівельних конструкцій. Сьогодні цей завод має замкнений цикл виробництва алюмінієвих профілів, заснований на широкому застосуванні безвідходних

технологій. Завод має п'ять горизонтальних гідравлічних пресів, у тому числі два преси зусиллям 2500 тонн, один прес зусиллям 2200 тонн і два преси зусиллям 1250 тонн. Це устаткування дозволяє виготовляти різні види алюмінієвих профілів — від звичайного дроту до складних профілів із багатопорожнинними перерізами.

На жаль, жодне з перерахованих підприємств на цей час не виготовляє прокат, необхідний для ракетно-космічної галузі. Тому українські ракетобудівники змушені завозити готові напівфабрикати з алюмінію з-за кордону. Такий стан речей призводить до подорожчання продукції та проблем з поставками.

Головною сировиною для виробництва алюмінію є боксити із вмістом глинозему 48–60 %. Як показала детально проведена у 1950-х рр. геологорозвідка, Україна не має такої високоякісної сировини, тому її доводиться також імпортувати.

Приватизація не принесла алюмінієвій галузі очікуваних інвестицій, а країні — нових перспективних виробництв.

Сьогодні стало очевидним, що мета, яка ставилася Україною в ході приватизації Миколаївського глиноземного заводу, досягнута не була. Не були в повному обсязі виконані й інвестиційні зобов'язання, узяті під час купівлі російським інвестором Запорізького алюмінієвого комбінату. RUSAL виявився неефективним інвестором, хоча багатьма експертами він оцінювався як єдиний, хто може ефективно працювати на ЗАЛК, тому що RUSAL мав необхідну сировинну базу і фінансові ресурси. Проте після купівлі ЗАЛК цим інвестором завод скоротив виплавку алюмінію до половини від проектної потужності. Ще більш негативним наслідком стало зменшення виробництва глинозему на 87 %. На підприємстві заявляють, що не можуть працювати рентабельно через високий тариф на електроенергію, який у кілька разів перевищує європейські тарифи (українська електроенергія коштує дорожче, ніж у Європі і Росії: 0.07—0.08 дол./кВт·год у порівнянні з 0.02—0.04 дол./кВт·год).

Незважаючи на те, що Україна має істотні резерви електроенергії й активно її експортує, через специфічну цінову політику енергогене-

руючих компаній економічно доцільно не виготовляти, а імпортувати в Україну первинний алюміній.

Із викладеного випливає необхідність вирішення проблеми поставок сировини.

Дефіцит сировини для виробництва алюмінію в Україні є найгострішою проблемою, що не терпить зволікання. Можливі такі шляхи її вирішення:

- створення стратегічного альянсу виробників первинного алюмінію із зарубіжними глиноземними підприємствами;
- будівництво нових глиноземних підприємств, що працюють за новими технологіями на базі вітчизняної сировини;
- створення стратегічного альянсу з фірм-споживачів і виробників напівфабрикатів з алюмінію із зарубіжними виробниками первинного алюмінію;
- підвищення рівня використання вторинного алюмінію у виробництві виробів з алюмінію;
- розширення внутрішнього ринку алюмінію України повинне відбуватися, зокрема, шляхом заміни інших конструкційних матеріалів цим металом, як це робиться в розвинених країнах світу.

Ефективним на цей момент вирішенням проблеми поставок алюмінієвих напівфабрикатів для споживачів в Україні було б створення нового або розширення існуючого прокатного й штампувального виробництва з використанням поставок первинного алюмінію із близького зарубіжжя.

ТИТАНОВІ СПЛАВИ

За комплексом фізико-механічних властивостей титанові сплави є універсальним конструкційним матеріалом, поєднуючи нехолодноламкість алюмінію й аустенітових сталей, високу корозійну стійкість кращих мідно-нікелевих сплавів і нержавіючих сталей. Їхня немагнітність, міцність і питома міцність вищі, ніж у більшості конструкційних матеріалів. Тому титанові сплави знайшли широке застосування в ракетно-космічній і авіаційній галузях.

В Україні є родовища титанових руд і виробничі потужності для одержання з них проміжного продукту — титанової губки.

Видобування титанових руд проводиться на Верхньодніпровському гірничо-металургійному комбінаті (м. Вільногірськ Дніпропетровської обл.) та Іршанському гірничо-металургійному комбінаті (смт. Іршанськ Житомирської обл.).

Одержання титанової губки здійснюється на Запорізькому титаномагнієвому комбінаті (ЗТМК).

Донедавна перероблення титанової губки і виготовлення напівфабрикатів з титанових сплавів проводилися в основному на Верхне-Салдинському металургійному виробничому об'єднанні (м. Верхня Салда Свердловської обл.). На сьогодні в Україні освоєне виробництво титанових зливків марки ВТ 1-0, призначених для подальшої переробки на Запорізькому титаномагнієвому комбінаті, НВО «Антарес» (м. Київ) і НВЦ «Титан» Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона.

Крім того, підприємство «Ровена» (м. Буча, Київська обл.) пропонує титанові зливки різних марок (ВТ20, ВТ6С, ВТ23 та ін.), виготовлені в Україні з титанової губки ЗТМК із можливістю кування й прокатки зливків і слябів на підприємствах України.

З аналізу стану виробничих можливостей вітчизняних виробників титанових сплавів і напівфабрикатів з них випливає, що Україна має свій замкнений цикл перероблення титану, починаючи від сировини до кінцевого продукту, що дозволяє задовольнити потреби ракетно-космічної галузі.

СПЕЦІАЛЬНІ СТАЛІ

Під терміном «спеціальні сталі» матимемо на увазі марки сталей і сплавів, придатні для виготовлення компонентів, вузлів і деталей ракетної техніки, що відповідають критеріям Режиму контролю над ракетними технологіями. До такої категорії матеріалів, як правило, відносять корозійностійкі хромонікелеві сталі і сплави.

Лідером з виробництва таких сталей в Україні є ВАТ «Дніпроспецсталь» (м. Запоріжжя). Широка номенклатура марок сталей, що виплавляються, і наявність виробництв з електрошлакового й вакуумно-дугового переплавлення для поліпшення хімічної і структурної однорідності високолегованих сталей дозволяє зробити ви-

сненок, що потреби українського ракетобудування забезпечуються повною мірою спеціальними сталлями вітчизняного виробництва.

Для виробництва металевих матеріалів в особливо малих кількостях, що використовуються під час розроблення перспективних рідинних ракетних двигунів (РРД), доцільно залучати наукові підприємства, які спроможні не тільки розробляти перспективні сплави і сталі, але й виготовляти дрібносерійну продукцію з них. До таких виробників можна віднести Державне науково-виробниче підприємство «Рубін» НАН України (м. Харків). На цей час на цьому підприємстві освоєні й можуть бути використані для виготовлення серійних виробів РКТ такі металургійні технології:

- вакуумна індукційна плавка сталей і сплавів з виливанням у форми для точного лиття за моделлями, що виплавляються;
- вакуумно-дугова рафінувальна переплавка;
- електронно-променева плавка для одержання найбільш чистих металів (нікелю, цирконію, ніобію та ін.), а також сплавів на їхній основі;
- вакуумна прокатка.

ЗВ'ЯЗУВАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, КЛЕЇ, ГЕРМЕТИКИ

Дослідження вітчизняного виробництва й ринку зв'язувальних матеріалів, клеїв і герметиків показує, що жодних проблем щодо постачання цієї номенклатури матеріалів для РКТ не передбачається. Сьогодні найбільшими постачальниками полімерних зв'язувальних матеріалів для виготовлення тіл обертання методом «сухого» й «мокрого» намотування волокнистих і тканих армувальних матеріалів та зв'язувальних матеріалів для виготовлення виробів методом пресування в Україні є Науково-виробниче підприємство СИНТЕЗ, ТОВ «НВФ «Композитсервіс» і ДП «УкрДержНДІпластмас», що розташовані у м. Донецьку.

Асортимент сировини, що залучають ці підприємства для випуску зазначеної продукції, досить великий. У цілому продукція є залежною від імпорту. Проте ці підприємства, як правило, без кінцевої потреби не використовують імпортовану сировину, а орієнтуються на сировинну базу України. Експортні операції для них здійснюють

підприємства Росії, Білорусі та Польщі за прямими контрактами, як правило без обмеження мінімальної кількості.

На цей час в Україні не бракує пропозицій щодо зарубіжних аналогів вітчизняних смол, клеїв і герметиків. Крім того, на ринку є зв'язувальні матеріали, клеї і герметики, що виготовляються численними невеликими підприємствами малотоннажними партіями. Останні гарантують поставки цих матеріалів, успішно конкуруючи з великими підприємствами.

ВУГЛЕЦЕВІ АРМУВАЛЬНІ НАПОВНЮВАЧІ

На цей час виробничих потужностей з виготовлення вуглецевих армувальних матеріалів в Україні немає. У 1970—1990 рр. для ракетно-космічної техніки та інших потреб військово-промислового комплексу в країні було створене потужне виробництво вуглецевих волокнистих матеріалів на основі гідратцелюлозних волокон. Воно було розміщене на Казенному заводі порошкової металургії (м. Бровари Київської обл.) і державному заводі «Вуглекомполімер» (колишній Дніпровський електродний завод, м. Запоріжжя). Сьогодні ці підприємства через відсутність державної підтримки не функціонують. Вітчизняного виробництва високоміцних високомодульних вуглецевих волокон (ВВ) в Україні також немає.

Аналіз світового ринку ВВ показує, що в останні два десятиріччя світове виробництво вуглеволокон через складність і високу технологічність процесу виробництва, а також через вплив політичних факторів на процеси введення в дію технологій і устаткування зосереджене головним чином на десяти великих компаніях: японських Toray, Toho Tenax і Mitsubishi Rayon, американських Cytec, Hexcel, Zoltek і Amoco, німецької SGL, південнокорейської Taekwang Industrial Co., Ltd. і тайванської Formosa Plastics. Продаж високоміцних високомодульних вуглецевих волокон, виготовлених на цих підприємствах, здійснюється за наявності сертифіката кінцевого споживача. Експорт цих волокон обмежується на державному рівні. Імпортні закупівлі ВВ у цих виробників проблематичні через складну процедуру обґрунтування подальшого використання вуглеволокон, а в окремих випад-

ках взагалі неможливі. Крім того, такі закупівлі вимагають тривалого часу для одержання дозвільних документів.

В Україні проблема створення виробництва високоміцних високомодульних вуглецевих волокнистих матеріалів для ракетно-космічної, авіаційної та інших галузей вирішується протягом декількох років. На сьогодні реальною видається пропозиція про організацію такого виробництва на площах заводів хімічного комплексу і машинобудівної галузі. Виробництво поліакрилонітрильних волокон — як попередників вуглецевого волокна — може бути створене на ПАТ «Чернігівське хімволокно». Розглядається також питання про створення виробництва вуглецевих волокон, препрегів і вуглецевих композиційних матеріалів на території Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне». Продукція цих підприємств задовольнить потреби стратегічних галузей промисловості України незалежно від зарубіжних країн-постачальників ВВ, а також дозволить здійснювати експортні поставки високомодульних вуглецевих волокон.

Для відпрацювання сучасної технології їхнього одержання, включаючи вихідні ПАН-волокна, пропонується створити пілотні лінії виробництва високомодульного вуглецевого волокна потужністю 35 т/рік і, відповідно, поліакрилонітрильного прекурсору — 100 т/рік.

Проектування виробничих ліній, виготовлення технологічного устаткування, його пускалагодження і задача «під ключ», передавання технології, повне вирішення екологічних питань можуть узяти на себе німецькі компанії «ЕРС-груп», «Трютшлер» і «Ейсепман» за участю російської компанії «Увіком». Фінансування цього проекту готовий здійснити зовнішній інвестор — ПАТ «Дочірній банк Ощадбанку Росії». Для цього йому необхідно надати державні гарантії. Перспективними учасниками цього проекту є ДП «КБ «Південне», АНТК «Антонов», ПАТ «Чернігівське хімволокно», Інститут проблем матеріалознавства й Інститут фізичної хімії НАНУ. Їхня спільна діяльність доцільна під егідою Міжвідомчої робочої групи з організації в Україні виробництва високоміцних високомодульних вуглецевих волокон.

Виробництво вуглепластикових деталей соплових блоків для твердопаливних двигунів вимагає поновлення виробництва вуглецевого трикотажу УТЛ із нитки УН-2 на Казенному заводі порошкової металургії (КЗПМ) у кооперації з Інститутом проблем матеріалознавства НАНУ.

Через припинення випуску вуглецевої нитки УН-2 на КЗПМ для виготовлення деталей соплових блоків в Україну імпортується білоруський вуглетрикотаж Урал Тр 2/3-15. У порівнянні з ним вітчизняний вуглетрикотаж УТЛ має переваги, тому що дозволяє виготовляти стрічку шириною від 50 до 500 мм. Дірчаста структура матеріалу полегшує просочення його фенолоформальдегідним матеріалом, сприяє взаємному проникненню шару в шар під час формування вуглепластику і забезпечує вищу якість деталей.

Діючі потужності і накопичений у попередні роки досвід дозволяють у стислі строки відновити виробництво вуглецевої нитки УН-2.

Реалізація цієї програми можлива за умови залучення коштів вітчизняних і зарубіжних інвесторів, а також за рахунок коштів державного бюджету, які виділяє Національна академія наук України.

Важливою проблемою під час виробництва твердопаливних ракетних двигунів є постачання деталей з вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу (ВВКМ). В Україні збережено виробничу базу для ущільнення вуглецевих армувальних каркасів 3D-структури піровуглецем (ННЦ ХФТІ, м. Харків), але виробництва самих каркасів немає. Наприкінці 1980-х років виробництво каркасів разом з документацією й устаткуванням було передане Дніпровським електродним заводом у Росію на Челябінський електродний завод. На цей час виготовлення вуглецевих армувальних каркасів передбачається організувати на експериментально-промисловій базі ДП «КБ «Південне» за рахунок коштів, що надходять від реалізації іноземних замовлень.

Першочергові завдання, які необхідно вирішити в рамках цієї проблеми, включають виготовлення установки для плетіння каркасів, відпрацювання технології плетіння каркасів з різних високомодульних вуглецевих наповнювачів типу УКН-5000, ТС-36s, Т700SC-12000,

ущільнення каркасів піровуглецем, дослідження характеристик одержаного ВВКМ і розроблення нормативної документації на матеріал.

ГУМИ І ГУМОТЕХНІЧНІ ВИРОБИ

Практично всі розробки рецептур спеціальних гум, що застосовуються у РКТ, були розроблені у радянський час і базувалися на сировинній базі, яка переважно залишилася на території Російської Федерації. Причому для багатьох видів сировини (каучуків, протистарителів, пластифікаторів, активаторів вулканізації) змінилася технологія їхнього виробництва і, як наслідок, фізико-механічні та хімічні характеристики. Це вплинуло на працездатність гумотехнічних виробів (ГТВ) і призвело до зменшення гарантійних строків експлуатації ГТВ.

Сьогодні в Україні працює понад два десятки підприємств, що випускають гумотехнічні вироби різного призначення, у тому числі: ВАТ «Лисичанський завод ГТВ», ВАТ «НВО «Лисичанський гумотехнічний завод», ВАТ «Дніпрошина», ВАТ «Київський завод гумових і латексних виробів», ВАТ «Запорізький завод ГТВ». До цього часу питання, що стосуються створення вітчизняних аналогів гумотехнічних виробів (гумових, армованих) і матеріалів для них, успішно вирішуються Державним підприємством «Український науково-дослідний конструкторсько-технологічний інститут еластомірних матеріалів і виробів». Інститут, маючи достатній базовий науково-технічний потенціал і розвинену виробничу базу з усією гамою устаткування, необхідного для виробництва ГТВ, забезпечує практично всі поставки ГТВ для виробів РКТ.

Під час розроблення нових ракетних двигунів виникла проблема створення вітчизняних аналогів гумових сумішей типу ПДМ-2К, 51-2058, 51-1620, 51-2110, 51-2147, поставки яких пов'язані з торговельними обмеженнями. ДП УНДКТІ ДІНТЕМ розпочало вирішення цієї проблеми на основі наявної в Україні сировини й перспективних каучуків фірми «Байер» (ФРН) з подальшим визначенням експлуатаційних характеристик створених аналогів. Інститутом проведено аналіз наявної в Україні сировинної бази з оптимізацією рецептурного складу гумових сумішей

і визначенням технологічного регламенту їхнього виготовлення, напрацьовано дослідні партії гумових сумішей ОП-47/1 (аналог гуми типу 51-2147) і ОП-58/1 (аналог гуми типу 51-2058). Подальше проведення робіт у цьому напрямку стримується відсутністю в інституті достатніх фінансових ресурсів.

ТОНКОШАРОВІ ТЕПЛОЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ

Тонкошарові теплозахисні покриття (ТЗП) для ракет-носіїв розроблялися в галузевому НДІ колишнього СРСР. У країні було налагоджено чітку структуру з кооперації виробництва компонентів для цієї вузьконаправленої продукції. Після розпаду СРСР кооперація підприємств, що виготовляли сировину, виявилася порушеною. У результаті під час виготовлення ТЗП у виробництві ракет неодноразово виникали проблеми щодо забезпечення його компонентами або через припинення їхнього випуску, або через зміну нормативно-технічних документів на матеріали, зміну виготовлювача, митні обмеження та ін.

Свіжий приклад. Після заміни російського постачальника порошкоподібного поліпропілену, що входить до складу ТЗП, в Україні єдиним його виробником став Лисичанський завод органічного синтезу ЗАТ «Линик». На цей час це підприємство не працює, через що порошкоподібний поліпропілен не напрацьовується, а його відсутність загрожує випуску товарних виробів на ДП ВО ПМЗ.

Виникає ряд правових проблем під час передавання виробів із ТЗП зарубіжним замовникам, що пов'язане із закритістю нормативно-технічної документації на ТЗП і відсутністю на нього права власності України. правонаступниками розробок ТЗП є профільні підприємства Російської Федерації.

Усунення залежності від них і забезпечення гарантованих поставок компонентів ТЗП диктують необхідність розроблення сучасного теплозахисного покриття українського виробництва. Покриття має розроблятися з урахуванням таких вимог:

- усі компоненти покриття мають виготовлятися на території України;

- покриття не повинне містити у своєму складі активних розчинників та інших речовин, небезпечних для людини й навколишнього середовища, і мати у своєму складі мінімальну кількість компонентів;

- поставки компонентів покриття повинні забезпечуватися декількома виробниками (постачальниками) з метою мінімізації залежності від поставок під час серійного виробництва ТЗП для виробів РКТ;

- розроблене ТЗП має бути захищене патентом.

На цей час проводяться попередні пророблення зі створення високоефективного вітчизняного тонкошарового теплозахисного покриття з Українським державним хіміко-технологічним університетом. У процесі розроблення необхідно визначитися з тим, що можна реалізувати за рахунок власних коштів, а що вимагатиме бюджетного фінансування.

ОЗОНОБЕЗПЕЧНІ ЗНЕЖИРЮВАЛЬНІ ЗАСОБИ

Виробництва знежирювальних розчинників для очищення компонентів аерокосмічної техніки, яка контактує з рідким і газоподібним киснем, в Україні немає. Очищення є досить важливим процесом для забезпечення надійності, безпеки експлуатації, обслуговування та підготовки до пуску. Ефективні речовини, що чистять, повинні видаляти забруднення в широкому діапазоні і бути сумісними з більшою кількістю металів, пластмас й еластомерів. Сумісність і ефективність очищення прямо залежить від розчинника, що використовується. Хладон-113 (хлорфторвуглець), який широко використовувався у виробництві ракетної техніки, де вимагався корозійнонеактивний, негорючий розчинник з малою токсичністю. Проте через високий потенціал руйнування озону хладоном-113 його виробництво і використання міжнародним співтовариством було заборонене.

Після приєднання у 2000 р. України до Монреальського протоколу (1987 р.) про поступове скорочення і повну заборону використання хлорфторвуглеців, що руйнують озон, у тому числі хладону-113, і гідрофторхлорвуглеців (хладон-141b) ДП «КБ «Південне» разом із ДП ВО ПМЗ провели роботи з істотного скорочен-

ня використання знежирювального розчинника хладону-113 в операціях очищення ракетних компонентів, які контактують із рідким киснем, і його заміни на альтернативні озонобезпечні засоби, що чистять. Були випробувані різні органічні розчинники і поверхнево-активні речовини (водомийні склади), такі як Асахіклін-225, АК-50UNISOLV, АК-52EXASOLV, Solvente 680-TYII, а також Деталан, ВМС-С та ін. Проте позитивних результатів досягти не вдалося, тому що властивості цих речовин не дозволяють за різними факторами замінити хладон-113.

За результатами аналізу озонобезпечних знежирювальних розчинників, які виготовляються іноземними компаніями, було прийнято рішення про використання сегрегованих гідрофторфірів, що не поступаються за експлуатаційними характеристиками хладону-113, але із практично екологічно безпечними властивостями. Це сімейство розчинників нового покоління марки NovacTM виробництва компанії 3МTM (США) має нормативно-правовий статус як «допустимі» без будь-яких обмежень і призначене для забезпечення безпечних, ефективних і екологічно раціональних рішень для різних варіантів промислового використання. Розчинники NovacTM не підпадають під діючі й очікувані екологічні нормативні обмеження і рекомендовані Агентством із захисту навколишнього середовища США (EPA) для широкого застосування в аерокосмічній галузі США.

Позитивний досвід їхнього застосування (починаючи з кінця 1990-х років) в аерокосмічній галузі США, у тому числі в компанії Orbital Sciences Corp., є прийнятним і корисним для використання з мінімальним доробленням технологій і устаткування в умовах вітчизняного ракетно-космічного виробництва.

Починаючи з 2013 р. на ДП ВО ПМЗ і ДП «КБ «Південне» розгорнуто роботи з перевірки знежирювальних розчинників типу NovacTM 7100 і NovacTM 71DE (азеотропна суміш) як можливих потенційних замінників хладону-113, що руйнує озон, в операціях очищення ракетних компонентів, що контактують із рідким киснем.

Компанія 3МTM має широку технологічну базу, зацікавлена в розширенні виробництва, має за-

води в Європі (зокрема у Польщі), Азії й Америці. Доречно розглянути можливість організації інвестиційного проекту зі створення виробництва розчинників NovacTM на території України для промислового застосування в аерокосмічній галузі, електронній, електротехнічній, атомній промисловості і побутовому використанні.

ВИСНОВКИ

1. Подальший розвиток ракетно-космічної галузі пов'язаний зі створенням перспективних ракет і ракет-носіїв з урахуванням ресурсних обмежень і підвищених вимог до вагових, міцнісних і температурних характеристик. Це вимагає розроблення нових, як правило, унікальних конструкторських рішень із застосуванням сучасних матеріалів. Для реалізації таких рішень необхідно, у ряді випадків, застосування матеріалів і напівфабрикатів, які не виготовляються або виготовляються в недостатніх обсягах на вітчизняних підприємствах, що призводить до проблем при забезпеченні їхнього постачання. Використання експортних матеріалів призводить до невиправданого завищення вартості виробів. Проблема є також постачання матеріалів і напівфабрикатів, на які накладаються торговельні обмеження.

2. Відновлення, модернізація й організація, у разі потреби, нових вітчизняних підприємств для випуску матеріалів, яких не вистачає, мають провадитися в кожному конкретному випадку з урахуванням ресурсних можливостей і принципу раціонального поєднання розвитку власних виробництв та закупівлі необхідних матеріалів за кордоном, включаючи створення страхових запасів маловитратних і дефіцитних матеріалів, виробництво яких скорочене або повністю припинене.

3. Для випуску алюмінієвого прокату доцільне розширення існуючого або створення нового прокатного і штампувального виробництва з використанням поставок алюмінію із близького зарубіжжя. Для забезпечення необхідних обсягів випуску прокату розглянути можливість створення стратегічного альянсу з фірм-споживачів і виробників напівфабрикатів з алюмінію із зарубіжними виробниками первинного алюмінію.

4. Розглянути можливість створення вітчизняного виробництва високоміцних високомодульних вуглецевих волокнистих матеріалів: виробництва поліакрилонітрильних волокон (як попередника вуглецевого волокна) — на ПАТ «Чернігівське хімволокно» і виробництва вуглецевих волокон, препрегів і вуглецевих композиційних матеріалів — на площах ДП «КБ «Південне».

5. Для створення виробництв вуглецевих матеріалів розглянути можливість залучення німецьких компаній «ЕРС-груп», «Трютшлер» і «Ейсепман» та російської компанії «Увіком» для проектування виробничих ліній, виготовлення технологічного устаткування, його пусконаладження й передавання технологій. Передбачити участь у цих роботах ДП «КБ «Південне», АНТК «Антонов», ПАТ «Чернігівське хімволокно», Інституту проблем матеріалознавства й Інституту фізичної хімії Національної академії наук України.

6. Розробити пропозиції щодо поновлення виробництва вуглецевої нитки УН-2 на Казенному заводі порошкової металургії в кооперації з Інститутом проблем матеріалознавства Національної академії наук України із залученням коштів вітчизняних і зарубіжних інвесторів, а також коштів державного бюджету, які виділяє Національна академія наук України, що дозволить одержувати якісніші деталі з вуглепластику й відмовитися від імпорту менш ефективного білоруського вуглетрикотажу Урал Тр 2/3-15.

7. Розробити заходи щодо організації на експериментально-промисловій базі ДП «КБ «Південне» виробництва для виготовлення армованих вуглецевих каркасів з різних високомодульних вуглецевих наповнювачів. Знайти можливості для продовження робіт, пов'язаних зі створенням вітчизняних високоефективних гумових сумішей, постачання яких пов'язане з торговельними обмеженнями, високоефективних тонкошарових теплозахисних покриттів і озонобезпечних розчинників типу NovacTM.

8. Враховуючи інтерес різних галузей у реалізації перерахованих пропозицій, розглянути можливість створення Міжвідомчої робочої групи із представників зацікавлених сторін для підготовки та погодження проекту Державної цільової

програми із забезпечення поставок конструкційних і спеціальних матеріалів для виготовлення високотехнологічних виробів на 2014—2018 рр. Погоджений проект Державної цільової програми надіслати на адресу Міністерства промислової політики України для подальшого розгляду.

Стаття надійшла до редакції 05.09.13

А. В. Дегтярев

ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ СОВРЕМЕННЫМИ КОНСТРУКЦИОННЫМИ И СПЕЦИАЛЬНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Создание перспективных образцов РКТ требует применения материалов, которые не производятся или производятся в недостаточных объемах на предприятиях Украины. В работе анализируется состояние предприятий для производства таких материалов, как алюминиевые и титановые сплавы, специальные стали, неметаллы в форме связывающих, углеродных армирующих наполнителей, композиционные материалы, резина, резино-

технические изделия, тонкослойные теплоизоляционные покрытия, герметики, клеи, озонобезопасные обезжиривающие средства. Разработаны предложения об расширении данных предприятий и организации новых предприятий для обеспечения необходимых объемов поставок материалов.

О. V. Degtyarev

SPACE ROCKETRY SUPPLYING WITH MODERN STRUCTURAL AND SPECIAL MATERIALS

Creation of promising samples of space rocketry (SK) requires application of materials which are not produced or produced in insufficient amounts at enterprises of Ukraine. It is resulted in problems of their sufficient supply. In this paper, there is the analysis of the state of enterprises for production of such materials as aluminium and titanium alloys, special steels, nonmetals in the form of binders, carbon reinforcing fillers, composites, rubbers, rubber technical products, thin-layer thermal insulation coatings, sealants, glues, degreasing materials which are safe for ozone. The paper includes proposals for expansion of those enterprises and arrangement of new enterprises for production and supply of necessary amounts of materials if required.

УДК 681.518.5

Н. В. Ефименко

Науково-виробниче підприємство ХАРТРОН-ЮКОМ, Запоріжжя

ВЗАИМНАЯ ПРИВЯЗКА ВНУТРЕННИХ СИСТЕМ КООРДИНАТ АСТРОДАТЧИКОВ В ЗАДАЧЕ ВЫСОКОТОЧНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Рассматривается вопрос взаимной угловой привязки внутренних систем координат астродатчиков в задаче высокоточного определения ориентации космического аппарата. Привязка осуществляется путем сравнения расчетных и измеренных угловых расстояний между звездами, опознанными в датчиках, взаимное положение которых определяется. При построении алгоритма использовался гарантированный подход к решению задачи оценивания состояния динамической системы. Получена модель измерений взаимного углового положения внутренних систем координат и построен регуляризованный эллипсоидальный наблюдатель для оценки кватерниона, который определяет взаимное угловое положение внутренних систем координат. Приведены результаты численного моделирования предложенного алгоритма.

ВВЕДЕНИЕ

Расчет ориентации летательных аппаратов по звездам используется на практике уже несколько десятков лет. Вследствие того что положения звезд известны достаточно хорошо, использование их в качестве ориентиров позволяет с высокой точностью рассчитать ориентацию космического аппарата (КА). Для определения ориентации космического аппарата с помощью звезд в состав его системы управления должен входить астродатчик. Астродатчик визирует звезды, находящиеся в его поле зрения, и выдает направления на них относительно своей внутренней системы координат (ВСК). Измерительная информация о звезде подается на вход алгоритма опознавания, который ставит в соответствие измеренной звезде каталожную звезду. Далее алгоритм расчета ориентации, используя соответствие между визируемыми и каталожными звездами, рассчитывает ориентацию КА относительно инерциальной системы координат.

Имеются различные методы определения ориентации по звездам. В работе [8] обсуждается метод SMART получения ориентации КА по двум

звездам и расчет погрешности получаемой ориентации. Предлагаемый метод сложен, так как решается нелинейная система уравнений, в которой получаются два решения, одно из которых ложное; оно устраняется дополнительными математическими расчетами. В ряде работ обсуждается расчет ориентации КА по совокупности звезд. В работах [7, 9] рассматриваются методы определения ориентации КА с использованием фильтра Калмана. В работе [10] рассматривается алгоритм оценки ориентации КА, стабилизированного вращением, на базе солнечного и звездного датчиков. Определение ориентации осей КА осуществляется путем усреднения вспомогательных ориентаций, рассчитанных по различным парам визируемых объектов. Расчет ориентации по совокупности измеренных звезд может вестись с помощью нелинейных алгоритмов, примером которых может служить итерационный метод [5].

Основными недостатками всех этих алгоритмов определения ориентации является то, что погрешность определения ориентации обратно пропорциональна синусу угла между единичными векторами направления на звезды. Очевидно, что этот угол не превышает углового размера поля зрения астродатчика. Современные

астродатчики имеет сравнительно небольшое поле зрения, порядка $10\text{--}25^\circ$ и поэтому погрешность расчета ориентации по звездам, попавшим в поле зрения одного астродатчика, достаточно велика. Для устранения этого недостатка на борту КА устанавливают два и более астродатчика, и ориентация рассчитывается по всем звездам, попавшим в поле зрения этих астродатчиков. При этом угол между направлениями на звезды из разных астродатчиков может достигать несколько десятков градусов, что значительно повышает точность определения ориентации. При таком подходе точность определения ориентации в основном определяется точностью взаимной привязки внутренних систем координат астродатчиков. В связи с этим для получения высокой точности определения ориентации в состав системы определения ориентации должен входить алгоритм взаимной привязки внутренних систем координат, обеспечивающий привязку с погрешностью в несколько секунд. В данной работе рассматриваются вопросы построения такого алгоритма.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть на борту КА имеется два астродатчика АД1 и АД2. Астродатчики установлены таким образом, что угол между их оптическими осями равен α и удовлетворяет условию $\alpha \geq 2 \cdot \chi$, где χ — угловой размер поля зрения астродатчика. Свяжем с ПЗС-матрицами астродатчиков правые ортогональные внутренние системы координат P_1 и P_2 . Взаимное положение базисов P_1 и P_2 определим кватернионом $Q_{P_2P_1}$, задающем переход от базиса P_2 к базису P_1 . Значение кватерниона $Q_{P_2P_1}$ точно не известно, но имеется его оценка $\hat{Q}_{P_2P_1}$, которая связана с кватернионом $Q_{P_2P_1}$ соотношением

$$Q_{P_2P_1} = \hat{Q}_{P_2P_1} \circ E, \quad (1)$$

где E — кватернионное представление ошибки взаимной привязки базисов P_1 и P_2 , $\circ$ — операция кватернионного умножения. Будем полагать, что в первом астродатчике опознано m_1 , во втором — m_2 звезд, и каждый астродатчик в момент времени t_k выдает следующую информацию:

- оценку $\hat{Q}_{IP_i}$ ($i = 1, 2$) кватерниона перехода Q_{IP_i} от инерциальной системы координат I к своей внутренней системе координат P_i ;
- измеренные координаты $\hat{\mathbf{r}}_{P_1j_1}$, ($j_1 = 1, 2, \dots, m_1$) и $\hat{\mathbf{s}}_{P_2j_2}$, ($j_2 = 1, 2, \dots, m_2$) единичных направлений на опознанные звезды относительно своих внутренних систем координат P_1 и P_2 соответственно;
- каталожные направления $\mathbf{r}_{j_1}$ и $\mathbf{s}_{j_2}$ на опознанные звезды относительно инерциальной системы координат I .

Измерения производятся с погрешностями $\delta \mathbf{r}_{P_1j_1}$ и $\delta \mathbf{s}_{P_2j_2}$. О погрешностях измерений известно лишь то, что они удовлетворяют условиям

$$\|\delta \mathbf{r}\|_{P_1j_1}^2 \leq \delta_r^2,$$

$$\|\delta \mathbf{s}\|_{P_2j_2}^2 \leq \delta_s^2,$$

где скаляры δ_r и δ_s полагаются заданными. Требуется по измеренным и каталожным единичным векторам направления на звезды найти оценку $\hat{E}$ ошибки взаимной привязки базисов P_1 и P_2 .

РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Пусть $\mathbf{s}_{P_1j_2}$ ($j_2 = 1, 2, \dots, m_2$) — проекции векторов $\mathbf{s}_{P_2j_2}$ на оси базиса P_1 . Для единичных векторов $\mathbf{s}_{P_1j_2}$ можно записать следующие соотношения:

$$\mathbf{s}_{P_1j_2} = \bar{Q}_{P_2P_1} \circ \mathbf{s}_{P_2j_2} \circ Q_{P_2P_1} \quad (2)$$

В выражении (2) чертой сверху обозначен сопряженный кватернион.

Кватернион $Q_{P_2P_1}$ связан с кватернионом $\hat{Q}_{P_2P_1}$ соотношением (1). Кватернион E является кватернионом малого поворота, и поэтому представим в виде

$$E = 1 + \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (3)$$

где

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{pmatrix}$$

— вектор малого поворота. Подставив соотношения (1) и (3) в выражения (2), с точностью до величин второго порядка малости получим

$$\mathbf{s}_{P_1j_2} - \hat{\mathbf{s}}_{P_1j_2} = \hat{\mathbf{s}}_{P_1j_2} \times \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (4)$$

В выражении (4)

$$\hat{\mathbf{s}}_{P1j2} = \widehat{\mathcal{Q}}_{P2P1} \circ \mathbf{s}_{P2j2} \circ \widehat{\mathcal{Q}}_{P2P1}. \quad (5)$$

Пусть $n = \min(m1, m2)$. Найдем скалярные произведения единичных векторов $\mathbf{r}_{Pl}$ и $\mathbf{s}_{Pl}$ ($l = 1, 2, \dots, n$). Получим

$$\mathbf{r}_{Pl}^T \cdot \mathbf{s}_{Pl} - \mathbf{r}_{Pl}^T \cdot \hat{\mathbf{s}}_{Pl} = \mathbf{r}_{Pl}^T \cdot (\hat{\mathbf{s}}_{Pl} \times \boldsymbol{\varepsilon}). \quad (6)$$

Так как скалярное произведение векторов не зависит от системы координат, то

$$\mathbf{r}_{Pl}^T \cdot \mathbf{s}_{Pl} = \mathbf{r}_{Pl}^T \cdot \mathbf{s}_{Pl}. \quad (7)$$

Подставив соотношение (7) в выражение (6), получим систему n линейных алгебраических уравнений относительно вектора малого поворота $\boldsymbol{\varepsilon}$:

$$\mathbf{r}_{Pl}^T \cdot \mathbf{s}_{Pl} - \mathbf{r}_{Pl}^T \cdot \hat{\mathbf{s}}_{Pl} = \mathbf{r}_{Pl}^T \cdot \mathbf{F}(\hat{\mathbf{s}}_{Pl}) \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (8)$$

В выражении (8) матрица

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} 0 & x_3 & x_2 \\ x_3 & 0 & -x_1 \\ -x_2 & x_1 & 0 \end{pmatrix}$$

представляет собой линейный кососимметрический оператор векторного произведения, определяемый равенством

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{y} = \mathbf{x} \times \mathbf{y}.$$

Введем обозначения

$$z_l = \mathbf{r}_{Pl}^T \cdot \mathbf{s}_{Pl} - \mathbf{r}_{Pl}^T \cdot \hat{\mathbf{s}}_{Pl}, \quad (9)$$

$$h_l = \mathbf{r}_{Pl}^T \cdot \mathbf{F}(\hat{\mathbf{s}}_{Pl}). \quad (10)$$

Тогда изменение во времени вектора малого поворота $\boldsymbol{\varepsilon}$ с учетом того, что он в первом приближении является величиной постоянной, можно описать следующей линейной дискретной системой:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_{k+1} &= \boldsymbol{\varepsilon}_k, \\ \mathbf{Z}_k &= \mathbf{H}_k \boldsymbol{\varepsilon}_k, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\mathbf{H}_k = \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Z}_k = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Исследуем наблюдаемость этой системы. Согласно [6] матрица наблюдаемости для системы (11) имеет вид

$$\mathbf{P}_n = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_k \\ \mathbf{H}_{k+1} \\ \mathbf{H}_{k+2} \end{pmatrix}.$$

Для того чтобы система была наблюдаемой, необходимо и достаточно, чтобы ранг матрицы $\mathbf{P}_n$ был равен трем, т. е. матрица $\mathbf{P}_n$ имела три линейно независимые строки. Обозначим через $\mathbf{h}_{v_i}$ ($i = 1, 2, 3$) три произвольно выбранных строки из пространства строк матрицы $\mathbf{P}_n$. Рассмотрим матрицу

$$\mathbf{P}_v = \begin{pmatrix} \mathbf{h}_{v_1} \\ \mathbf{h}_{v_2} \\ \mathbf{h}_{v_3} \end{pmatrix}.$$

Определитель этой матрицы равен объему пирамиды, построенной на векторах $\mathbf{h}_{v_1}^T$, $\mathbf{h}_{v_2}^T$, $\mathbf{h}_{v_3}^T$. Следовательно, система (11) будет наблюдаемой, если для любого момента времени t_k среди векторов $\mathbf{h}_l^T$ ($l = 1, 2, \dots, n$) имеется три вектора, лежащие в несовпадающих плоскостях. Геометрически это значит, что среди опознанных звезд имеется три звезды, единичные векторы направлений на которые образуют трехгранную пирамиду с основанием, определяемым угловым расстоянием между звездами.

Для векторов $\tilde{\mathbf{r}}_{P1j1}$, $\tilde{\mathbf{s}}_{P2j2}$ и векторов $\mathbf{r}_{P1j1}$, $\mathbf{s}_{P2j2}$ справедливы соотношения

$$\tilde{\mathbf{r}}_{P1j1} = \mathbf{r}_{P1j1} + \delta \mathbf{r}_{P1j1},$$

$$\tilde{\mathbf{s}}_{P2j2} = \mathbf{s}_{P2j2} + \delta \mathbf{s}_{P2j2}.$$

В связи с этим вместо точного значения вектора z_l мы имеем его оценку

$$\hat{z}_l = \mathbf{r}_{Pl}^T \cdot \mathbf{s}_{Pl} - \tilde{\mathbf{r}}_{Pl}^T \cdot \tilde{\mathbf{s}}_{Pl} = z_l + \delta z_l,$$

где

$$\tilde{\mathbf{s}}_{Pl} = \widehat{\mathcal{Q}}_{P2P1} \circ \tilde{\mathbf{s}}_{P2l} \circ \widehat{\mathcal{Q}}_{P2P1},$$

$$\delta z_l = -\delta \mathbf{r}_{Pl}^T \cdot \mathbf{s}_{Pl} - \mathbf{r}_{Pl}^T \cdot \delta \mathbf{s}_{Pl},$$

$$\delta \mathbf{s}_{Pl} = \widehat{\mathcal{Q}}_{P2P1} \circ \delta \mathbf{s}_{P2l} \circ \widehat{\mathcal{Q}}_{P2P1}.$$

Из-за наличия погрешностей измерений матрица $\mathbf{h}_l$ также неизвестна, но для нее справедлива оценка

$$\hat{\mathbf{h}}_l = \tilde{\mathbf{r}}_{Pl}^T \cdot \mathbf{F}(\tilde{\mathbf{s}}_{Pl}) = \mathbf{h}_l + \delta \mathbf{h}_l,$$

$$\delta \mathbf{h}_l = \tilde{\mathbf{r}}_{Pl}^T \cdot \mathbf{F}(\delta \mathbf{s}_{Pl}).$$

В силу того, что погрешности $\delta \mathbf{r}_{p1l}$ и $\delta \mathbf{s}_{p2l}$ ограничены, то будут ограниченными и погрешности δz_l и $\delta \mathbf{h}_l$. Они согласно постановке задачи будут удовлетворять неравенствам

$$\delta z_l^2 \leq \delta_r^2 + \delta_s^2,$$

$$\|\delta \mathbf{h}_l\|^2 \leq \delta_r^2 + \delta_s^2.$$

Таким образом, модель наблюдаемого процесса имеет вид

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_{k+1} &= \boldsymbol{\varepsilon}_k, \\ \hat{\mathbf{Z}}_k &= \hat{\mathbf{H}}_k \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_k + \delta \mathbf{Z}_k, \\ \hat{\mathbf{H}}_k &= \mathbf{H}_k + \delta \mathbf{H}_k, \\ \delta \mathbf{H}_k &= \begin{pmatrix} \delta h_1 \\ \delta h_2 \\ \vdots \\ \delta h_n \end{pmatrix}, \quad \delta \mathbf{Z}_k = \begin{pmatrix} \delta z_1 \\ \delta z_2 \\ \vdots \\ \delta z_n \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Для определения вектора малого поворота $\boldsymbol{\varepsilon}$ применим алгоритм построения регуляризованной эллипсоидальной оценки вектора состояния дискретной динамической системы по неполным скалярным измерениям [1–4]. Этот алгоритм имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} 1 &= 1, 2, \dots, n \\ \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{k+1,l+1} &= \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{k,l} + \beta_{l+1} \mathbf{K}_{l+1} \tilde{z}_{l+1} \\ \tilde{z}_{l+1} &= \hat{z}_{l+1} - \hat{\mathbf{h}}_{l+1}^T \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}_{k,l} \\ \mathbf{R}_{k+1,l+1} &= \rho_l (\mathbf{R}_{kl} - \beta_{l+1} \mathbf{K}_{l+1} \hat{\mathbf{h}}_{l+1} \hat{\mathbf{R}}_{k,l+1}), \\ \mathbf{K}_{l+1} &= \mathbf{R}_{kl} \hat{\mathbf{h}}_{l+1}^T \sigma_{l+1}^{-2}, \\ \sigma_{l+1}^2 &= \hat{\mathbf{h}}_{l+1}^T \mathbf{R}_{kl} \hat{\mathbf{h}}_{l+1} \\ \beta_{l+1} &= \begin{cases} 0, & |\tilde{z}_{l+1}| \leq \delta, \\ 1 - \frac{\delta}{|\tilde{z}_{l+1}|}, & |\tilde{z}_{l+1}| > \delta, \end{cases} \\ \rho_{l+1} &= 1 + \beta_{l+1} \tilde{z}_{l+1}^2 \sigma_{l+1}^{-2}. \end{aligned}$$

Здесь $\boldsymbol{\varepsilon}_{k+1,l+1}$ — вектор состояния системы в момент времени t_{k+1} после обработки скалярного

измерения $\hat{z}_{l+1}$, $\delta^2 \geq \delta z_l^2$ и $\mu \geq \|\delta \mathbf{h}_l\|$ — параметры настройки фильтра, $\mathbf{R}_{k+1,l+1}$ — положительно определенная матрица, определяющая геометрию эллипсоида ошибки оценивания в момент времени t_{k+1} после обработки $l+1$ скалярного измерения. Использование указанного подхода позволило получить высокие технические характеристики алгоритма взаимной привязки внутренних систем координат двух астродатчиков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО АЛГОРИТМА

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма было проведено численное моделирование. Моделировался процесс определения взаимной привязки внутренних систем координат двух астродатчиков АД1 и АД2, установленных на спутнике. Взаимное расположение астродатчиков было выбрано таким образом, что расчетный угол α между их оптическими осями был равен 66° . Вектор $\boldsymbol{\varepsilon}$ погрешности установки датчиков на борту был выбран следующим:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} 1 \\ -0.5 \\ 1.5 \end{pmatrix} \cdot \frac{\pi}{180 \cdot 60}.$$

При моделировании использовалась следующая модель астродатчика:

$$\begin{aligned} i &= 1, 2, \dots, m, \\ \mathbf{r}_i &= \begin{pmatrix} \cos(\alpha_i) \sin(\beta_i) \\ \sin(\alpha_i) \sin(\beta_i) \\ \cos(\beta_i) \end{pmatrix}, \\ \mathbf{r}_i &= \mathbf{Q}_{IP} \circ \mathbf{r}_{Pi} \circ \bar{\mathbf{Q}}_{IP}, \\ \alpha_i &= a_1 + (b_1 - a_1) \cdot \xi_{1i}, \\ \beta_i &= a_2 + (b_2 - a_2) \cdot \xi_{2i}, \\ \tilde{\mathbf{r}}_i &= \begin{pmatrix} \cos(\tilde{\alpha}_i) \sin(\tilde{\beta}_i) \\ \sin(\tilde{\alpha}_i) \sin(\tilde{\beta}_i) \\ \cos(\tilde{\beta}_i) \end{pmatrix}, \\ \tilde{\alpha}_i &= \alpha_i + \delta \alpha_i, \\ \tilde{\beta}_i &= \beta_i + \delta \beta_i, \end{aligned}$$

$$\delta\alpha_i = \delta\alpha_0 + k \cdot f_{1i},$$

$$\delta\beta_i = \delta\beta_0 + k \cdot f_{2i},$$

$$\hat{Q}_{IP} = Q_{IP} \circ E,$$

$$E = \left(1, \frac{\mathbf{e}}{2}\right), \mathbf{e} \in R^3,$$

$$\mathbf{e} = \mathbf{e}_0 + \mathbf{k}_e \cdot f_e.$$

Здесь тильдой обозначены измеренные значения, m — количество опознанных звезд, $\mathbf{r}_{pi}$ — единичный вектор направления на i -ю звезду, заданный проекциями на оси внутренней системы координат P ; α_i, β_i — углы, определяющие положение единичного вектора направления на звезду во внутренней системе координат; a_1, b_1, a_2, b_2 — константы, определяющие поле зрения астродатчика; $\delta\alpha_0, \delta\beta_0$ — постоянные составляющие ошибок измерения единичного вектора направления на i -ю звезду, $\mathbf{e}_0$ — постоянная ошибка вычисления оценки ориентации по звездам, попавшим в поле зрения астродатчика; ξ_{1i}, ξ_{2i} — равномерно распределенные случайные числа в интервале $[0, 1]$; f_i, f_{1i}, f_{2i}, f_e — случайные числа, распределенные по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и средним квадратичным отклонением, равным 1, k — средняя квадратичная погрешность измерений проекций единичного вектора направления на i -ю звезду, попавшую в поле

зрения астродатчика, $\mathbf{k}_e$ — средняя квадратичная погрешность вычисления оценки ориентации по звездам, попавшим в поле зрения.

Численные значения параметров модели были следующими:

$$a_1 = \pi, b_1 = -\pi,$$

$$a_2 = \pi/(180 \cdot 17), b_2 = -\pi/(180 \cdot 17),$$

$$k = \pi/(180 \cdot 3600 \cdot 2),$$

$$\mathbf{k}_e = \begin{pmatrix} 45 \\ 45 \\ 6 \end{pmatrix} \cdot \pi/(180 \cdot 3600),$$

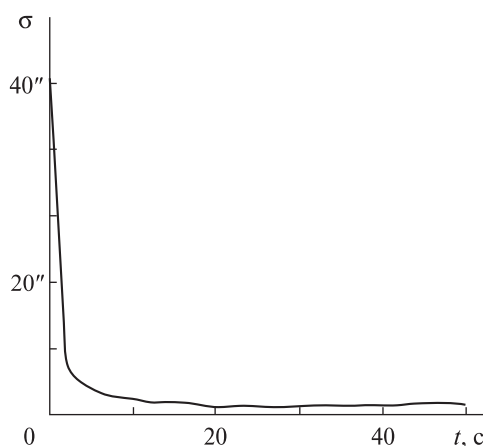
$$\delta\alpha_0 = \delta\beta_0 = 1 \cdot \pi/(180 \cdot 3600),$$

$$\mathbf{e}_0 = \begin{pmatrix} -5 \\ 5 \\ -5 \end{pmatrix} \cdot \pi/(180 \cdot 3600).$$

При моделировании полагалось, что в первом астродатчике опознано пять звезд, во втором — десять звезд. На рисунке приведен график изменения во времени нормы вектора погрешности взаимной привязки астродатчиков, построенный по результатам моделирования предложенного алгоритма. Видно, что предлагаемый алгоритм обеспечивает высокую точность привязки внутренних систем координат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен алгоритм взаимной привязки внутренних систем координат астродатчиков. Алгоритм основан на гарантированном подходе к решению задач оценивания, при котором оцениваемые величины и погрешности измерений задаются множествами своих значений (множествами неопределенности). Решение задачи оценивания при этом сводится к построению некоторых множеств, гарантированно содержащих неизвестный вектор состояния системы. Приведены результаты численного моделирования предложенного алгоритма, которые показали очень высокие технические характеристики алгоритма взаимной привязки внутренних систем координат двух астродатчиков. Алгоритм может быть применен при разработке высокоточных систем определения ориентации.



Норма σ вектора ошибки взаимной привязки внутренних систем координат астродатчиков

1. Ефименко Н. В. Исследование устойчивости эллипсоидальных наблюдателей // Вестник Харьков. гос. политехнического ун-та. — 1999. — № 55. — С. 16—18.
2. Ефименко Н. В., Луценко Н. В. Построение регуляризованных эллипсоидальных оценок в задаче определения вектора состояния линейной дискретной системы с многомерным выходом // Радиоэлектроника Информатика Управління. — 2006. — № 2. — С. 157—161.
3. Ефименко Н. В., Новиков А. К. Способ построения регуляризованных эллипсоидальных наблюдателей // 4-я укр. конф. з автоматичного управління «Автоматика 97». — Черкаси: ЧІТІ, 1997. — Т. 4. — С. 83.
4. Ефименко Н. В., Новиков А. К. Регуляризованные эллипсоидальные наблюдатели и их применение в задаче определения ориентации космического аппарата // Проблемы управления и информатика. — 1998. — № 6. — С. 145—155.
5. Катаргин М. Ю. Алгоритм среднеквадратичной оценки ориентации космических аппаратов и его погрешности // Космич. исслед.— 1986.—24, вып. 6. — С. 826—830.
6. Сейдж Э. П., Уайт Ч. С. III. Оптимальное управление системами. — М.: Радио и связь, 1982. — 392 с.
7. Junkins J., White C., Turner J. Star Pattern Recognition for Real Time Determination // J. Astronautical Sci.— 1977.— 25, N 3. — P. 251—270.
8. Rupert P. SMART — A three-axis stabilized attitude reference technique // J. Spacecraft and Rockets. — 1971. — 8. — P. 1195—1201.
9. Strikwerda T. E. Real time spacecraft attitude determination by star pattern recognition // AIAA Paper. — 1979. — N 79. — P. 0254.
10. Woerkom V., Sonnenschein F. Spacecraft attitude measurement using the ESA starmapper // ESA J. — 1980. — 4, N 3.— P. 287—294.

Стаття надійшла до редакції 14.11.13

М. В. Єфіменко

ВЗАЄМНЕ ПРИВ'ЯЗУВАННЯ ВНУТРІШНІХ СИСТЕМ КООРДИНАТ АСТРОДАВАЧІВ У ЗАДАЧІ ВИСОКОТОЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ОРІЄНТАЦІЇ КОСМІЧНОГО АПАРАТА

Розглянуто питання взаємного кутового прив'язування внутрішніх систем координат астродавачів у задачі високоточного визначення орієнтації космічного апарата. Прив'язування здійснюється шляхом порівняння розрахункової та вимірної кутової відстані між зірками, розпізнаними в давачах, взаємне положення яких визначається. При побудові алгоритму використовувався гарантований підхід до вирішення задачі оцінювання стану динамічної системи. Отримано модель вимірювань взаємного кутового положення внутрішніх систем координат і побудовано регуляризований еліпсоїдальний спостерігач для оцінки кватерніона, який визначає взаємне кутове положення внутрішніх систем координат. Наведено результати чисельного моделювання запропонованого алгоритму.

N. V. Efimenko

MUTUAL RELATIONS OF INTERNAL COORDINATE SYSTEMS OF STAR SENSORS IN THE PROBLEM OF ACCURATE DETERMINATION OF SPACECRAFT ORIENTATION

We consider the problem of estimating the relative angular position of internal coordinate systems of star sensors for accurate determination of spacecraft orientation. The relative angular position of the internal systems is determined by the comparison of calculated and measured angular distances between stars which were identified with the star sensors. Our algorithm to determine the relative angular position uses guaranteed approach to solving the problem of estimating the state of a dynamic system. A model to determine the relative angular position of internal coordinate systems was developed. Based on the model, a regularized ellipsoidal observer was build for estimating the quaternion determining the relative angular position of the internal coordinate systems. Our results of simulations of the algorithm are given.

В. І. Лялько¹, Ю. В. Костюченко^{1,2}, І. Г. Артеменко¹, Л. М. Попадюк², Р. В. Федина², А. С. Волошаненко²

¹ Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка

АНАЛІЗ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ В ЗАДАЧАХ ОЦІНКИ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА РЕГІОНАЛЬНОМУ РІВНІ ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ

Описується роль даних та технологій ДЗЗ у методиках оцінки невизначеностей балансу парникових газів та емісій вуглецю в задачах оцінки кліматичних змін на регіональному рівні. Показано, що використання даних супутникового спостереження для оцінки невизначеностей, притаманних екологічним, соціально-екологічним та соціально-економічним процесам, що беруть участь у формуванні небезпек, допоможе в оптимізації системного управління екологічними, соціальними та економічними ризиками як на державному, так і на регіональному рівні.

ВСТУП

Оцінка регіональних особливостей кліматичних змін має на меті коректну оцінку відповідних ризиків та загроз. Виходячи із прийнятої більшістю наукової спільноти думки, що кліматичні зміни великою мірою спровоковані антропогенним впливом на середовище [1], слід розглянути питання достовірності оцінок балансу вуглецю і парникових газів, що вимагає, в першу чергу, оцінок невизначеностей, притаманних відповідним методикам. Це дозволить надалі адекватно вирішувати задачі аналізу кліматичних змін, управління ризиками, адаптації та зменшення збитків, зумовлених негативним впливом кліматичних змін [2].

ТРАДИЦІЙНИЙ ПІДХІД

Узагальнений підхід до визначення антропогенних емісій вуглецю. Задачею інвентаризації є оцінити прямий вплив антропогенної діяльності на концентрацію парникових газів в атмосфері через визначення емісій. Зазвичай задача визначення емісій зводиться до оцінки кількості викидів

вуглецю за коефіцієнтами емісій [3]. Однак коефіцієнти емісії вуглецю з достатньою точністю відомі лише для викидів вуглекислого газу. В такому випадку для інвентаризації емісій інших газів, таких як CH_4 , N_2O , NO_x , CO і неметанових вуглеводнів (NMVOC), пов'язаних зі спалюванням відповідного палива, проводиться аналіз і розрахунки по секторах економіки з використанням напівемпіричних залежностей та статистичних даних, а також коефіцієнти емісій цих газів. Викиди цих газів визначають за формулою [3]:

$$E_x = mTK_x, \quad (1)$$

де E_x — величина емісії парникових газів, m — маса використаного палива, T — теплотворне значення палива, K_x — коефіцієнт емісії відповідного газу.

Основними видами палива, які є джерелами емісії згаданих газів, є вугілля, природний газ, нафта (бензин, дизельне паливо) і біомаса (дерева, відходи деревини, деревне паливо). Облік емісії можна вести як за видами палива для всіх секторів економіки, так і по секторах для певного виду палива.

Зазвичай найбільше уваги приділяється викидам двоокису вуглецю та метану. Для визначення

© В. І. ЛЯЛЬКО, Ю. В. КОСТЮЧЕНКО, І. Г. АРТЕМЕНКО,
Л. М. ПОПАДЮК, Р. В. ФЕДИНА, А. С. ВОЛОШАНЕНКО, 2013

маси вуглецю у використаному паливі m_C можна розрахувати за допомогою формули

$$m_C = m T k_C, \quad (2)$$

де m — маса використаного палива; T — теплотворне значення палива, що є критерієм його теплової цінності, тобто переводить масу спаленого палива у кількість теплоти, виділеної при його згорянні; k_C — коефіцієнт емісії вуглецю, який дає фактичний вміст вуглецю у спаленому паливі. Зазначимо, що при згорянні палива окислюється не весь вуглець. Це залежить від ефективності роботи устаткування, тому у математичних моделях слід робити поправку на неповне окислення вуглецю. Для цього використовується коефіцієнт фракції окисленого вуглецю f_C — відношення кількості вуглецю, що згорів, до загальної його кількості в паливі:

$$E_{CO_2} = 44 m_C f_C / 12. \quad (3)$$

При цьому слід враховувати, що значна частина енергетичної сировини не перетворюється на енергію. Певна частина палива буде використана як сировина для виробництва інших видів продукції (наприклад пластмаси), або в неенергетичних цілях (виробництво бітуму для дорожнього будівництва). В цих процесах відсутнє окиснення вуглецю (і, таким чином — пряма емісія). Такий вуглець називається нагромадженим і виключається з розрахунків загальної емісії вуглекислого газу. При згорянні деяких видів палива методологія IPCC рекомендує вносити поправку на оцінку нагромадженого вуглецю m_{SC} [3], що рекомендовано робити в рамках підходу:

$$m_{SC} = f_{SC} m_C, \quad (4)$$

де f_{SC} — фракція нагромадженого вуглецю.

Таким чином, загальну емісію вуглекислого газу з внесенням поправки на масу нагромадженого вуглецю і з використанням рівнянь (2) і (3), знаходимо з виразу

$$E_{CO_2} = 44(m_C - m_{SC})f_C / 12. \quad (5)$$

Таким шляхом ми отримуємо можливість визначати антропогенні емісії двоокису вуглецю.

Величина емісій CH_4 , пов'язаних з відповідними витоками (наприклад у гірничодобувній промисловості), дорівнює

$$E_{CH_4} = 0.67 m k_{CH_4}, \quad (6)$$

де m — маса видобутого продукту (наприклад, вугілля в млн тонн), k_{CH_4} — коефіцієнт емісії, рівний об'єму метану (m^3) при видобуванні однієї тонни продукту (вугілля) і залежить від способу видобування. Для перетворення об'єму метану в його масу (Гт) використовується значення густини метану при тиску в одну атмосферу і температурі $20^\circ C$, яка рівна $0.67 \cdot 10^{-6}$ Гт/ m^3 .

Для розрахунку загальної антропогенної емісії в такому випадку можна запропонувати використовувати відносно простий алгоритм:

$$E_{tot} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M k_{nm} \Delta x_{nm}, \quad (7)$$

де M — сектори економіки, N — ділянки території, за якими проводиться розгляд, x — статистичні дані, що використовуються для опису впливів.

За описаним алгоритмом можна розрахувати викиди парникових газів від кінцевого спалювання кожного виду палива. Крім того, зважаючи на те, що дані x (зокрема m , що описує масу видобутого продукту, або спалюваного палива) можуть в загальному випадку розглядатися як функції часу, які описують технологічний і соціально-економічний розвиток регіонів, наведений алгоритм дозволяє прогнозувати викиди парникових газів за відомими умовами майбутнього розвитку (як, наприклад, «сценарії емісій» IPCC).

Врахування невизначеностей антропогенних емісій. Невизначеності, що притаманні описаному підходу, можуть бути значними і залежать від якості використаних статистичних даних про секторальний економічний розвиток. Але при цьому варто зазначити, що ці невизначеності будуть скоріше алеаторичними, тобто такими, що пов'язані радше із неточностями даних, недосконалістю систем збирання і методами обробки інформації.

В такому випадку можна використовувати достатньо прості правила визначення похибок і відповідних невизначеностей відносно різних оцінок. При цьому слід враховувати, що як правило розподіл x не є нормальним, а тому до використання середніх значень слід ставитися з обережністю.

Фіксуємо дві різні (бажано незалежні) оцінки емісій $E_{tot,n}^1$ і $E_{tot,n}^2$ для певного регіону n із множини N у всіх секторах економіки t для всіх досліджуваних типів парникових газів i . В такому випадку для оцінки невизначеності отриманих оцінок можемо записати вираз

$$U_n = (|E_{tot,n}^1 - E_{tot,n}^2|) / (E_{tot,n}^1). \quad (8)$$

А загальна невизначеність для всього регіону N , всіх типів парникових газів дорівнює

$$U_{tot} = \sqrt{\sum_n U_n^2}. \quad (9)$$

Наведений підхід є простим, але має певні обмеження. Він, зокрема, є чутливим до вхідних даних. По-друге, використання методологічно різнорідних масивів даних може призвести до великих похибок і показати занижені оцінки достовірності, особливо на значних часових проміжках. Тому при плануванні стратегічних заходів в галузі екологічної безпеки, економічних заходів з впровадження механізмів відшкодування надлишкових викидів вуглецю тощо слід використовувати більш коректні, хоча і складніші алгоритми оцінки достовірності розрахунків.

МЕТОДИ СУПУТНИКОВОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА КОНТРОЛЮ ЕМІСІЙ

Метод перерахунку радіаційних характеристик атмосфери в концентрації CO_2 з використанням даних супутникового спостереження. Як приклад можна навести базовий алгоритм визначення складу атмосфери та алгоритм перерахунку радіаційних характеристик у показники концентрації окремих газів [4–6], який було розроблено та успішно застосовано для сенсора SCIAMACHY. Його застосування дозволяє отримати концентрації CO_2 , CH_4 і O_2 за даними супутникових вимірів [7]. Цей алгоритм отримав назву алгоритму «модифікованих вагових функцій для диференційної оптичної абсорбційної спектроскопії» (Weighting Function Modified Differential Optical Absorption Spectroscopy — WFM-DOAS).

Метод базується на застосуванні методу найменших квадратів для аналізу (зокрема, даунскейлінгу) обраних вертикальних атмосферних профілів. Параметри визначаються за прямими даними спостереження вертикальних характе-

ристик атмосфери. Логарифм лінеаризованого радіаційного переносу, що визначається моделлю атмосфери та уточнюється за даними спостережень, разом з поліномом $P_i(\mathbf{a})$ приводиться до логарифма відношення виміряного супутником випромінювання, яке пройшло крізь атмосферу, та сонячного випромінювання, тобто до отриманого нормалізованого сонячного випромінювання I_i^{obs} . Загальне рівняння алгоритму WFM-DOAS можна записати у вигляді [5]

$$\sum_{i=1}^m (\ln I_i^{obs} - \ln I_i^{mod}(\hat{\mathbf{V}}, \hat{\mathbf{a}}))^2 \equiv \|\mathbf{RES}\|^2 \rightarrow \min. \quad (10)$$

Тут модель лінійного переносу випромінювання представлена у вигляді

$$\ln I_i^{mod}(\hat{\mathbf{V}}, \hat{\mathbf{a}}) = \ln I_i^{mod}(\bar{\mathbf{V}}) + \sum_{j=1}^J \left. \frac{\partial \ln I_i^{mod}}{\partial V_j} \right|_{\bar{V}_j} \times (\hat{V}_j - \bar{V}_j) + P_i(\hat{\mathbf{a}}). \quad (11)$$

Індекс i відноситься до довжини хвилі i -го пікселя зображення. Компоненти V_j вектора $\mathbf{V}$ визначають вертикальні колонки всіх газів, що мають абсорбційні лінії у обраному спектральному вікні (діапазоні зйомки). Як параметри приведення застосовуються характеристики вертикального розподілу V_j та поліноміальні коефіцієнти компонентів вектора $\mathbf{a}$. Також за параметр вирівнювання використано розподіл температури в атмосфері.

Параметри перерахунку визначаються як мінімум (за методом найменших квадратів) різниці між виміряним випромінюванням ($\ln I_i^{obs}$) та випромінюванням, що задане моделлю алгоритму ($\ln I_i^{mod}$), тобто довжиною вектора $\mathbf{RES}$ (зокрема його компонентами RES_i) для кожного спектрального виміру i одночасно.

Для визначення вмісту вуглецевого газу використовується усереднена по глибині спостереження молярна фракція двоокису вуглецю, перерахована для сухого повітря, та одночасно виміряна фракція кисню. Визначення вмісту кисню значно простіше, позаяк його молярні долі добре відомі і виміряні з достатньою точністю. Таким чином, середня по глибині спостереження концентрація двоокису вуглецю XCO_2 розраховується наступним чином [5, 6]:

$$XCO_2 = \frac{CO_2^{col}}{O_2^{col}/O_2^{mf}} \quad (12)$$

Тут CO_2^{col} і O_2^{col} — отриманий абсолютний вміст CO_2 і O_2 (в молекулах на cm^2), $O_2^{mf} = 0.2095$ — очікувана (осереднена по глибині спостереження) молярна фракція кисню, приведена на сухе повітря.

Таким чином провадиться *перерахунок інтенсивності випромінювання у межах смуги поглинання окремого газу у значення тропосферної концентрації* цього газу. Відокремлення тропосфери проводиться через урахування інших, зокрема температурних показників та врахуванні атмосферного тиску через аналіз аерозолів. Детально методику перерахунку та відповідний алгоритм описано в роботі [5].

Метод перерахунку радіаційних характеристик атмосфери в концентрації CH_4 з використанням даних супутникового спостереження. Схожим чином визначається вміст інших газів, зокрема метану. При цьому в якості додаткових параметрів використовується не тільки вміст кисню, але й вміст двоокису вуглецю [4].

На відміну від описаного на попередньому етапі методу визначення вмісту вуглекислого газу, в цій версії алгоритму WFM-DOAS молярні фракції метану в сухому повітрі визначаються за вмістом CO_2 замість O_2 , що дозволяє зменшити відповідні похибки.

У версії алгоритму WFM-DOAS середня по глибині спостереження концентрація метану XCH_4 розраховується наступним чином [8]:

$$XCH_4 = \frac{CH_4^{col}}{CO_2^{col}/CO_2^{mf}}, \quad (13)$$

де CH_4^{col} і CO_2^{col} — отриманий абсолютний вміст CH_4 і CO_2 (в молекулах на cm^2), CO_2^{mf} — очікувана (усереднена по глибині спостереження) молярна фракція кисню, приведена на сухе повітря. Для CO_2^{mf} використовується константа, оцінена в 370 ppm. Тому нормалізація з вводом вуглекислого газу мало систематизує загальну помилку із зміною усереднених по глибині спостереження молярних фракцій двоокису вуглецю в сухому повітрі. Такий підхід дещо покращує використання площі моделювання CO_2^{mf} , приклад — асиміляція системи детектування вуг-

лецю. Детально методику перерахунку та відповідний алгоритм описано в роботі [8].

ЩОДО МЕТОДИКИ КОНТРОЛЮ ЕМІСІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ДАНИХ СУПУТНИКОВОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Визначення емісій за даними супутникового контролю концентрацій парникових газів. Розподіли атмосферних концентрацій двоокису вуглецю та метану над територією України, отримані за даними супутникових спостережень відповідно до описаних алгоритмів, представлені на рис. 1.

Виходячи з наведених даних про виміряні атмосферні концентрації, можна розрахувати викиди відповідних парникових газів. Найпростіший шлях для оцінки сумарної річної емісії за виміряними концентраціями парникових газів у повітрі може бути визначений як [3, 9]

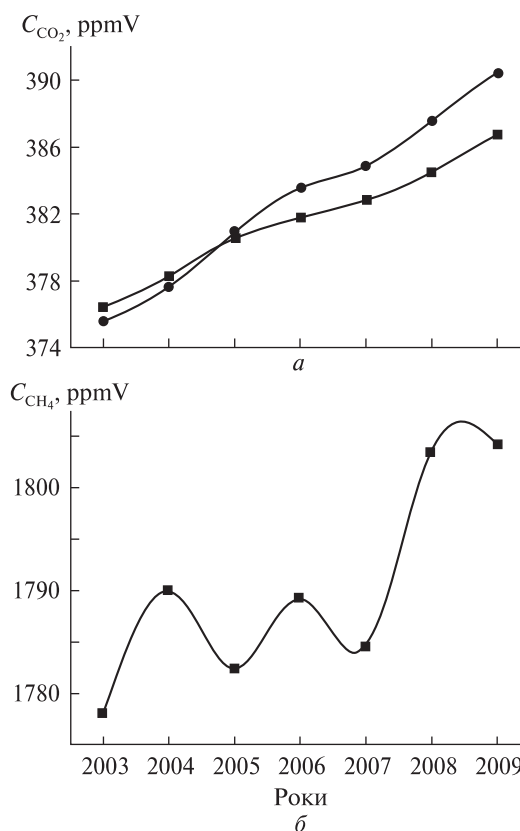


Рис. 1. Динаміка змін концентрації CO_2 (а) і CH_4 (б) парникових газів над територією України за даними супутникового спостереження (точки — дані AIRS, квадрати — дані SCIAMACHY)

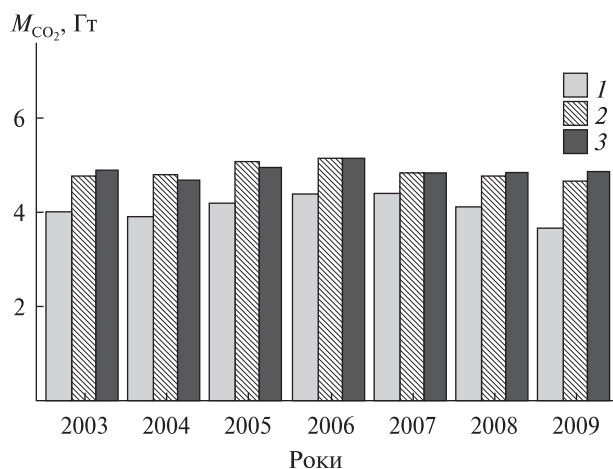


Рис. 2. Порівняння розрахунків емісій M_{CO_2} за даними: 1 — офіційної статистики (антропогенні викиди), 2 — незалежних дослідників (з урахуванням екологічних моделей та моделей вуглецевого циклу), 3 — супутникових спостережень на період 2003 — 2009 рр.

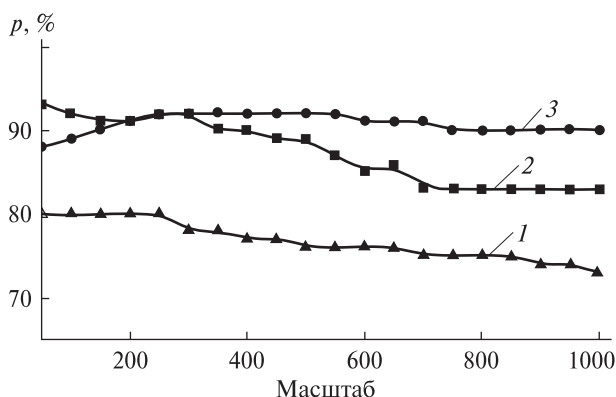


Рис. 3. Значення показників достовірності p оцінок викидів парникових газів, отриманих за даними: 1 — офіційної статистики (антропогенні викиди), 2 — незалежних дослідників (з урахуванням екологічних моделей та моделей вуглецевого циклу), 3 — супутникових спостережень

$$E_i = \sum_i \kappa_i \frac{(C_{cur} - C_{pr}) M_i}{C_{0i}} / t. \quad (14)$$

Тут C_{cur} — поточна середньорічна атмосферна концентрація парникового газу i над певною територією, яка визначається за даними поточних супутникових вимірювань, C_{pr} — попередня середньорічна атмосферна концентрація парникового газу i над певною територією, яка була визначена за даними попередніх супутникових вимірювань,

C_{0i} — середньорічна атмосферна концентрація оцінюваного парникового газу i над певною територією в доіндустріальну еру (визначається за геологічними та історичними даними), M_i — історична маса оцінюваного парникового газу в атмосфері (визначається за геологічними та історичними даними) [10]. Для двоокису вуглецю та метану значення C_0 складають відповідно 275 та 700 ppmv, а значення M_i — $220.89 \cdot 10^{10}$ тонн для CO_2 та $408.94 \cdot 10^{10}$ тонн для CH_4 [11] для сукупної земної атмосфери. Коефіцієнт κ_i визначається з урахуванням тривалості життя парникового газу та його кількості, накопиченої на момент аналізу (для короткострокових прогнозів можна вважати, що для всіх газів $\kappa_i = 1$), t — період усереднення (зазвичай — роки).

Використання цього алгоритму дозволяє проводити поточний контроль національних емісій парникових газів незалежними методами.

Наведені дані дозволяють зробити висновки про важливість врахування процесів, що відбуваються в екосистемах. Вони можуть складати від 19 до 25 % внеску в загальні емісії і мають бути відповідно відображені (див. рис. 2 і 3).

Оцінка невизначеностей розрахунків емісій за різними методиками. Середні показники невизначеності емісій складають за період 2003—2009 рр. близько 36 %, що і визначає економічні ризики на рівні 95—120 млн дол на рік. Застосування даних незалежних експертиз та методик контролю атмосферних концентрацій парникових газів, як показують наведені дані, дозволяє зменшити невизначеності на 20 % за рахунок уточнення моделей кругообігу вуглецю в екосистемах (що мають похибку 11—14 %) та застосування просторово інтегрованих даних ДЗЗ (похибка 7—10 %).

В такому випадку, враховуючи характеристики розподілу даних, можемо записати для оцінки невизначеності модифікований відносно рівняння (8) вираз:

$$U_n = (|E_{tot,n}^1 - E_{tot,n}^2|) \times \left[\frac{\sigma_i \sum_{i,m} \left(\frac{|E_{tot,n}^1 - E_{tot,n}^2|}{2} - \sum_i E_{tot,n}^1 \right)}{CoVar_m} \right]^{-1}. \quad (15)$$

А загальна невизначеність для всього регіону N всіх типів парникових газів може бути розрахована за алгоритмом (9).

Якщо застосувати для оцінки невизначеності алгоритм (15) і (9), то можна отримати середнє значення підвищення достовірності даних, отримуваних традиційними методами (за рахунок зменшення відносної невизначеності), а також оцінок, отримуваних з використанням екологічних та геобіофізичних моделей обігу вуглецю в екосистемах по відношенню до методик ДЗЗ.

Розрахунки показують, що оцінки, які базуються на використанні інтегрованих моделей кругообігу вуглецю, та оцінки, отримані із застосуванням даних ДЗЗ, є значно точнішими. Показник відносної достовірності оцінки емісій парникових газів традиційними методами відносно методик ДЗЗ складає у перерахунку на економічні показники близько 8.3 млн дол/рік в середньому по періоду 2003—2009 рр.

Методи оцінки невизначеностей при аналізі потоків вуглецю. Слід зазначити, що визначальну роль у зменшенні невизначеності при контролі емісій парникових газів відіграє коректний аналіз кругообігу вуглецю та екологічні моделі, тобто формалізовані представлення процесів накопичення та перетворення вуглецевих сполук в екосистемах.

Для визначення похибки при розрахунках потоків вуглецю в моделях повного вуглецевого циклу (і, таким чином, при вивченні достовірності оцінок викидів парникових газів) слід використовувати підхід, що дає можливість оперувати статистично незалежними розподілами випадкових параметрів (отриманих, в тому числі за допомогою методів ДЗЗ).

В роботі [12] запропоновано алгоритм для визначення стандартної похибки m_y^2 потоку вуглецю $Y = f(X_i)$, який визначається як функція випадкового розподілу X_i при $i = 1, 2, \dots, k$:

$$m_y^2 = \sum_{i=1}^k \left(\frac{dY}{dX_i} m_i \right)^2 + 2 \sum_{i>j} \left(\frac{dY}{dX_i} \right) \left(\frac{dY}{dX_j} \right) r_{ij} m_{X_i} m_{X_j}. \quad (16)$$

Тут r_{ij} — коефіцієнти кореляції між розподілами X_i та X_j .

Запропонований алгоритм дає змогу визначити похибку оцінки потоків вуглецю в усіх ком-

понентах системи за всіма даними, наявними для аналізу. Найбільш важливим тут є те, що він дозволяє інтегрувати в єдиний підхід дані супутникового спостереження важливих параметрів екосистем.

Окремо слід оцінити сукупну відносну достовірність даних (інтегрованих до геоінформаційної системи результатів проблемно орієнтованої класифікації земних покривів та результатів аналізу атмосферних концентрацій парникових газів за даними супутникового спостереження, результатів геобіофізичного моделювання вуглецевого балансу з одного боку, та статистичних даних, отриманих традиційними методами: лісове і сільське господарство, інвентаризація, економічний моніторинг тощо — з іншого). Для цього можна використати «індекс придатності», запропонований в роботі [2], який є кількісним виразом відповідності нормованих розподілів:

$$S_{nm} = \frac{1}{q} \sqrt{\sum_{j=1}^q (x_{nj}^{norm} - x_{mj}^{norm})^2}, \quad x_j^{norm} = \frac{x_j - x_{jmin}}{x_{jmax} - x_{jmin}}. \quad (17)$$

Тут q — параметри, за якими проводиться опис; n — ділянки території дослідження; m — набори статистичних даних (наприклад, галузеві статистики); x — зафіксовані значення параметра j .

Цей метод дозволяє оцінити взаємну узгодженість розподілів даних, найбільш коректно поєднати різнорідні дані і, таким чином, мінізувати похибки.

Таким чином, застосування загальних моделей вуглецевого балансу, регіоналізованих за допомогою застосування даних ДЗЗ, дозволяє отримати розрахунки перебігу змін екологічних показників, пов'язаних із змінами клімату, і, в свою чергу, розрахувати на цій основі показники безпеки територій.

Оцінка невизначеностей сценаріїв емісій та пов'язаних оцінок екологічних змін. За алгоритмом, описаним у роботі [13], використовуючи дані, наведені в [14—16], можна розрахувати викиди парникових газів від кінцевого спалювання кожного виду палива і, відповідно, використовуючи підхід, наведений в роботах [13, 17, 18], можна оцінити зміни пов'язаних екологічних показників (продуктивності екосистем), зважаючи на прогнозовані зміни кліматичних показників.

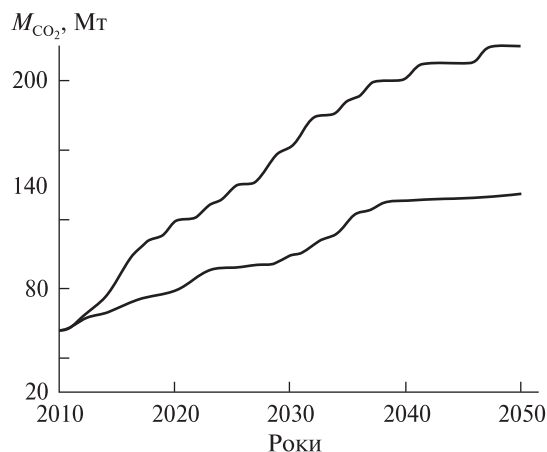


Рис. 4. Розраховані емісії M_{CO_2} викидів для України, уточнені із врахуванням даних супутникових спостережень (найменші та найбільші оцінки)

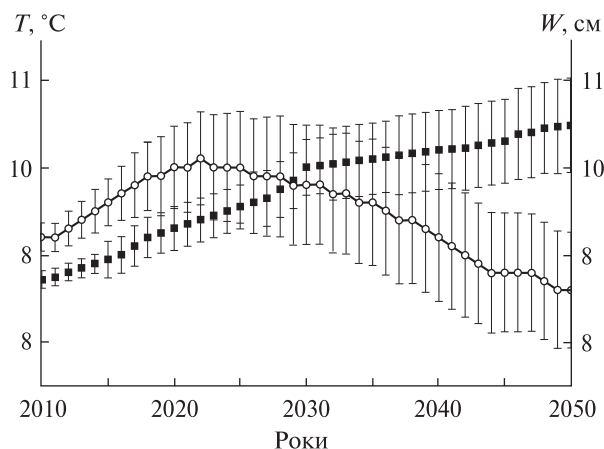


Рис. 5. Розрахункові сценарії змін середньорічних значень температури T (кружечки) та кількості опадів W (квадратики) для території України за умов середніх значень викидів парникових газів на період до 2050 р.

На рис. 4 наведено розраховані за даними [16] відповідно до методики [13] сценарії викидів для України.

Для порівняння слід розглянути глобальні сценарії емісій, які використовуються для розробки глобальних сценаріїв змін клімату. Вони базуються на сценаріях викидів [13], які розраховано на базі аналізу розвитку енергетичної галузі. Як показує аналіз, відносна невизначеність сценаріїв емісій, що використовуються ІРСС для глобальних прогнозів та розробки глобаль-

них кліматичних моделей, складає від 0.32 до 0.86; при цьому показники відносної невизначеності регіонально адаптованих оцінок емісій, що отримані на регіональному масштабі із використанням даних ДЗЗ складає від 0.12 до 0.46. Таким чином, точність прогнозування на регіональному рівні із використанням даних супутникового спостереження є більшою у 1.4—1.7 разів.

Відповідно до цього сценарію можна розрахувати середні значення змін ключових кліматичних показників [19], які надалі будуть використані у моделях екологічних змін [18, 20, 21] (рис. 5).

Також, для порівняння міри невизначеностей розглянемо сценарії, що використовуються для оцінки глобальних змін експертами ІРСС [1]. Аналіз показує, що відносна невизначеність сценаріїв кліматичних змін, розрахованих ІРСС (за показником температури) складає 0.27...0.83; при цьому невизначеність розрахункових сценаріїв змін кліматичних показників для території України за умов середніх розрахованих із використанням даних ДЗЗ значень викидів парникових газів (тобто регіонально адаптованих сценаріїв з використанням даних ДЗЗ) складає 0.12...0.48, тобто в 1.6...1.8 раза менше.

Таким чином, можна стверджувати, що використання регіонально адаптованих за даними ДЗЗ моделей і сценаріїв підвищує точність прогнозування розвитку основних процесів, що призводять до небезпечних змін (регіональних емісій і регіональних змін показників кліматичних показників) в середньому у 1.7 раза.

ВИСНОВКИ

На основі методики контролю концентрацій парникових газів засобами ДЗЗ в роботі запропоновано підхід до визначення емісій.

Проаналізовано традиційні підходи до визначення прямого антропогенного впливу на концентрацію парникових газів та вуглецю в атмосфері. Запропоновано метод та алгоритм для врахування невизначеностей при традиційних оцінках антропогенних емісій.

Також проаналізовано методи визначення атмосферних концентрацій парникових газів засобами супутникового спостереження та контролю

емісій. Проведено розрахунки емісій за даними супутникових спостережень, проведено порівняння з офіційними даними. Виявлено різницю за період 2003—2009 рр. в межах 17—23 %.

Запропоновано алгоритм для оцінки невизначеностей розрахунків емісій за різними методами. Розрахунки за цим алгоритмом показують, що оцінки, які базуються на використанні інтегрованих моделей кругообігу вуглецю та оцінки, отримані із застосуванням даних ДЗЗ є значно точнішими. Показник відносної достовірності оцінки емісій парникових газів засобами ДЗЗ складає в середньому 0.83—0.93, тоді як традиційні методи дають 0.74—0.81.

Було проведено оцінювання невизначеностей сценаріїв емісій та пов'язаних оцінок екологічних змін на регіональному рівні у порівнянні із відомими глобальними моделями. Отримані результати дозволяють стверджувати, що використання регіонально адаптованих за даними ДЗЗ моделей і сценаріїв підвищує точність прогнозування розвитку основних процесів, що призводять до небезпечних змін (зокрема, точність прогнозування регіональних емісій і регіональних змін кліматичних показників) в середньому в 1.7 разів.

1. Бунь Р. А., Густі М. І., Дачук В. С. и др. Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України. — Львів: Укр. академія друкарства, 2004. — 376 с.
2. Buchwitz M., Burrows J. P. Retrieval of CH₄, CO, and CO₂ total column amounts from SCIAMACHY near-infrared nadir spectra: Retrieval algorithm and first results, in: Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere VIII // Proc. SPIE. — 2005. — 5235. — P. 375—388.
3. Buchwitz M., de Beek R., Burrows J. P., et al. Atmospheric methane and carbon dioxide from SCIAMACHY satellite data: Initial comparison with chemistry and transport models // Atmos. Chem. Phys. — 2005. — N 5. — P. 941—962.
4. Buchwitz M., de Beek R., Noël S., et al. Atmospheric carbon gases retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS: version 0.5 CO and CH₄ and impact of calibration improvements on CO₂ retrieval // Atmos. Chem. Phys. — 2006. — N 6. — P. 2727—2751.
5. Chandler W., Rapsun M. Modeling and analysis of greenhouse gases emissions in Ukraine: Selecting and Adapting the ENPEP Program to Ukrainian Conditions and Test Modeling // Report PNNL-13874, Pacific, Northwest National Laboratory (USA) and Agency for Rational Energy Use and Ecology (Ukraine). — Kyiv. — 2001. — 44 p.
6. Cubasch U., Hasselmann K., Höck H., et al. Time-dependent greenhouse warming computations with a coupled ocean-atmosphere model // Climate Dynamics. — 1992. — N 8. — P. 55—69.
7. Global Energy Assessment — Toward a Sustainable Future / GEA Writing Team // Cambridge University Press. — Cambridge. — 2012. — 1888 p.
8. Houghton J. Climate change and sustainable energy // Met Office, Hadley Centre. — London. — 2005. — 208 p.
9. Huntingford C., Cox P. M., Lenton T. M. Contrasting responses of a simple terrestrial ecosystem model to global change // Ecol. Modelling. — 2000. — N 134 (1). — P. 41—58.
10. Mearns L. O., Easterling W., Hays C., Marx D. Comparison of agricultural impacts of climate change calculated from high and low resolution climate change scenarios: part I. The uncertainty due to spatial scale // Climatic Change. — 2001. — 172 p.
11. Nakićenović N., Swart R. Special Report on Emissions Scenarios: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge: University Press, 2000. — 570 p.
12. National greenhouse gas inventory data for the period 1990—2009 // FCCC. — 2011. — 26 p.
13. Parry M. L., Canziani O. F., Palutikof J. P., van der Linden P. J. and Hanson C. E. (eds) Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability — Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge: University Press, 2007. — 987 p.
14. Petit J. R., Jouzel J., Raynaud D., et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // Nature. — 1999. — P. 429—436.
15. Raynaud D., Barnola J. M., Chappellaz J., et al. The ice record of greenhouse gases: a view in the context of future changes // Quatern. Sci. Revs. — 2000. — N 19. — P. 9—17.
16. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reporting Instructions, The Workbook, Reference Manual // IPCC. — 1997. — Vol. 1—3.
17. Schneising O., Buchwitz M., Burrows J. P., et al. Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite. Part 1. Carbon dioxide // Atmos. Chem. Phys. — 2009. — N 8. — P. 3827—3853.
18. Schneising O., Buchwitz M., Burrows J. P., et al. Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite. Part 2: Methane // Atmos. Chem. Phys. — 2009. — N 9. — P. 443—465.
19. Shvidenko A., Schepaschenko D., McCallum I., Nilsson S. Can the uncertainty of full carbon accounting of forest

- ecosystems be made acceptable to policymakers? // *Climatic Change*. — 2010. — N 103. — P. 137—157.
20. *Viner D., Hulme M., Raper S. C. B.* Climate change scenarios for the assessments of the climate change on regional ecosystems // *J. Therm. Biol.* — 1995. — **20**. — P. 175—190.
21. *White T., Jonas M., Nahorski Z., Nilsson S.* Greenhouse gas inventories: Dealing with uncertainty. — Heidelberg: Springer Science+Business Media, 2011. — 343 p.

Стаття надійшла до редакції 27.11.13

*В. І. Лялько, Ю. В. Костюченко, І. Г. Артеменко,
Л. М. Попадюк, Р. М. Федина, А. С. Волошаненко*

АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Описывается роль данных и технологий ДЗЗ в методиках оценки неопределенностей баланса парниковых газов и углерода в задачах оценки климатических изменений на региональном уровне. Показано, что использование данных спутникового наблюдения для оценки неопре-

деленностей, свойственных экологическим, социально-экологическим и социально-экономическим процессам, которые участвуют в формировании опасностей, поможет в оптимизации системного управления экологическими, социальными и экономическими рисками как на государственном, так и на региональном уровне.

*V. I. Lyalko, Yu. V. Kostyuchenko, I. G. Artemenko,
L. M. Popadjuk, R. M. Fedyna, A. S. Voloshanenko*

AN UNCERTAINTY ANALYSIS IN THE CLIMATIC CHANGE ESTIMATION PROBLEM ON REGIONAL LEVEL WITH THE USE OF SATELLITE OBSERVATIONS OF ATMOSPHERIC CONCENTRATION OF GREENHOUSE GASES

We consider the role of data and remote sensing methods for the estimation of uncertainty balance of greenhouse gases and carbon emissions in problems of the climate change estimation on the regional level. It is shown that the use of remote sensing data in the uncertainty estimation procedure (in the case of ecological, socio-ecological and socio-economical processes) allows one to optimize the system management of ecological, social and economical risks both on the state and regional level.

Ю. В. Костюченко, Ю. Г. Білоус, Д. М. Соловійов, І. М. Копачевський

Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ

ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ СУПУТНИКОВОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ В КОМПЛЕКСІ МЕТОДІВ ОЦІНКИ РИЗИКІВ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ І КЛІМАТИЧНИХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ НА УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЯХ

Розглядаються окремі аспекти створення теоретико-методичної бази використання даних супутникового спостереження снігового покриву в задачі оцінки метеорологічних, кліматичних і гідролого-гідрогеологічних ризиків у міських агломераціях. Запропоновано основи методу визначення характеристик снігового покриву на основі комплексного використання супутникової інформації (зокрема продуктів MOD10A1 та SWE, нормалізованого індексу снігового покриву NDSI, локальних метеорологічних спостережень, наземних калібрувальних і завіркових вимірювань). Запропоновано метод інтеграції даних з різних джерел на основі модифікованого методу трансформації ансамблів фільтрацією Кальмана та методу ядерного аналізу головних компонентів розподілів даних. Показано, що запропонований підхід має достатньо високу відносну достовірність порівняно з іншими підходами (окремо використаних продуктів MOD10A1 та SWE) при застосуванні для аналізу міських агломерацій. Для тестування підходу розглянуто екстремальні снігопади 21–23 березня 2013 р. у м. Києві. Запропоновано кількісні оцінки показників ризиків та параметрів вразливості міської інфраструктури відносно негативних впливів надзвичайної ситуації.

ВСТУП

Вивчення ризиків, пов'язаних із надзвичайними ситуаціями (НС) гідрологічного, метеорологічного і кліматичного походження, хоча і є досить відомою задачею, але у випадках аналізу вразливості великих урбанізованих територій, зокрема міських агломерацій, виникають певні методологічні особливості, які необхідно враховувати для успішного розв'язання задач безпеки.

При цьому очевидно, що надзвичайні ситуації, зона розповсюдження яких охоплює місця масового розселення людей та скупчення інфраструктури і промислових об'єктів, зокрема великі міські агломерації, характеризуються найвищими показниками ризиків.

22–24 березня 2013 р. на м. Київ випала рекордна (більше 600 мм) кількість опадів у вигляді

снігу. Середня глибина снігового покриву на території міста протягом другої половини 22 березня кінця доби 23 березня склала близько 50 см, на паркових ділянках — близько 35–45 см, на території забудови 35–55 см, спостерігалися численні замети висотою 65–85 см, під час прибирання нагромаджувалися снігові навали середньою висотою до 1.2–1.4 м, які створювали значні перешкоди пересуванню транспорту та пішоходів. Уже ввечері 22 березня це призвело до зупинок руху наземного громадського транспорту, локального знеструмлення, помітних перебоїв із забезпеченням міських магазинів продовольством, зокрема продукцією хлібозаводів, а 23 березня спричинило фактичний транспортний колапс у місті.

Лише 23 березня на міських шляхах було заблоковано більше 4500 легкових автомобілів (з них 1850 було звільнено за допомогою спецзасобів МНС), близько 1000 вантажівок (506), 149 автобусів та 35 тролейбусів, які звільнено засоба-

© Ю. В. КОСТЮЧЕНКО, Ю. Г. БІЛОУС, Д. М. СОЛОВІЙОВ,
І. М. КОПАЧЕВСЬКИЙ, 2013

ми МНС. Таким чином, лише за перші 20 годин лиха його прямого негативного впливу зазнали, за різними оцінками, від 10 до 14.5 тисяч людей.

Такий розвиток подій призвів до зниження якості харчування населення, підвищення кількості переохолоджень, травмувань, звернень до медичних закладів з симптомами застудних та загостреними хронічних захворювань, спричинених синоптичними стресами, неможливості вивезення і загрозливого накопичення у дворах побутового сміття, неконтрольованого використання реагентів для танення снігу, інтегральний вплив яких на міські екосистеми є невизначеним, і багато іншого, тобто до очевидної ескалації соціально-екологічних загроз.

За комплексом об'єктивних кількісних показників є можливість оцінити як рівень ризиків поточної НС, так і ефективність заходів з управління ризиками на регіональному рівні, тобто рівень ефективності регіональних стратегій управління ризиками НС, готовності регіональних систем управління НС до подолання наслідків НС, надання вчасної допомоги постраждалим тощо.

ЗАГАЛЬНА МЕТОДОЛОГІЯ

Ризики визначаються показниками навантаження на інженерні мережі, системи життєзабезпечення та транспортну інфраструктуру міста, які створюють надлишкові опади. В найпростішому випадку можна порахувати масу снігу і визначити ресурси, потрібні на його прибирання, оцінити масу води, яка може бути утворена при його таненні тощо. Загальна маса снігу є динамічною величиною, що залежить від щільності снігового покриву. Динамічну щільність снігового покриву протягом інтервалу спостережень можна визначити як

$$\rho_{snow} = \frac{\sum_i (\rho_i \Delta z_i + \rho_0 \Delta z_0)}{\Delta z_{snow}},$$

де ρ_i , Δz_i — щільність та потужність снігового покриву, зафіксовані за період спостереження i , ρ_0 , Δz_0 — щільність та потужність снігового покриву на початку періоду спостережень. При цьому динаміка щільності визначається кількома метеорологічними показниками:

$$\rho_i = \rho_i^{\min} + \kappa \frac{1 - Q_p}{f_i^{\max}}.$$

Тут $\rho_i^{\min}$ — початковий рівень опадів, κ — емпіричний коефіцієнт (зазвичай приймається рівним 181), Q_p — тепловий функціонал опадів, що залежить від температури, атмосферного тиску і вологості повітря, $f_i^{\max}$ — максимальний вміст води в опадах (при прогнозах розрахунках приймається $f_i^{\max} = 0.5$).

Сукупність емпіричних коефіцієнтів визначається за комплексом наземних завіркових робіт, зміна локальних метеорологічних показників визначається за даними метеорологічних вимірювань, а розподіли просторових показників можуть бути визначеними за даними ДЗЗ.

У такому випадку маса снігу M_{snow}^{ij} за інтервал i на певній площі S_j буде визначатися простою формою:

$$M_{snow}^{ij} = \sum_{ij} z_{ij} \rho_{ij} S_j.$$

Водний еквівалент накопиченого снігу W_{ij} також має оцінюватися з урахуванням поточних і прогнозованих метеорологічних умов, а також з урахуванням просторової неоднорідності розподілу снігового покриву. У найпростішому випадку його можна представити як:

$$W_{ij} = \frac{\rho_w H_s}{c_s} \sum_{ij} \frac{d_{ij}^{cc}}{(0^\circ\text{C} - T_{ij}^s)},$$

де ρ_w — густина води, T_{ij}^s — температура снігового покриву, H_s — латентна теплота снігового покриву (приймається 80 кал/грам), c_s — теплопровідність снігу (в середньому приймається 0.5 кал/грам град), d_{ij}^{cc} — потужність твердої складової покриву.

Для розрахунку водозбору з усієї території можна використати інтегральну форму рівняння для водного еквіваленту. Відповідно до наведених рівнянь, а також по аналогії з [6], можна в загальному випадку для басейнів записати

$$W_{tot} = \left[\frac{1 - A_0}{A_i - A_0} (W_i - W_0) \right] + W_0.$$

У цьому рівнянні W_{tot} — загальний вміст вологи у сніговому покриві (водний еквівалент снігового покриву), W_0 — водний еквівалент снігового по-

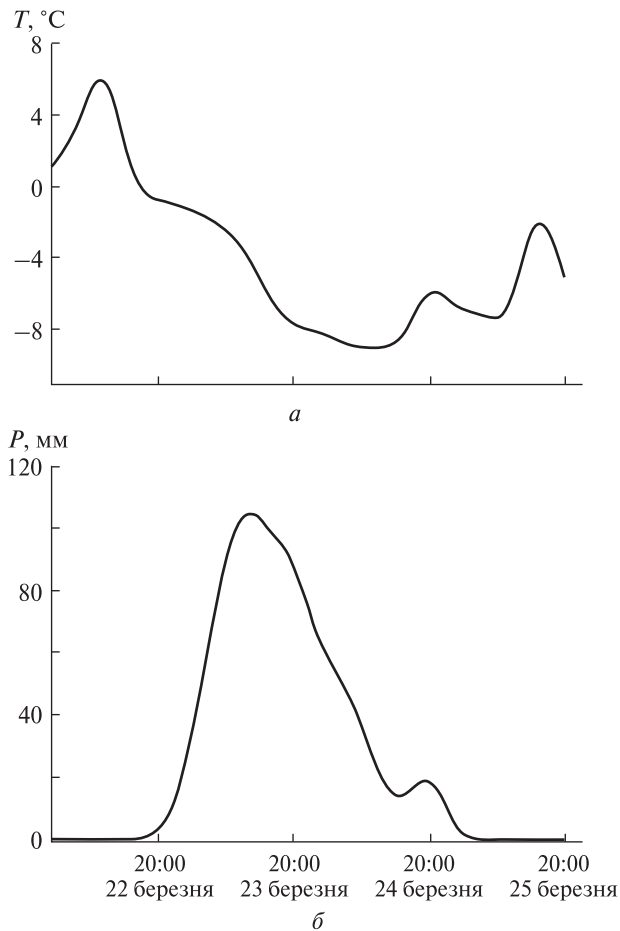


Рис. 1. Розподіл метеорологічних показників протягом 21—25 березня 2013 р.: a — варіації температур T повітря, b — варіації кількості опадів P

криву на початку процесу танення, W_i — водний еквівалент снігового покриву у момент спостереження i , A_0 — площа снігового покриву на початку сніготанення, A_i — поточна площа снігового покриву (у момент спостереження i). Таким чином, ключовими змінними будуть площа снігового покриву та характеристики, що визначають водний еквівалент снігу у момент спостереження.

У викладеному підході використано чотирикомпонентну модель снігового покриву. В цій моделі сніговий покрив представлено як сукупність фракцій льоду, води, повітря та водяної пари. Ця модель дозволяє отримати точніші прогнози в динамічних просторово-часових сценаріях, на відміну від двоконпонентних (лід та

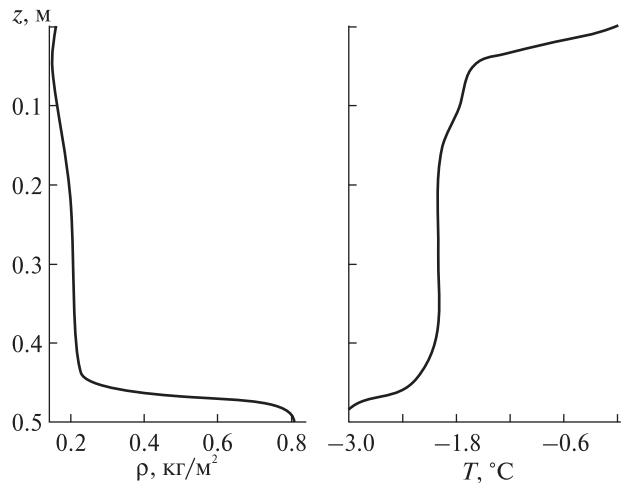


Рис. 2. Усереднені профілі щільності (a) і температури (b) снігового покриву станом на 14:00 25 березня 2013 р. за даними наземних калібрувальних вимірювань

повітря) та трикомпонентних (лід, вода, повітря) моделей. Дана модель може бути використана при аналізі даних супутникових спостережень, але при цьому вона потребує калібрування за наземними вимірюваннями.

НАЗЕМНЕ КАЛІБРУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ ДАНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Використана модель снігового покриву, як було зазначено, потребує калібрування за наземними вимірюваннями [2]. Протягом 23—26 березня було проведено необхідні вимірювання у межах м. Києва на 14 точках. Було отримано дані щодо потужності снігового покриву, вертикальних розподілів його щільності, температури, грануляції, виміряна шорсткість поверхні та показники відбиття (рис. 1 і 2).

Таким чином було проведено калібрування використаних моделей і завірка супутникових спостережень.

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ СУПУТНИКОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Проблема аналізу снігового покриву в межах урбанізованих територій є набагато складнішою, порівняно із загальними оцінками параметрів снігового покриву у межах природних і сільськогосподарських ландшафтів. Зазвичай постають дві ключові проблеми: оперативність і розрізнен-

ність. Інші вимоги до оперативності отримання інформації про динаміку параметрів розподілу снігового покриву постають із постановки задачі про безпеку міських агломерацій щодо загроз гідрометеорологічного походження. Якщо у стандартних випадках можна обмежитися добовими показниками розподілу снігового покриву, то у випадках аналізу снігової обстановки в місті необхідно забезпечити надходження інформації з інтервалом в 5—8 годин. Метеорологічні супутники забезпечують таку частоту зйомок, але не дають сукупності параметрів снігового покриву. Крім того, така частота передбачає вимірювання параметрів снігового покриву безпосередньо під час накопичування снігу, що практично неможливо з використанням сенсорів оптичного діапазону в умовах щільної хмарності.

Іншою проблемою є недостатня розрізняльна здатність сенсорів, що зазвичай використовуються для аналізу снігового покриву, як просторова, так і спектральна. Просторова розрізненність в кілька сотень метрів є цілком придатною для аналізу снігу в природних умовах і для цілей сільського господарства, але у міських агломераціях, де характерні масштаби складають 50—150 м, є недостатньою. Спектральна розрізненність має забезпечити робастність алгоритму розпізнавання, тобто можливість визначення вкритих снігом ділянок в умовах, коли внаслідок активної антропогенної діяльності (наприклад, робіт із розчищення снігових заметів) локальні показники відбиття снігу суттєво змінюються.

Наразі жоден з наявних сенсорів не може забезпечити вирішення зазначених проблем на адекватному рівні. У такому випадку рішення полягає в залученні для вирішення задачі даних з багатьох джерел (інтеркаліброваних і коректно взаємоузгоджених по просторових, часових і енергетичних характеристиках), широкому використанні наземних калібрувальних даних і поєднанні результатів спостережень із результатами моделювання процесів, що генерують небезпеку, тобто процесів енергомасообміну у природних системах (в нашому випадку — процесів накопичення і танення снігу).

Основні задачі оцінки снігового покриву дистанційними засобами традиційно лежать в галузях

метеорології і кліматології, гідрології (гідрологічної безпеки територій) і сільського господарства. Таке коло завдань визначає набори сенсорів і алгоритмів, що використовуються для аналізу снігового покриву. Для більшості сучасних застосувань найбільш вдалим є продукти MODIS [14], які дозволяють отримувати параметри снігового покриву щоденно, з 5-денним усередненням, щомісячно, з сіткою 500 м [15] (наприклад продукт MOD10A1), а також визначати водний еквівалент снігового покриву за даними AMSR-E з розрізненням 25 км з 5-денним усередненням [25] (продукт SWE). Ці дані є добре верифіковані, сенсори коректно відкалібровані, а алгоритми дозволяють з високою достовірністю визначати розподіли параметрів снігового покриву. Достовірність обмежується лише просторово-часовими характеристиками прогнозів, які можуть не збігатися з характеристиками розподілів даних.

Перелічені алгоритми є наразі найбільш вживаними в задачах аналізу снігового покриву. Але при цьому вони характеризуються просторовими характеристиками, які значно ускладнюють їхнє використання для аналізу урбанізованих територій. Крім того, алгоритм, за яким розраховуються продукти MOD10A1 та SWE, не є робастним в умовах суттєвих змін радіаційних характеристик снігового покриву, які характерні для міських агломерацій внаслідок антропогенної діяльності. Тому нам потрібні додаткові джерела інформації, які, по-перше, мають достатнє геометричне розрізнення (порівняне із характерними просторовими масштабами міських територій) і, по-друге, дають можливість керувати параметрами розпізнавання.

Зважаючи на відомі тенденції зміни радіаційних характеристик снігового покриву на різних стадіях сніготанення [10, 22] і визначені за комплексом наземних вимірювань характеристики різних типів снігового покриву, по аналогії із [28] можна запропонувати нормалізований індекс снігового покриву у формі:

$$NDSI = \frac{R_{[0.55-0.65]} - R_{[0.75-0.85]}}{R_{[0.55-0.65]} + R_{[0.75-0.85]}} \approx \frac{R_{VIS} - R_{NIR}}{R_{VIS} + R_{NIR}},$$

де R — коефіцієнти відбиття у визначеній частині спектру.

Виходячи із аналізу розподілів відбиття снігового покриву, отриманих із серій спостережень, моделей, наземних вимірювань, а також із даних наведених іншими дослідниками [28], можна визначити граничний показник індексу *NDSI*, який відповідає наявності снігового покриву. Для відкритих ділянок він складає 0.32—0.36, а для ділянок вкритих щільною рослинністю 0.28—0.31. Для ділянок, які характеризуються наявністю щільної забудови, цей показник коливатиметься у межах 0.18—0.33, в залежності від щільності забудови, потужності антропогенного впливу (ступеню забрудненості снігового покриву, ущільненості, переробленості тощо) та типу сенсора. Тоді очевидним є правило: якщо піксел x_{ij} характеризується значенням індексу *NDSI*, що перевищує граничне, ми з максимальною достовірністю відносимо його до області A_p , яка вкрита снігом. Співвідношення значення *NDSI* та потужності снігового покриву, необхідне для визначення водного еквіваленту, можна визначити із калібрувальних вимірювань на локальному рівні.

Таким чином, ми вводимо оптичний індекс для визначення проблемно орієнтованих параметрів снігового покриву (що визначають розподіл змінних відповідних моделей енергомасообміну в задачах оцінки гідрологічної безпеки території) до комплексу індикаторів мікрохвильового та інфрачервоного діапазону, що використовуються в задачах інтегральної оцінки снігового покриву методами ДЗЗ. Звичайно, додавання цього індексу не вирішує проблеми отримання інформації протягом накопичення опадів, але використання цього індексу дозволяє залучати дані будь-якої просторової розрізненності і, таким чином, сприяє вирішенню проблеми підвищення спектральної і просторової розрізненності методів аналізу снігового покриву.

ПРИНЦИПИ ІНТЕГРАЦІЇ ДАНИХ

Надалі постає задача інтеграції даних спостережень з різних джерел, результатів моделювання, метеорологічних спостережень і наземних вимірювань в єдину гармонізовану сукупність даних, придатних для аналізу ризиків. Ця задача вирішується в рамках підходу до гармонізації розподілів даних.

За результатами первинної обробки даних спостережень і вимірювань, аналізу даних моделей ми отримуємо сукупність нормалізованих розподілів $\xi_t = \mathbf{A}_t f(x_t) + v_t$, де t — момент часу (що визначається як крок моделювання для множини модельних даних і як міра множини даних для розподілів даних метеорологічних спостережень). Надалі пропонується спільно аналізувати дані моделювання, спостережень та вимірювань в рамках модифікованого методу трансформації ансамблів фільтрацією Кальмана (Ensemble Transform Kalman Filter — ETKF) [27].

Метод фільтрації Кальмана для визначення параметрів небезпеки детально відпрацьований та широко використовується в Інституті космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України. Зокрема, в роботах [3, 4, 17] доведено ефективність цього підходу до визначення параметрів гідрологічної та метеорологічної небезпеки.

В рамках цього підходу будемо вважати, що вектори істинного стану системи $\mathbf{x}$ в момент часу k визначаються загальним законом

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{F}_t \mathbf{x}_{t-1} + \mathbf{B}_t u_t + w_t,$$

де $\mathbf{F}_t$ — матриця еволюції системи, тобто моделюваних впливів на вектор $\mathbf{x}_{t-1}$ у момент $t - 1$; $\mathbf{B}_t$ — матриця вимірних впливів u_t на вектор $\mathbf{x}$; w_t — випадковий процес з коваріаційною матрицею $\mathbf{Q}_t$. Таким чином ми вводимо опис модельних розподілів F_x та даних спостережень B_t .

Визначимо екстраполяційне значення вектора істинного стану системи за оцінкою вектора стану на попередньому кроці:

$$\hat{\mathbf{x}}_{t|t-1} = \mathbf{F}_t \hat{\mathbf{x}}_{t-1|t-1} + \mathbf{B}_t u_{t-1}.$$

Для цього екстраполяційного значення вектора істинного стану можна визначити загальний вигляд коваріаційної матриці:

$$\mathbf{P}_{t|t-1} = \mathbf{F}_t \mathbf{P}_{t-1|t-1} \mathbf{F}_t^T + \mathbf{Q}_{t-1}.$$

Різниця між оцінюваним (екстраполяційним) значенням вектора істинного стану системи та значенням, отриманим на відповідному кроці моделювання, може бути оцінена як

$$\Delta \hat{\mathbf{x}}_t = \xi_t - \mathbf{A}_t \hat{\mathbf{x}}_{t|t-1},$$

а коваріаційна матриця відхилення — як

$$\mathbf{S}_t = \mathbf{A}_t \mathbf{P}_{t|t-1} \mathbf{A}_t^T + \mathbf{R}_t.$$

Далі на основі коваріаційних матриць екстраполяції вектора стану і отриманих вимірів введемо матрицю оптимальних коефіцієнтів кальманівського підсилення:

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_{t|t-1} \mathbf{A}_t^T \mathbf{S}_t^{-1},$$

використовуючи яку скоригуємо екстраполяційні значення вектора істинного стану системи:

$$\hat{\mathbf{x}}_{t|t} = \hat{\mathbf{x}}_{t|t-1} + \mathbf{K}_t \Delta \hat{\mathbf{x}}_t.$$

При цьому вводимо геореферований фільтр на розподіл вектору стану $\mathbf{x}_{ij}$, який залежатиме від географічно прив'язаних координат i, j та не залежатиме в загальному випадку від моменту часу t :

$$(\mathbf{x}_{ij})_t = (\mathbf{x}_{ij})_t^\alpha = (\mathbf{x}_{ij})_t \alpha_{ij}.$$

Тут коефіцієнти α обираються відповідно до введеного алгоритму КРСА [18] за правилом оцінки оптимального балансу функції взаємної валідації:

$$\mathbf{C}^F \mathbf{v} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \Phi(\mathbf{x}_j) \Phi(\mathbf{x}_j)^T \cdot \sum_{i=1}^N \alpha_i \Phi(\mathbf{x}_i),$$

де нелінійна функція розподілу вхідних даних Φ задовольняє умови [23]:

$$\sum_{k=1}^N \Phi(\mathbf{x}_k) = 0,$$

а $\tilde{\mathbf{k}}_t$ — усереднені значення ядерель-матриці $\mathbf{K} \in R^N$ (де $[\mathbf{K}]_{ij} = [k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)]$). Ця матриця складається із ядерель-векторів, що визначаються як $\mathbf{k}_i \in R^N$; при цьому $[\mathbf{k}_i]_j = [k_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)]$. Ядерель-матриця розраховується відповідно до модифікованого правила [7] $\mathbf{k}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_i) = \langle \rho_{j,i}^{x_j} (1 - \rho_{j,i})^{x_j} \rangle$, де ρ — емпіричні параметри, які обираються відповідно до моделі класифікації досліджуваних явищ [26].

Якщо застосувати цей фільтр і пам'ятати про необхідність взаємоузгодження множин даних, можна запропонувати вигляд матриці $\mathbf{P}^a$ для аналізу фактичних похибок, виходячи із вигляду матриці похибок екстрапольованого значення вектору стану системи $\mathbf{P}^f$ та матриці коваріації даних спостережень $\mathbf{R}$:

$$\mathbf{P}^a = \mathbf{P}^f - \mathbf{P}^f \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{P}^f \mathbf{A}^T + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{A} \mathbf{P}^f.$$

Таким чином ми отримуємо засіб для оптимізації розрахунку матриці оптимальних коефіцієнтів кальманівського підсилення і корекції екстраполяційних значень вектора істинного стану системи за сукупними даними моделювання і спостережень.

Після закінчення процедури інтеграції даних ми перераховуємо необхідні параметри за алгоритмом

$$\mathbf{x}_t^{(ij)} = \sum_{m=1}^n w_{ij}(\hat{\mathbf{x}}_t^m) \mathbf{x}_t^m,$$

де $w_{ij}(\tilde{\mathbf{x}}_t^m)$ — ваговий коефіцієнт, який визначається через пошук мінімуму [9]:

$$\min \left\{ \sum_{m=1}^n \sum_{\mathbf{x}_t^m \in R^m} w_{ij}(\tilde{\mathbf{x}}_t^m) \left(1 - \frac{\mathbf{x}_t^m}{\hat{\mathbf{x}}_t^m} \right)^2 \right\}.$$

У цьому рівнянні m — кількість проведених експериментів, n — кількість джерел даних, $\mathbf{x}_t^m$ — розподіл результатів спостережень, R^m — множина (загальна сукупність) даних, $\hat{\mathbf{x}}_t^m$ — кориговані екстраполяційні значення вектора істинного стану системи за сукупними даними моделювання і спостережень.

Таким чином ми отримуємо регулярний просторовий розподіл вимірюваних характеристик по локальній території дослідження як за даними дистанційних спостережень та результатами модельних розрахунків, так і з урахуванням регіональних метеорологічних та наземних калібрувальних вимірювань по сітці, яка відповідає розподілу даних вимірювань, тобто має значно краще розрізнення, ніж первинна сітка.

ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ РИЗИКУ ЗА КОМПЛЕКСОМ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Показники просторового розподілу маси накопиченого у межах міської території снігу і льоду, їхнього водного еквіваленту, показники навантаження на транспортну інфраструктуру та їхня часова динаміка можуть розглядатися як міри ризику відповідного типу НС, які можуть бути кількісно оцінені за допомогою комплексу засобів ДЗЗ.

В рамках запропонованого підходу навантаження на інфраструктуру, наприклад на транспортну інфраструктуру L_i^{tran} , можна визначити як відношення маси снігу M_{snow}^{ij} зафіксованої на певній площі протягом окремого інтервалу часу до щільності транспортної мережі на даній площі (км/км²) R_j , за простим правилом:

$$L_i^{tran} = \frac{M_{ij}}{R_j}.$$

нення відповідних метеорологічних умов під час танення. Перші проблеми в системах міського водовідведення було зафіксовано вже 28 березня, тобто на п'яту добу після НС та на другий день з початку активного денного танення снігової маси, яка не була вивезена за межі міста.

Наведені дані загалом збігаються із даними щоденних спостережень сенсора AMSR-E/Aqua (Daily L3 Global Snow Water Equivalent) [25], які дають показник на 24—25 березня на рівні 42.5 млн тонн, а також з усередненими значеннями 5-денних розподілів AMSR-E/Aqua (5-Day L3 Global Snow Water Equivalent) [25], які показують 36.5 млн тонн (з урахуванням стоку, танення і випаровування) на території, що аналізується. Тобто, відхилення середнього значення нашої оцінки складає 4—6 % від щоденних вимірювань AMSR-E та 18—20 % від середніх 5-денних значень. Це дещо відрізняється від оцінок середніх похибок та розбіжностей при використанні нормалізованого індексу снігового покриву *NDSI* та продуктів MOD10A1 та SWE, наведених в роботі [29]. Згідно з даними [29] середня розбіжність оцінок для території Китаю складає від 2.5 до 15 % в залежності від усереднення. Беручи до уваги те, що ці дані стосуються переважно для природних ландшафтів та сільськогосподарських угідь, а наші оцінки робилися для міських агломерацій, розбіжність у півтора рази (2.5 % і 4—6 %) можна вважати зрозумілою. При багатоденному усередненні розбіжності, зумовлені відмінностями земних покривів, редукуються, але загальна розбіжність відносно спостережень низького розрізнення залишається значною. Таким чином, метод визначення характеристик снігового покриву на основі комплексного використання супутникової інформації, зокрема продуктів MOD10A1 та SWE, нормалізованого індексу снігового покриву *NDSI*, локальних метеорологічних спостережень, наземних калібрувальних і завіркових вимірювань має достатньо високу відносну достовірність порівняно з іншими методами, алгоритмами та продуктами (окремо використаними продуктами MOD10A1 та SWE) при застосуванні для аналізу міських агломерацій.

Окремо слід розглянути методологію оцінки загальної міри ризику досліджуваної події. Для

оцінки ймовірності настання надзвичайної ситуації такого роду розглянемо показники частоти подій в залежності не лише від зафіксованої повторюваності, але і від просторово-часових неоднорідностей процесів, які породжують загрози, а також від рівнів оцінюваних небезпечних впливів. Звичайний підхід передбачає оцінку ймовірності події відповідно до середньої частоти її настання μ , визначеною за сукупністю всіх доступних спостережень i :

$$\mu = \sum_i^n \frac{\lambda_i}{n} \rightarrow p.$$

У такому випадку середня оцінювана ймовірність такої події складе від 0.007 до 0.01 (тобто повторюваність події знаходиться у межах інтервалу один раз на 100—140 років). Ми пропонуємо використати складніший підхід, що базується на модифікованому рівнянні Омори [21], який дозволяє враховувати складні взаємозалежності в просторово-часових розподілах досліджуваних явищ:

$$\lambda(t, x, y) = \mu + \sum_{j,d} \left(\frac{F_j^0(x, y)}{(t - t_j)^p} + \frac{(x - x_j; y - y_j) \cdot S_j(x - x_j; y - y_j)}{\exp(\alpha L_j)} + d \right)^q \rightarrow p.$$

Тут p, q, α — емпіричні коефіцієнти; L — впливи від події (наприклад, екстремальні рівні опадів у будь-якій формі, спричинені непередбачуваними, нехарактерними для даного сезону метеорологічними умовами, що викликають пікові навантаження на інфраструктуру) в точці, що належить елементарній площі S_j з координатами x, y в момент часу t ; $F_j^0(x, y)$ — стаціонарний розподіл стресових навантажень за багаторічними спостереженнями; d — фактор масштабування, що визначається для процесів, що генерують небезпеку (наприклад для циклонів). При використанні цього підходу оцінювана ймовірність події складає від 0.039 до 0.052 (тобто повторюваність події знаходиться в межах інтервалу один раз на 19—25 років). При цьому слід додатково зауважити наявність кліматичних змін, які тут не було враховано.

Доцільність врахування впливу кліматичних змін підтверджує інший приклад надзвичай-

ної ситуації, яку можна було спостерігати цього року у м. Києві. У період 18—23 січня на території міста спостерігалось екстремальне зледеніння дорожнього покриття, що призвело до значних ризиків травмувань та ушкоджень городян. Тоді кількість травмованих внаслідок ожеледиці склала близько 2300 людей [5]. Тільки за один день 22 січня до травмпунктів звернулося 579 людей, включаючи 35 дітей, 60 постраждалих потребували термінової госпіталізації. Узагальнений розподіл ризиків як міри відносної кількості постраждалих, що зазнали ушкоджень внаслідок екстремального зледеніння дорожнього покриття, наведено на рис. 5.

Практика боротьби з цим стихійним явищем і подолання наслідків негоди показала недостатню готовність комунальних служб до такого роду НС, а державні служби з надзвичайних ситуацій взагалі відмовилися брати участь в ліквідаційних роботах, незважаючи на велику кількість постраждалих. Спираючись на світовий досвід [8, 19, 24], маємо стверджувати, що перевищення середнього рівня постраждалих як міри небезпечного впливу надзвичайної ситуації в 5.4 рази, а також загальна кількість 2300 постраждалих за п'ять діб має вважатися достатнім індикатором надзвичайної ситуації і, таким чином, достатнім мотивом залучення відповідних агенцій до участі в заходах зменшення збитків.

Розрахована за традиційними методами повторюваність ожеледиці з такими впливами (тобто з такою кількістю постраждалих) складає приблизно 15—18 років. Застосування запропонованого підходу визначає ймовірність такої події у межах від 0.28 до 0.52 (повторюваність події знаходиться у межах інтервалу один раз на 2—4 роки). Спостереження протягом одного сезону двох надзвичайно рідкісних подій призводить до висновку, що регіональні ризики НС та показники вразливості населення та локальної інфраструктури по відношенню до відповідних загроз є суттєво недооціненими.

Розглянуті приклади яскраво підкреслюють, що використання методів оцінювання ймовірностей настання екстремальних подій і відповідних методів аналізу ризиків, що базуються тільки на розподілах середніх значень, використанні

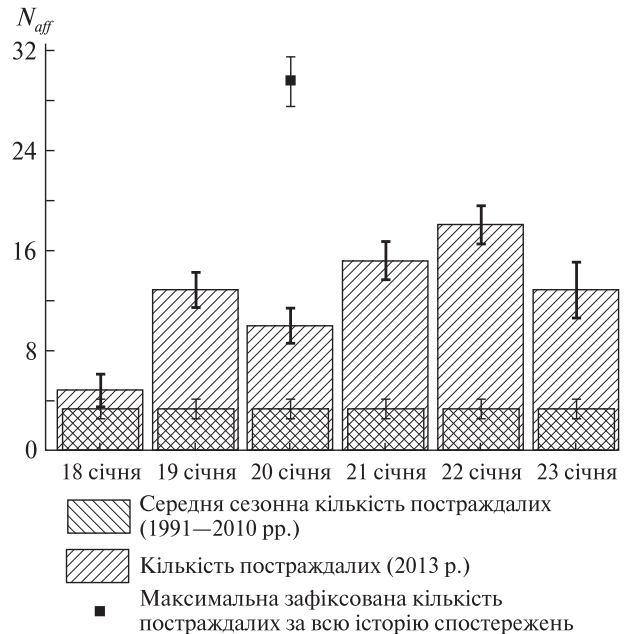


Рис. 5. Розподіл кількості постраждалих від ожеледиці в м. Києві 19—23 січня 2013 р., віднесена на 100 000 населення (N_{aff}) у порівнянні із середнім багаторічним сезонним рівнем та зазначенням абсолютного максимуму.

простих методів аналізу (таких як метод найменших квадратів, аналіз коваріаційних матриць тощо), як правило, не приводить до розробки сталих робастних стратегій управління ризиками надзвичайних ситуацій [11].

ВИСНОВКИ

Особливості міських агломерацій зумовлюють необхідність розробки алгоритмів коректного злиття даних спостережень з різних джерел, модельних розрахунків, наземних вимірювань та метеорологічних спостережень з метою отримання оперативних достовірних ситуативних і прогностичних розрахунків показників ризиків з відповідними показниками просторової і часової розрізненості.

Дані ДЗЗ в задачах контролю та моніторингу НС у міських агломераціях можуть і повинні використовувати для підвищення ефективності управління безпекою. Дані ДЗЗ, отримані з різних джерел в рамках відомих методик, оброблені із застосуванням проблемно-орієнтованих алгоритмів та у поєднанні із даними метеороло-

гічних спостережень, моделювання енергома-сообміну в наземних системах та з наземними калібрувальними вимірюваннями, мають високу достовірність. Ця достовірність в задачах оцінки відповідних ризиків, наприклад вразливості міської інфраструктури, оцінки навантажень на штучні ландшафти, оцінки вологозапасів тощо, може перевищувати достовірність традиційних підходів [1].

Ризики НС (зокрема гідрологічних, метеорологічних і кліматичних надзвичайних ситуацій) та показники вразливості міської інфраструктури по відношенню до відповідних загроз є наразі суттєво недооціненими. Це призводить до відсутності адекватних та/або недосконалості наявних стратегій зменшення впливів НС такого типу як на національному так і регіональному рівнях. Невідповідність підготовчих заходів, мір з управління ризиками та заходів з подолання наслідків НС реальним рівням існуючих комплексних загроз може призвести до виникнення «мережових» катастроф [16], які зумовлені системним характером ризиків [12].

Розглянуті приклади НС показують, що спроби рішення, що приймаються, виходячи із простих балансових припущень, не є ефективними в умовах, коли і вхідні дані, і очікувані результати розподіляються за законами, які можуть суттєво відрізнятися від нормальних (що ми зазвичай і спостерігаємо в екстремальних випадках). З точки зору розробки найбільш ефективних стратегій управління ризиками слід зазначити, що лише інтегроване моделювання всієї сукупності детермінованих і стохастичних взаємозв'язків явищ і процесів, що генерують небезпеку, а також спільний розгляд стратегічних «*ex-ante*» рішень (наприклад, різноманітних інженерних, структурних заходів) та адаптивних «*ex-post*» рішень (наприклад, страхові та фінансові механізми) дозволяє отримати гнучкі робастні рішення в галузі безпеки [13].

1. *Изменения земных систем в Восточной Европе* / Отв. ред В. И. Лялько. — Киев, 2010. — 582 с.
2. Костюченко Ю. В. Завіркові дані для вирішення задач прогнозування паводкової небезпеки // Багато-спектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред. В. І. Лялька,

- М. О. Попова. — Київ: Наук. думка, 2006. — С. 282—284.
3. Кравченко А. Н. Каскад гидрометеорологических моделей для прогнозирования паводков // Кибернетика и вычислительная техника. — 2007. — № 2. — С. 35—42.
4. Кравченко А. Н., Куссиль Н. Н., Луян Е. А. та ін. Мониторинг водных ресурсов на основе интеграции разнородных данных и высокопроизводительных вычислений // Кибернетика и системный анализ. — 2008. — № 6. — С. 117—126.
5. Петравчук Л. В., Марухно Т. В., Першина Н. Г. та ін. Основні показники здоров'я та медичної допомоги населенню м. Києва. — Київ: Міський науковий інформаційно-аналітичний центр медичної статистики, Департамент охорони здоров'я Київської міської державної адміністрації. 2013. — 170 с.
6. Anderson E. A. A point energy and mass balance model of a snow cover // NOAA Technical Report NWS. — 1976. — 19. — 150 p.
7. Christianini N., Shawe-Taylor J. An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods. — Cambridge: Univ. Press, 2000. — 212 p.
8. *Comprehensive Preparedness guide: Developing and maintaining emergency operations plans.* — U.S. FEMA, 2011. — 124 p.
9. Cowpertwait P. S. P. A generalized spatial-temporal model of rainfall based on a clustered point process // Proc. Roy. Soc. London A. — 1995. — **450**. — P. 163—175.
10. Dozier J. Remote sensing of snow in visible and near-infrared wavelengths // Theory and applications of optical remote sensing / Ed. G. Asrar. — New York: John Wiley & Sons, 1989. — P. 527—547.
11. Ermoliev Yu., von Winterfeldt D. Risk, security and robust solutions // IIASA Interim Report. — 2010. — IR-10-013, IIASA. — 41 p.
12. Ermoliev Yu., von Winterfeldt D. Systemic risk and security management // Managing Safety of Heterogeneous Systems, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. — Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. — P. 19—49.
13. Ermoliev Y. M., Ermolieva T. Y., Amendola A., et al. A system approach to management of catastrophic risks // Eur. J. Operational Res. — 2000. — **122**. — P. 452—460.
14. Hall D. K., Salomonson V. V., Riggs G. A. MODIS/Terra snow cover monthly L3 global 0.05deg CMG. Version 5. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center, 2006.
15. Hall D. K., Salomonson V. V., Riggs G. A. MODIS/Terra snow cover daily L3 global 500 m grid. Version 5. [indicate subset used]. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center, 2006.
16. Kostyuchenko Yu. V., Zlateva P., Stoyka Yu., et al. Role of systemic risk in regional ecological long-term threats

- analysis // Sustainable Civil Infrastructures — Hazards, Risk, Uncertainty / Phoon K. K., Beer M., Quek S. T., Pang S. D. (editors), (Proc. of Fifth Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications (APSSRA), 23—25 May, 2012), Research Publishing, Singapore, 2012. — P. 551—556, ISBN: 978-981-07-2219-7:: doi:10.3850/978-981-07-2219-7 P226.
17. Kussul N., Shelestov A., Skakun S. Grid system for flood extent extraction from satellite images // Earth Sci. Inform. — 2008. — **1**, N 3. — P. 105—117.
 18. Lee J.-M., Yoo C. K., Choi S. W., et al. Nonlinear process monitoring using kernel principal component analysis // Chem. Eng. Sci. — 2004. — **59**. — P. 223—234.
 19. National Disaster recovery framework: strengthening disaster recovery for the nation. U.S.FEMA, 2011. — 116 p.
 20. National Infrastructure Protection Plan. IS-860.a. U.S. FEMA, 2009. — 29 p.
 21. Ogata Y. Estimation of the parameters in the modified Omori formula for aftershock frequencies by the maximum likelihood procedure // J. Phys. Earth. — 1983. — **31**. — P. 115—124.
 22. Ramsay B. The interactive multisensor snow and ice mapping system // Hydrol. Processes. — 1998. — **12**. — P. 1537—1546.
 23. Scheolkopf B., Smola A. J., Muller K. Nonlinear component analysis as a kernel eigenvalue problem // Neural Computation. — 1998. — **10**, N 5. — P. 1299—1399.
 24. Strategic National risk assessment. The strategic national risk assessment in support of PPD 8: A comprehensive risk-based approach toward a secure and resilient nation. U.S.FEMA, 2011. — 7 p.
 25. Tedesco M., Kelly R., Foster J. L., Chang A. T. C. AMSR-E/Aqua 5-day L3 global snow water equivalent EASE-grids. Version 2. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center, 2004.
 26. Villez K., Ruiz M., Sin G., et al. Combining multiway principal component analysis (MPCA) and clustering for efficient data mining of historical data sets of SBR processes // Water Sci. and Technology. — 2008. — **57**, N 10. — P. 1659—1666.
 27. Wang X., Bishop C. H. A Comparison of breeding and ensemble transform Kalman filter ensemble forecast schemes // J. Atmos. Sci. — 2003. — **60**. — P. 1140—1158.
 28. Zhang Y. Z., Jin C., Yan S., Chiu L. S. Seasonal snow monitoring in Northeast China using space-borne sensors: preliminary results // Ann. Geogr. Inf. Sci. — 2008. — **14**. — P. 113—119.
 29. Zhang Yu., Yan S., Lu Y. Snow cover monitoring using MODIS data in Liaoning province, Northeastern China // Remote Sens. Environ. — 2010. — **2**. — P. 777—793; doi:10.3390/rs2030777.

Стаття надійшла до редакції 24.10.13

Ю. В. Костюченко, Ю. Г. Белоус,
Д. М. Соловьев, И. М. Копачевский

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ СПУТНИКОВОГО НАБЛЮДЕНИЯ В КОМПЛЕКСЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РИСКОВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Рассматриваются отдельные аспекты создания теоретико-методической базы использования данных спутниковых наблюдений снежного покрова в задаче оценки метеорологических, климатических и гидролого-гидрогеологических рисков городских агломераций. Предложено метод определения характеристик снежного покрова на основе комплексного использования спутниковой информации (а именно, продуктов *MOD10A1* и *SWE*, нормализованного индекса снежного покрова *NDSI*, локальных метеорологических наблюдений, наземных калибровочных и заверочных измерений). Предложено метод интеграции данных с разных источников, который базируется на модифицированном методе трансформации ансамблей фильтрацией Кальмана и методе ядерель-анализа главных компонент распределений данных. Применимо к анализу городских агломераций, предложенный подход имеет относительно высокую достоверность по отношению к существующим методам, алгоритмам и продуктам (отдельно использованных продуктов *MOD10A1* и *SWE*). В качестве апробации метода рассмотрено случай экстремальных снегопадов 21—23 марта 2013 г. в г. Киев. Предложено количественные оценки показателей рисков и параметров уязвимости городской инфраструктуры по отношению к негативным влияниям чрезвычайной ситуации.

Yu. V. Kostyuchenko, Yu. H. Bilous,
D. M. Solovyov, I. M. Kopachevsky

UTILIZATION OF SATELLITE OBSERVATIONS IN THE RISK ASSESSMENT METHODS OF METEOROLOGICAL AND CLIMATIC DISASTERS IN URBAN AREAS

We consider some aspects of the theoretical and methodological basis for utilization of satellite observations of snow cover in the task of climatic, meteorological, hydrological and hydrogeological risk assessment in urban areas. We propose fundamentals of a procedure for the determination of the snow cover characteristics by integrating usage of satellite information (especially, *MOD10A1* and *SWE* products, snow depth normalized index *NDSI*, local meteorological observations, ground calibration and verification measurements). On the basis of the modified method of Ensemble Transform Kalman Filter (ETKF) and Kernel Principal Component Analysis of data distributions (KPCA), a method of data integration from various sources is proposed. It is shown that in application of urban agglomeration analysis the proposed approach has sufficiently high relative accuracy with respect to existing approaches (separately used *MOD10A1* and *SWE* products). As an example of approach approbation, a case of extreme snowfall in Kyiv during 21—23 of March 2013 is used. A quantitative assessment of risk indicators and parameters of municipal infrastructure vulnerability toward adverse effects of a disaster is presented.

Л. Ф. Черногор, Ю. Б. Милованов, В. Н. Федоренко, А. М. Цымбал

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ПОСЛЕДОВАВШИХ ЗА ПАДЕНИЕМ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА

Проанализированы временные вариации полного электронного содержания (ПЭС) в день падения Челябинского метеорита и в контрольные дни. Значения ПЭС получены с помощью GPS-спутников и наземных радиоприемников, отдаленных от места взрыва метеорита на расстояние 240–360 км. Обнаружены квазипериодические (волновые) возмущения ПЭС со временем запаздывания 12–20 мин, периодом 8–10 мин, продолжительностью 30–40 мин и относительной амплитудой примерно 0.6–3.5 %. В ударной волне амплитуда возмущений была в несколько раз большей. Средняя скорость распространения возмущений была близкой к 500 м/с. Такие параметры характерны для акустико-гравитационных волн в верхней атмосфере.

ВВЕДЕНИЕ

Челябинский метеорит вторгся в атмосферу Земли 15 февраля 2013 г. в 03:20:26 UT (здесь и далее — всемирное время). Он двигался примерно с востока на запад, азимут был близок к 270°. Угол наклона траектории к горизонту при пролете над Челябинским регионом составлял около 20°. Начальный диаметр тела был близок к 18 м, начальная масса — 11 кт, начальная скорость — около 18.5 км/с [6, 7, см. также сайты <http://neo.jpl.nasa.gov/fireball/>, http://neo.jpl.nasa.gov/news/fireball_130301.html, <http://newsroom.ctbto.org/2013/02/18russian-fireball-largest-ever-detected-by-ctbtos-infrasound-sensors>]. Найденные осколки космического тела свидетельствовали о том, что он представлял собой хондрит.

Основное взрывоподобное выделение энергии произошло вблизи высоты 25 км в точке со следующими географическими координатами: 54.8° с. ш., 61.5° в. д. Энергия взрыва была близка к 10^{15} Дж, энергия ударной волны составляла около $0.6 \cdot 10^{15}$ Дж [6, 7]. По мере удаления ударной волны от области взрыва она постепенно ослабевала, превращаясь в акустико-гравитацион-

ную волну. Последняя, распространяясь во все стороны от места энергосвечения, возмущала атмосферное давление. Его квазипериодические вариации вызывали такие же вариации параметров ионосферной плазмы, и в первую очередь концентрации электронов N .

Как показывают теоретические расчеты, заметные возмущения N должны наблюдаться на расстояниях R в сотни и даже тысячи километров от места взрыва [6, 7].

Поскольку вторжение космического тела с последующим взрывом произошло неожиданно, целенаправленные измерения комплекса эффектов падения тела во всех средах (геосферах) оказались невозможными. Ожидаемые эффекты зарегистрированы лишь «дежурными» средствами. К ним относятся ИСЗ GPS, которые позволяют проводить практически непрерывный мониторинг ионосферы в глобальных масштабах.

Взаимодействию метеорных тел с атмосферой Земли традиционно уделяется большое внимание [2, 4, 8]. Мелкие космические тела производят эффекты в основном в метеорной зоне (высоты 80...120 км). Крупные тела, генерируя при полете ударную волну, способны создавать возмущения во всей ионосфере [3, 5]. Экспериментальных исследований ионосферных эффектов, возникающих при падении крупных (десяти

© Л. Ф. ЧЕРНОГОР, Ю. Б. МИЛОВАНОВ, В. Н. ФЕДОРЕНКО, А. М. ЦЫМБАЛ, 2013

метров) тел, до настоящего времени не было. Это обусловлено малой частотой подобных событий (для тела, аналогичного Челябинскому метеориту, она составляет один раз в 65 лет [6, 7]).

Целью настоящей работы является изложение и истолкование результатов спутниковых наблюдений квазипериодических (волновых) возмущений в ионосфере, сопровождавших падение Челябинского метеорита.

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Для радиопросвечивания ионосферных возмущений, вызванных падением Челябинского метеорита, в данной работе использовались сигналы спутников GPS. Последние оказались удобными для изучения пространственно-временной картины возмущений различной физической природы [1].

При распространении через возмущенную область ионосферы сигналы спутников приобретают дополнительный набег фазы, который пропорционален полному электронному содержанию (ПЭС) в наклонном столбе N_L .

Перечень спутников и радиоприемников GPS, использованных в настоящей работе, приведен в табл. 1. Там же указаны географические координаты подыоносферных точек в момент начала и окончания изучаемого волнового возмущения (ВВ) (для краткости начальные и конечные координаты). При этом подыоносферные точки находились как вблизи, так и южнее, восточнее и севернее от области взрыва (рис. 1). На рис. 1 приведены расчетные траектории подыоносферных точек в период суток 15 февраля 2013 г. относительно станций наблюдения ARTU, TRIM и TUMP. Положение станций отмечено кружками, местоположение точки взрыва — крестиком.

Положение спутника на орбите определялось по навигационным данным того же дня. В качестве системы координат использовалась система координат с указанием северной широты и восточной долготы в градусах.

Заметим, что прямоугольная сетка координат сохраняет масштаб расстояний только по долготе. Для построения траекторий использовались спутники из табл. 1. Средняя высота ионизированного слоя, в котором формируется

ионосферная поправка, принималась равной 350 км. Так как период обращения GPS-спутника вокруг Земли составляет примерно 12 ч, то в течение суток спутник восходит дважды. Подыоносферные точки в процессе наблюдения ВВ удалялись от приемника на расстояния от нескольких сот до примерно тысячи километров. Высота спутников $z_s \approx 20180$ км, скорость движения $v_s = 3.8$ км/с.

Радиолуч от спутника к приемнику проходит область ионосферы, в которой формируется фазовое запаздывание сигнала. Пренебрегая, как обычно, толщиной этой области, заменим ре-

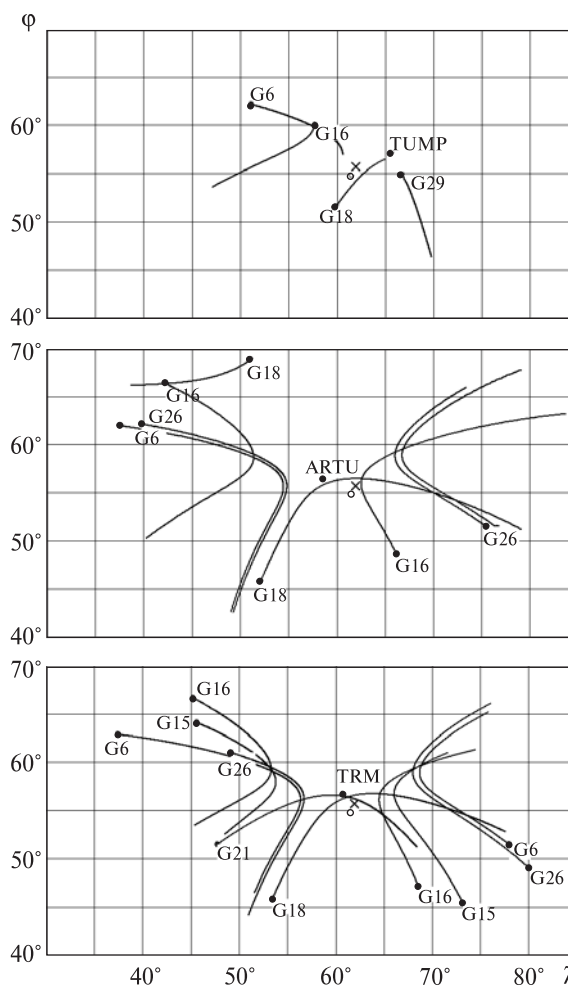


Рис. 1. Траектории подыоносферных точек спутников GPS 15 февраля 2013 г. Кружками отмечены положения пунктов наблюдения с указанием имени станции и крестиком указана точка взрыва

альную ионосферу тонким слоем, расположенном на высоте z_i . Точку пересечения радиолуча с высотой этого слоя назовем ионосферной. Проекция ионосферной точки на поверхность Земли известна как подыоносферная точка [1]. Примем, что ионосферная точка находилась на высоте $z_i \approx 350$ км. При этом ее скорость движения изменялась в пределах 60—500 м/с. Меньшее значение скорости отнесено к моменту прохождения спутника вблизи зенита для каждого приемника. Максимальная скорость достигается при восходе и заходе спутника.

Координаты GPS-приемников и их удаление R_0 от эпицентра взрыва приведены в табл. 2. Видно, что R_0 составляло 240...360 км. Приемники располагались северо-западнее и северо-восточнее от эпицентра взрыва.

Добавим, что из-за относительно малой скорости сканирования (~100 м/с) возмущенной

области ионосферы диагностика среды носит пространственно-временной характер. Поэтому характер наблюдаемых вариаций ПЭС, вообще говоря, может быть обусловлен как пространственными особенностями возмущенной области, так и временными изменениями ПЭС. Поскольку падение метеорита имело место уже после восхода Солнца в ионосфере над г. Челябинск, и эффекты утреннего терминатора уже не проявлялись, вариации ПЭС обусловлены в первую очередь пространственными структурами концентрации электронов. При этом характерный пространственный масштаб (длина волны возмущения) λ может быть оценен из следующей простой формулы:

$$\lambda = v_s \frac{z_i}{z_s} T, \quad (1)$$

где T — период наблюдаемых колебаний. Стро-

Таблица 1. Перечень ИСЗ GPS, начальные и конечные географические координаты волнового возмущения

ИСЗ	Начальные координаты		Конечные координаты		Наименование GPS-приемника
	широта, с. ш.	долгота, в. д.	широта, с. ш.	долгота, в. д.	
G6	51.1°	59.8°	55.0°	57.0°	TRIM
	49.4°	59.0°	53.0°	57.0°	ARTU
	55.8°	60.3°	58.2°	58.8°	TUMP
G15	68.2°	54.3°	68.0°	58.0°	TRIM
	49.0°	57.7°	45.0°	54.6°	ARTU
G16	50.7°	58.2°	45.8°	54.7°	TRIM
	54.3°	58.8°	51.3°	56.8°	TUMP
G18	55.4°	52.5°	56.0°	53.5°	ARTU
	56.7°	52.4°	57.8°	53.8°	TRIM
G21	58.9°	56.5°	63.1°	55.8°	TRIM
G26	70.2°	58.0°	70.2°	60.3°	TRIM
	68.4°	58.1°	68.2°	60.2°	ARTU
G29	68.2°	51.8°	70.0°	46.0°	TUMP

Таблица 2. Географические координаты GPS-приемников и расстояние до места взрыва метеорита (вдоль поверхности Земли)

Наименование GPS-приемника	Широта, с. ш.	Долгота, в. д.	Расстояние, км
TRIM	56.78°	60.74°	240
ARTU	56.43°	58.56°	260
TUMP	57.13°	65.60°	360

го говоря, λ представляет собой проекцию пространственного масштаба, которая изменяется при изменении траектории ИСЗ по отношению к направлению распространения ВВ.

Для обнаружения ВВ, сгенерированных пролетом Челябинского тела, анализировались временные вариации производной $\dot{N}_L(t)$. Для этого в каждой расчетной точке определялась не только величина N_L , но и оценка ее математического ожидания $\bar{N}_L$ на временном интервале 3–5 мин. Оценка производной N_L по времени рассчитывалась как отношение приращения $\bar{N}_L$ к интервалу времени δt между соседними измерениями. Для различных радиоприемников интервал времени между измерениями составлял 30, 5 или 1 с. Добавим, что погрешность оценки $\dot{N}_L$ была не хуже 10^{-4} TECU/c. При этом погрешность оценки относительной амплитуды $\dot{\delta}$ составила 10^{-5} c^{-1} , а $\delta_N \approx \Delta N/N \approx 0.3\text{--}0.5\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Рассмотрим примеры временных вариаций скорости изменения ПЭС в наклонном столбе N_L , равных $\dot{N}_L = dN_L/dt \approx \Delta N_L/\Delta t$. Для наблюдения возмущений, вызванных взрывом космического тела, важно отделить эффекты солнечного терминатора. Восход Солнца в месте взрыва наблюдался с 00:40 до 02:45 на высотах от 410 до 0 км соответственно.

Состояние космической погоды. Состояние космической погоды в основном определяется распределением концентрации заряженных частиц, скорости и температуры частиц солнечного ветра, измеренных на ИСЗ ACE, плотностей потоков протонов и электронов, измеренных на спутниках GOES-8 и GOES-12 соответственно, а также индексов геомагнитной активности (AE , D_{st} и K_p).

15 февраля 2013 г. концентрация частиц солнечного ветра не превышала $5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, их скорость была близка к 400 км/с, температура — около $2 \cdot 10^4 \text{ К}$. Значения индекса D_{st} не опускались ниже -30 нТл , а $K_p \approx 0$ (вблизи момента падения метеорита).

Таким образом, состояние космической погоды было спокойным, отсутствовали возмущения, вызванные процессами на Солнце. Это благоприятствовало выделению возмущений в

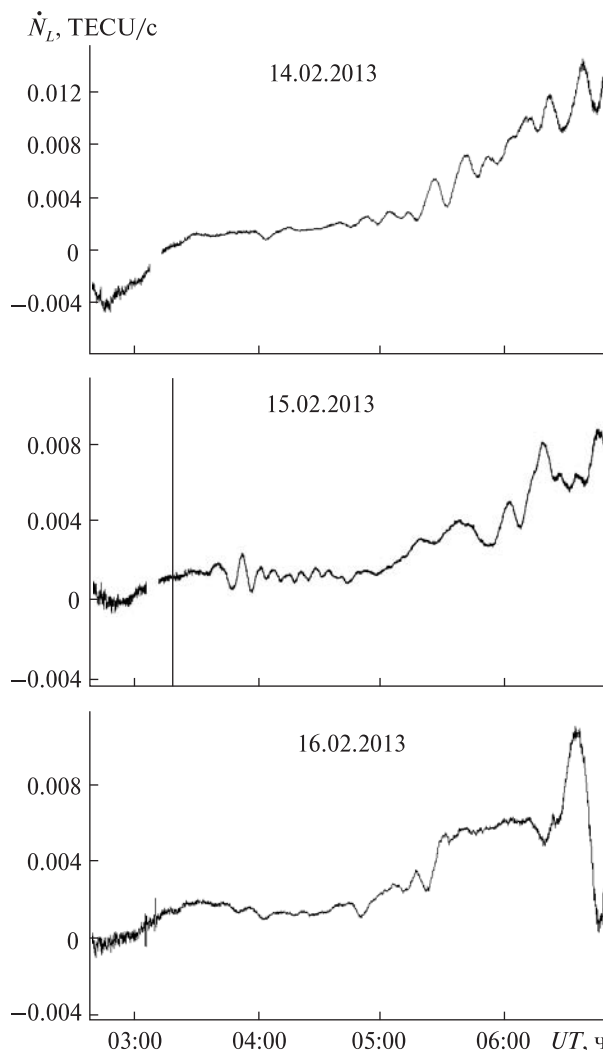


Рис. 2. Временные вариации $\dot{N}_L$ для ИСЗ G6 (станция TRIM). Вертикальной линией здесь и далее показан момент взрыва космического тела

ионосфере, обусловленных падением Челябинского метеорита.

Станция TRIM. Временные вариации $\dot{N}_L$, полученные на станции TRIM для спутников G6 и G16, показаны на рис. 2 и 3. Видно, что примерно через 18 и 15 мин после взрыва метеорита для спутников G6 и G16 соответственно возникло колебание $\dot{N}_L$ с периодом T , равным 15 и 13 мин, длительностью около 60 мин и относительной амплитудой $\dot{\delta} = 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ ($\dot{\delta} = \Delta \dot{N}_{L\text{max}} / \bar{N}_L = 0.001 \text{ TECU}/10 \text{ TECU}$ ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$)). Характер поведения $\dot{N}_L$ для спутника G6 отличает-

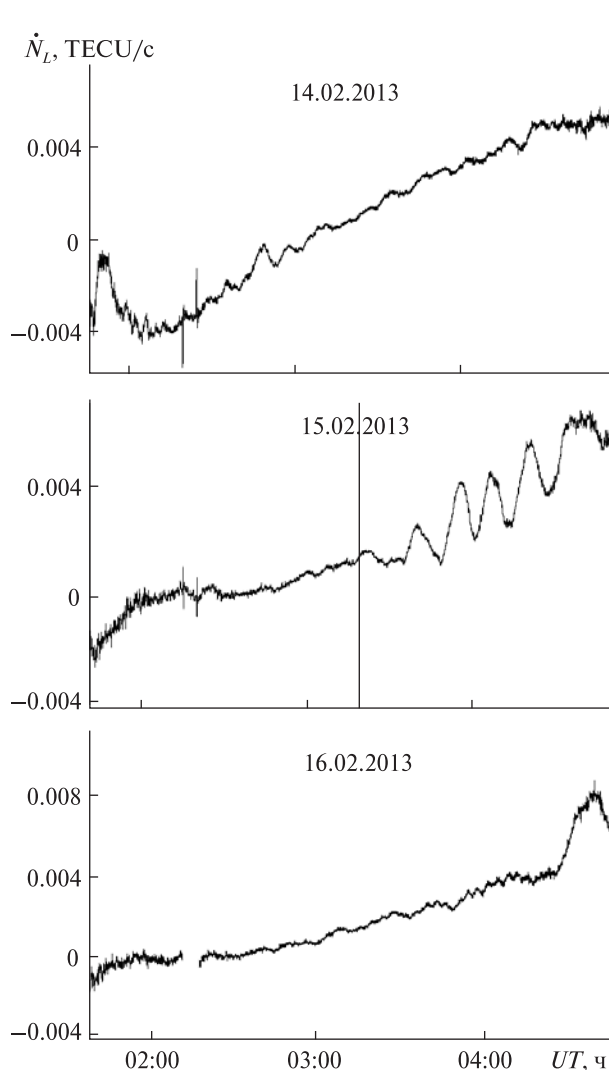


Рис. 3. Временные вариации $\dot{N}_L$ для ИСЗ G16 (станция TRIM)

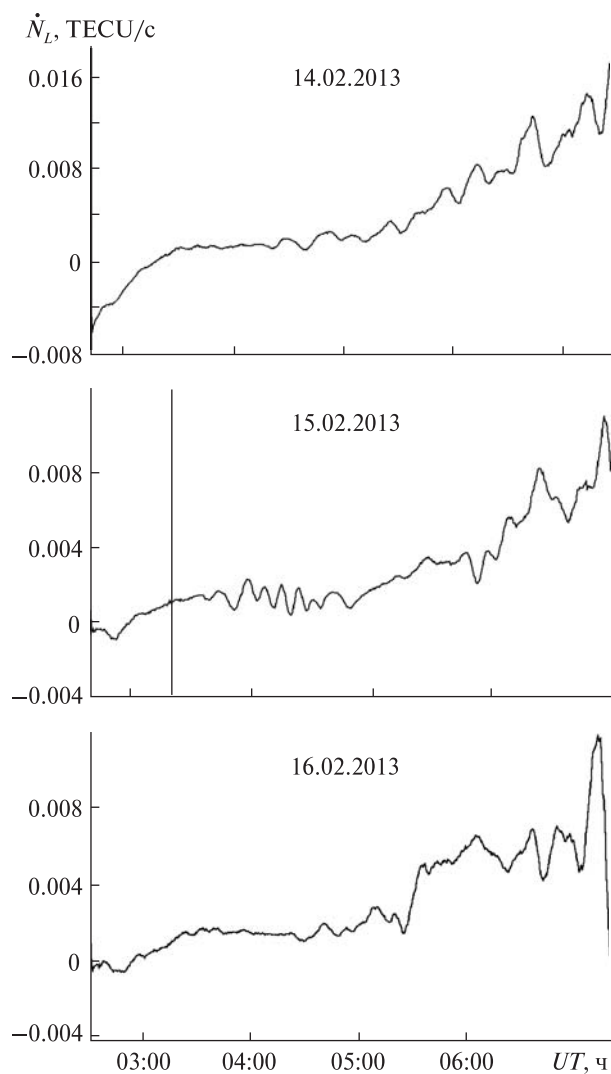


Рис. 4. Временные вариации $\dot{N}_L$ для ИСЗ G6 (станция ARTU)

ся от аналогичного параметра для ИСЗ G16. Для первого спутника наблюдался сильный выброс $\dot{N}_L$ сначала в сторону положительных значений, а затем в сторону отрицательных значений. Такое поведение свойственно ударным волнам. После указанных всплесков имело место квазипериодическое изменение $\dot{N}_L$, при этом $T \approx 8$ мин.

Примерно через 2 ч после описанного квазипериодического колебания также наблюдался еще один цуг колебаний, амплитуда которого была как больше, так и меньше амплитуды первого колебания (см. рис. 2).

Станция ARTU. Временные вариации $\dot{N}_L$ показаны на рис. 4 и 5. Видно, что примерно через 18 мин после взрыва возникли квазипериодические вариации $\dot{N}_L$ с периодом 8 и 16 мин соответственно. Продолжительность колебаний была равна приблизительно 60 и 45 мин, амплитуда — 0.0008 и 0.003 TECU/c соответственно. При $\bar{N}_L = 10$ TECU имеем $\dot{\delta} = (8...30) \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$.

Для спутника G26 характер вариаций $\dot{N}_L(t)$ был подобным характеру вариаций, вызванных ударной волной.

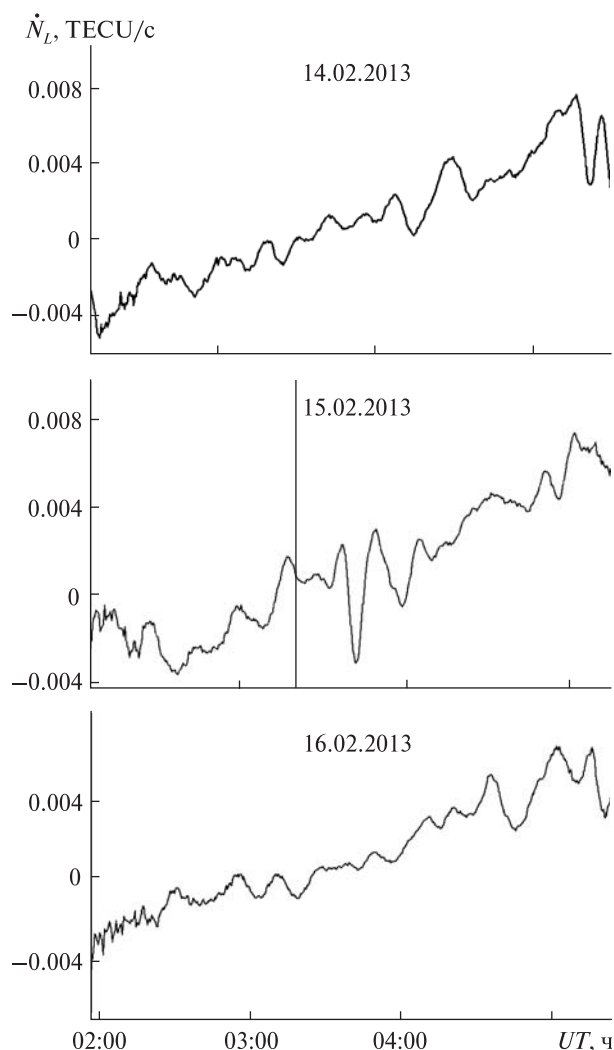


Рис. 5. Временные вариации $\dot{N}_L$ для ИСЗ G26 (станция ARTU)

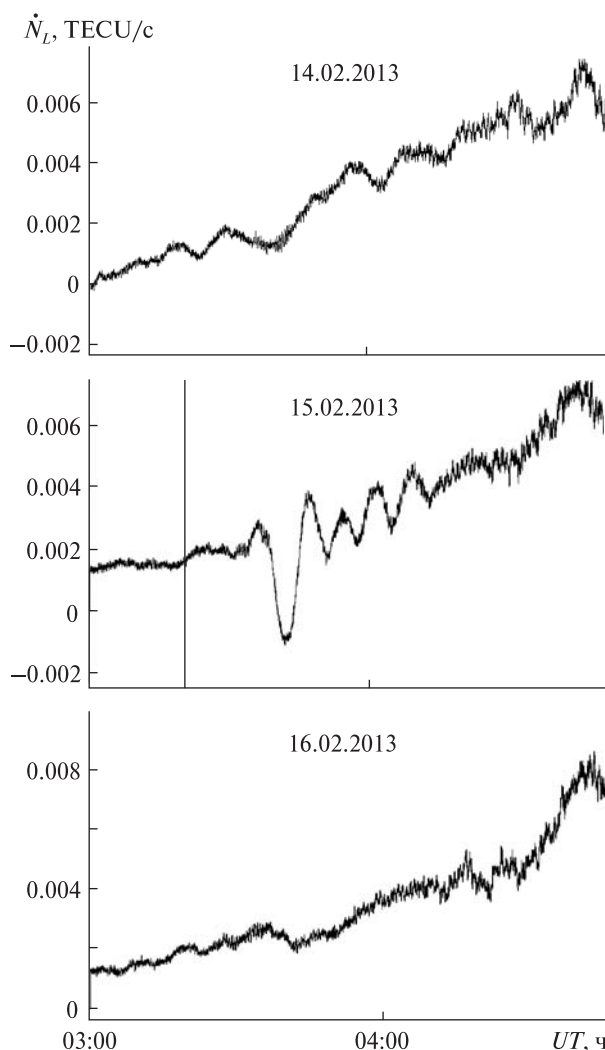


Рис. 6. Временные вариации $\dot{N}_L$ для ИСЗ G16 (станция TUMP)

Станция TUMP. Примерно через 15–20 мин после взрыва метеорита возникли квазипериодические вариации $\dot{N}_L(t)$ с периодами около 8–10 и 25 мин (рис. 6 и 7) и длительностью 35–40 мин. Амплитуда колебаний достигала 0.002 и 0.0035 TECU/c. При $\bar{N}_L = 10$ TECU имеем $\dot{\delta} = (2...3.5) \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$. В начале цугов наблюдалась реакция на прохождение ударной волны.

ОБСУЖДЕНИЕ

Скорости распространения волнового возмущения. На всех регистрациях $\dot{N}_L(t)$ для трех стан-

ций и восьми спутников наблюдались квазипериодические вариации ПЭС. Время запаздывания этих вариаций слабо зависело от расстояния между областью взрыва и GPS-приемником. Учитывая, что ионосферная точка находилась практически над приемником, по времени запаздывания легко оценить скорость распространения колебания от места взрыва до ионосферной точки.

Считается, что основной вклад в ПЭС дает область высот вокруг ионосферной точки (т. е. 200–500 км).

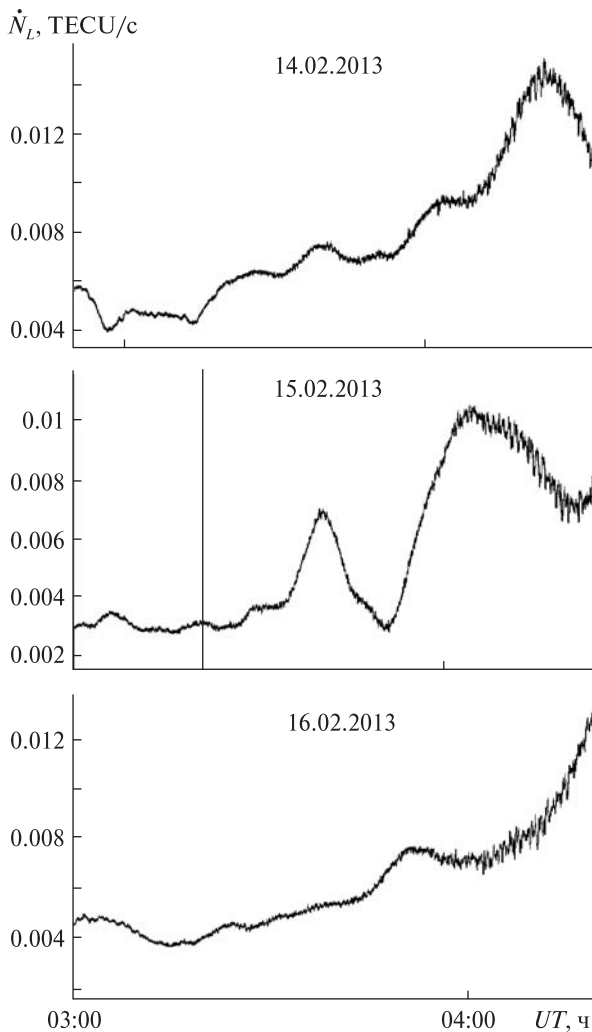


Рис. 7. Временные вариации $\dot{N}_L$ для ИСЗ G29 (станция TUMP)

Скорость распространения ВВ в горизонтальном направлении дается очевидным соотношением

$$v = \frac{R}{\Delta t}, \quad (2)$$

где R — удаление ионосферной точки от места взрыва, Δt — время распространения возмущения от области взрыва до высоты, где находится область ионосферы, дающая основной вклад в ПЭС (около 350 км).

Для обсуждаемых станций $R \approx 450...705$ км. Тогда при $\Delta t \approx 16...24.5$ мин из соотношения (2) имеем $v \approx 500...530$ м/с.

Заметим, что в ряде случаев ВВ имело форму ударной волны. Вследствие сферической расходимости ударной волны ее амплитуда достаточно быстро убывала по мере удаления от места взрыва. Поэтому скорость ударной волны лишь немного превышала скорость акустической волны. Далее отличие скоростей не учитывается, так как это было бы превышением точности оценки v .

Периоды волнового возмущения. В спутниковых наблюдениях возникают искажения величины периода колебаний ПЭС. К этому приводит движение ИСЗ, точнее ионосферной точки, и усреднение несинфазных по высоте (дальности) ВВ концентрации электронов вдоль наклонного радиолуча от спутника до приемника. Рассмотрим эти искажения периода несколько подробнее.

Измеренная частота колебаний ω' связана с реальной частотой ω периодического процесса следующим соотношением:

$$\omega' = \omega - \mathbf{k}\mathbf{w},$$

где $\mathbf{k}$ — волновой вектор ВВ, $\mathbf{w}$ — скорость движения ионосферной точки. Изменение частоты ВВ вызвано эффектом Допплера. Переходя к периодам $T' = 2\pi/\omega'$, получим, что

$$T = T' \left(1 + \frac{w_{\parallel}}{v} \right), \quad (3)$$

где $w = (\mathbf{k}\mathbf{w})/k$ — проекция $\mathbf{w}$ на вектор $\mathbf{k}$, v — скорость ВВ. Полагая, что $w \approx 70$ м/с, $v \approx 700$ м/с, и используя (3), приходим к соотношению $(T - T')/T' \approx 0.1$. Таким образом, для спутников GPS изменением ω и T за счет эффекта Допплера часто можно пренебречь.

В ряде случаев более существенной является вторая причина. Поскольку в диапазоне высот 200—500 км начальная фаза ВВ существенно отличается на разных дальностях, при усреднении вдоль радиолуча происходит не только кажущееся уменьшение периода, но и уменьшение амплитуды ВВ. Кроме того, ВВ сильно локализовано по высоте. Оно занимает эффективный диапазон высот $\Delta z \approx 50...100$ км. Наши модельные расчеты показали, что и период ВВ из-за несинфазности колебаний на разных высотах могут уменьшиться на десятки процентов и более. Амплитуда ВВ $\delta_N = \Delta N/N$ обычно уменьшается в 1.3 раза, т. е. $\delta_N \approx 1.3\delta$.

По соотношению (1) оценим пространственный масштаб ВВ. Если наблюдаемый период колебаний $T = 8...10$ мин, то $\lambda \approx 32...40$ км. При $v = 500$ м/с на высоте $z_i = 350$ км имеем период ВВ $\lambda/v \approx 64...80$ с. Такие периоды свойственны инфразвуку на высотах F -области ионосферы.

Амплитуда волнового возмущения. По экспериментальным данным для всех станций $\dot{\delta} = (8...35) \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Несинфазность колебаний на различных высотах привела к занижению $\dot{\delta}$ в 1.2...1.3 раза. Тогда реальное значение $\dot{\delta} = (1...4.6) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Необходимо также учесть, что δ примерно в 3...5 раз меньше δ_N [1]. С учетом этого $\dot{\delta} = (3...23) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

Наконец, при оценке величины $\dot{\delta}$ необходимо иметь в виду, что на нее существенно влияет ракурсный эффект [1].

Зная $\dot{\delta}$ и T , по соотношению

$$\delta = \frac{\dot{\delta} T}{2\pi} \quad (4)$$

можно вычислить δ . Оказалось, что при периоде $T = 8...10$ мин амплитуды δ и δ_N ВВ на расстоянии в несколько сотен километров от эпицентра взрыва не превышали 0.8...4.6 % и 2.4...23 % соответственно. В ударной волне $\dot{\delta}$ и квазипериод больше примерно в 2 и 1.5 раза соответственно. При этом с учетом [6] в три раза больше как δ , так и δ_N .

Важно, что амплитуда ВВ, последовавших за взрывом метеорита, была заметно больше, чем в контрольные интервалы времени.

Полученные параметры ВВ свидетельствуют о том, что взрыв Челябинского метеорита привел к генерации акустико-гравитационных волн в верхней атмосфере. Параметры волн хорошо согласуются с параметрами, оцененными как теоретически, так и из наблюдений, проведенных в г. Харькове.

Сравнительный анализ. Представляет интерес сравнение параметров ВВ, сопровождавших падение Челябинского метеороида, с параметрами волн, генерируемых землетрясениями, мощными взрывами и стартами крупных ракет. Мониторинг ВВ, вызванных этими источниками, проведен в работе [1]. При магнитуде землетрясения $M \approx 7...8$ (энерговыведение порядка $10^{15}...10^{17}$ Дж $\approx 0.25...25$ Мт ТНТ) получено, что $T \approx 3...10$ мин,

$\delta \approx 1...3$ % на расстояниях 100...1000 км от эпицентра. Средняя скорость ВВ была близка к 700 м/с.

Наземный взрыв с энерговыведением 2 кт ТНТ привел к возникновению над эпицентром на ионосферных высотах N -образного возмущения концентрации электронов с $T \approx 3$ мин, $\delta \approx 7.5$ %. Скорость распространения ВВ была близка к 700 м/с [1].

При стартах мощных ракет (энерговыведение $10^{11}...10^{13}$ Дж $\approx 0.25...25$ кт ТНТ) ВВ имели следующие параметры: $T \approx 3...6$ мин, $v \approx 600...900$ м/с и $\delta \approx 1$ % [1].

Из приведенных данных следует, что разные по своей физической природе источники генерировали колебания инфразвукового диапазона с близкими периодами. Значения относительных амплитуд, естественно, зависели от величины энерговыведения и расстояния от источника до места наблюдения. Как правило, хорошо проявлялись особенности ударно-волнового воздействия.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлено, что пролет и взрыв Челябинского метеороида привел к генерации и распространению волнового возмущения с параметрами акустических волн ($T = 64...80$ с).

2. Длительность волнового цуга составляла не более 5-6 периодов.

3. Значения периодов наблюдаемых волнового возмущения составляли 8...10 мин.

4. Нескорректированные значения относительных амплитуд ВВ $\dot{\delta} = (8...35) \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, $\delta_N = 2...1.7$ %. С учетом коррекции $\dot{\delta} = (1...4.6) \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, а $\delta_N = 2.4...23$ %. В ударной волне δ и δ_N примерно в три раза больше.

5. Скорость распространения ВВ составляла около 500 м/с.

Авторы благодарны Международной службе IGS, а также сотрудникам станций TRIM, TUMP за возможность использования первичных данных измерений.

1. Афраймович Э. Л., Первалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. — Иркутск, ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. — 480 с.
2. Бронитэн В. А. Физика метеорных явлений. — М.: Наука, 1981. — 416 с.

3. *Катастрофические воздействия космических тел* / Под ред. В. В. Адушкина и И. В. Немчинова. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. — 310 с.
4. *Кручиненко В. Г.* Математико-фізичний аналіз метеорного явища. — К.: Наук. думка, 2012. — 294 с.
5. *Черногор Л. Ф.* Физика и экология катастроф. — Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. — 556 с.
6. *Черногор Л. Ф.* Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск» // *Инженер. физика*. — 2013. — № 8. — С. 23—40.
7. *Черногор Л. Ф.* Физические эффекты пролета Челябинского метеорита // *Доп. Нац. академії наук України*. — 2013. — № 10. — С. 97—104.
8. *Чурюмов К. И., Гулиев А. С., Кручиненко В. Г., Чурюмова Т. К.* Кометно-астероидная опасность, истина и вымыслы. — Киев-Баку, 2012. — 178 с.

Стаття надійшла до редакції 05.07.13

*Л. Ф. Черногор, Ю. Б. Милованов,
В. М. Федоренко, А. М. Цимбал*

СУПУТНИКОВІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ІОНОСФЕРНИХ ЗБУРЕНЬ, ЩО ВІДБУЛИСЯ ПІСЛЯ ПАДІННЯ ЧЕЛЯБІНСЬКОГО МЕТЕОРИТУ

Проаналізовано часові варіації повного електронного вмісту (ПЕВ) у день падіння Челябінського метеориту

та в контрольні дні. Значення ПЕВ отримані за допомогою GPS-супутників та наземних радіоприймачів, віддалених від місця вибуху метеорита на відстань 240—360 км. Виявлені квазіперіодичні (хвильові) збурення ПЕВ з часом запізнення 12—20 хв, періодом 8—10 хв, тривалістю 30—40 хв і відносною амплітудою близько 0.6—3.5 %. В ударній хвилі амплітуда збурень була в декілька разів більшою. Середня швидкість поширення збурень була близькою до 500 м/с. Такі параметри мають акустико-гравітаційні хвилі у верхній атмосфері

*L. F. Chernogor, Yu. B. Milovanov,
V. N. Fedorenko, A. M. Tsymbal*

SATELLITE OBSERVATIONS OF IONOSPHERIC DISTURBANCES WHICH FOLLOWED THE CHELYABINSK METEORITE PASSAGE

The GPS TEC data obtained during the Chelyabinsk meteorite passage and on reference days were examined. The GPS receivers were located at 240—360 km away from the meteorite explosion. Quasi-periodic (wave-like) oscillations in TEC with time delays of 12—20 min, periods of 8—10 min, durations of 30—40 min, and amplitudes of 0.6—3.5 % were detected. The middle speed of propagation of these disturbances was approximately 500 m/s. Such parameters belong to acoustic-gravity waves in the upper atmosphere.

УДК 528.2

Л. М. Янків-Вітковська

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІОНОСФЕРИ У МЕРЕЖІ СУПУТНИКОВИХ СТАНЦІЙ ЗАХІДНОЇ УКРАЇНИ

На основі визначення параметрів іоносфери із GNSS-спостережень на окремих станціях розроблено систему моніторингу іоносфери, що базується на мережі GNSS-станцій, розміщених у західній частині України та проведено регулярне відновлення просторового поля вертикальних значень інтегральної електронної концентрації (VTEC) у режимі реального часу.

Наземні методи дослідження стану іоносфери можуть дати інформацію про її параметри лише для нижнього шару. Висотний розподіл електронної концентрації верхньої іоносфери раніше міг бути отриманий тільки за допомогою іонозондів космічного базування, вертикальних запусків ракет і нечисленних установок некогерентного розсіювання радіохвиль. Це досить затратні технології, що вимагають значних коштів та часу.

АКТУАЛЬНІСТЬ

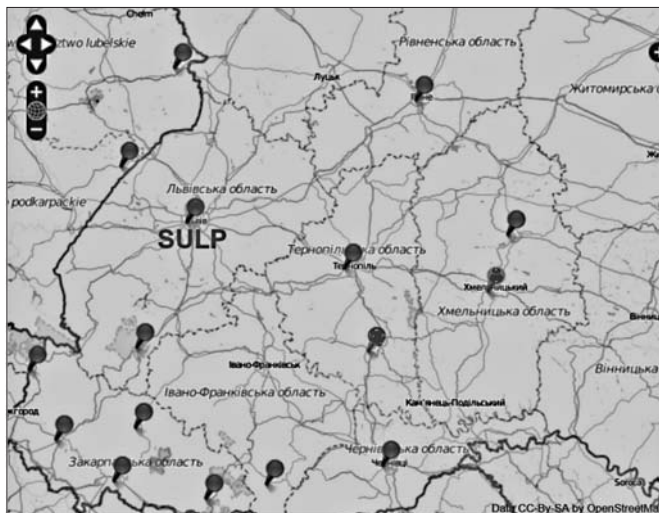
Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS) в даний час є найбільш ефективним і перспективним засобом дистанційної діагностики іоносфери з усіх радіофізичних методів. Використання таких вимірювань має цілий ряд переваг порівняно з класичними радіофізичними засобами зондування іоносфери, зокрема — безперервність вимірювань, висока просторово-часова роздільна здатність та глобальність моніторингу іоносферних збурень різної природи. Метод діагностики іоносфери за допомогою GNSS-радіосигналів є найбільш економічним, оскільки ґрунтується на вже існуючій космічній GNSS-інфраструктурі та наземній мережі перманентних станцій. Його можна використовувати для вивчення таких характеристик іоносфери, як інтегральна електронна концентрація

(TEC), профіль висотного розподілу електронної концентрації, іоносферні неоднорідності, активність авроральної області іоносфери, перенесення великомасштабних неоднорідностей, вплив штучних збурень на іоносферу, реально-часові і азимутально-часові варіації параметрів іоносфери.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

При розв'язуванні задач координатного забезпечення у геодезії на даний час широкого використання отримали активні референсні GNSS-станції, які з допомогою спеціалізованого програмного забезпечення об'єднуються у мережі. Одним із прикладів таких мереж в Україні є мережа активних референсних станцій ZAKPOS [10]. Серед чинників, які суттєво впливають на точність координатного забезпечення, і які регулярно оцінюються на рівні мережі, є іоносфера. Оцінка іоносфери виконується лише якісно з використанням «Індексу-95». Цей показник визначає стан іоносфери у мережі GNSS-станцій аналогічно до показників геомагнітної чи сонячної активності. Для вивчення таких характеристик іоносфери, як інтегральна електронна концентрація (TEC) цього недостатньо, і саме тому ми створили відповідний алгоритм, за допомогою якого можемо визначати значення параметрів іоносфери для окремої GNSS-станції, яка працює в режимі реального часу [6].

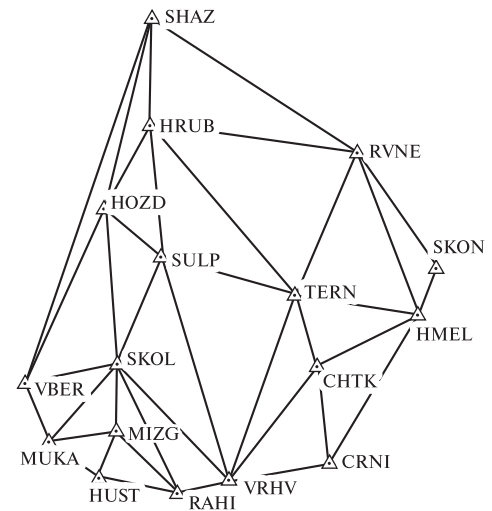
Межа станцій



а

17 станцій:

CHTK
CRNI
HMEI
HOZD
HRUB
HUST
MIZG
MUKA
RAHI
RVNE
SHAZ
SKOL
SKON
SULP
TERN
VBER
VRHV



б

Рис. 1. Схема розміщення (а) та мережа (б) активних референсних станцій ZAKPOS

Цей алгоритм складається із таких основних кроків:

- отримання файлів спостережень на окремій станції (отримуємо кодові та фазові псевдовід-стані на двох частотах $L1$ і $L2$);
- введення додаткових параметрів на станції: її координат, кута відсічки супутників, значення диференційної затримки сигналу ($DCB_{ст}$) для конкретного типу приймача і антени станції;
- отримання із FTP-сервера CODE диференційних кодових затримок (DCB^{sup}) для всіх доступних супутників на момент обчислення;
- аналіз даних спостережень (наявність ко-дових та фазових вимірювань, виявлення та усунення циклічних стрибків фази, згладження ко-дових вимірювань фазовими);
- обчислення похилих значень інтегральної електронної концентрації ($STEC$) на фіксовані моменти спостереження для кожного GNSS-супутника;
- визначення значень $VTEC$ на фіксовані мо-менти спостереження з врахуванням даних $STEC$ від всіх доступних GNSS-супутників;
- формування файлів з результатами обчис-лень $STEC$ і $VTEC$ для GNSS-станції.

Отримані дані TEC із безпосередніх спостере-жень окремих станцій дозволили нам створити систему моніторингу іоносфери, що базується

на мережі GNSS-станцій, розміщених у Західній частині України (17 станцій на території семи областей) у режимі реального часу, починаючи з 24 січня 2013 р.

На даний час ми накопичуємо результати ви-значення параметрів іоносфери та проводимо їх-ній поточний аналіз. Однією із головних наших задач на цьому етапі досліджень є проведення ре-гуляризованого відновлення просторового поля вертикальних значень інтегральної електронної концентрації ($VTEC$) за отриманими даними на GNSS-станціях у режимі реального часу.

Для розв'язання цієї задачі нами взято дані ви-значення $VTEC$ на 17 станціях мережі ZAKPOS (CHTK, CRNI, HOZD, HRUB, HUST, MIZG, MUKA, RAHI, RVNE, SHAZ, TERN, VBER, SULP, VRHV, SKOL, SKON, HMEI) за проміжок часу від 24 січня до 16 квітня 2013 р. (рис. 1).

Нехай

$$\varphi_i, \lambda_i \quad (1)$$

— відповідно широта і довгота i -ї станції, n — кіль-кість станцій. Для кожної станції відомі значення $VTEC$, визначені через певні проміжки часу:

$$v_{ij}(t_k) \quad (i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m, k = 1, \dots, K), \quad (2)$$

де v_{ij} — значення $VTEC$ на i -й станції, визначене для j -го супутника, m — кількість супутників, t_k — час вимірювання, K — кількість вимірювань.

Для дослідження взято часовий ряд (2) з інтервалом визначення 15 с від всіх доступних супутників на 17 станціях.

Необхідно визначити $VTEC$ у довільній просторовій точці, що входить територіально у зону покриття станціями:

$$v = v(\varphi, \lambda, t_k) \quad (3)$$

на області $\varphi \in [\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$, $\lambda \in [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$, де

$$\varphi_{\min} = \min_{i=1, \dots, n} \varphi_i, \quad \varphi_{\max} = \max_{i=1, \dots, n} \varphi_i,$$

$$\lambda_{\min} = \min_{i=1, \dots, n} \lambda_i, \quad \lambda_{\max} = \max_{i=1, \dots, n} \lambda_i.$$

Для відновлення поля (3) за даними (1), (2) застосовано поліноміальну апроксимацію. Проте за даними (1), (2) безпосередньо відновити поле $VTEC$ важко, оскільки мала кількість станцій обмежує степінь полінома для апроксимації залежності (3). Тому для розв'язання поставленої задачі застосовано метод, який описано нижче.

Щоб збільшити кількість апроксимованих даних, для всіх пар станцій

$$(\varphi_p, \lambda_p), (\varphi_q, \lambda_q) \quad (4)$$

визначено лінійну інтерполяцію показника $VTEC$. Для цього розраховано координати точок

$$\varphi_{pql}(t_k), \lambda_{pql}(t_k), \quad (5)$$

$$(p, q = 1, \dots, n, p \neq q, l = 1, \dots, L, k = 1, \dots, K),$$

де L — кількість вузлів розбиття відрізків (4). Значення показника $VTEC$ в один момент часу

$$\bar{v}_i(t_k) \quad (6)$$

визначено двома методами. Або як середнє арифметичне від його значень, виміряних за окремими супутниками:

$$\bar{v}_i(t_k) = m^{-1} \sum_{j=1}^m v_{ij}(t_k),$$

або як середнє зважене

$$\bar{v}_i(t_k) = \sum_{j=1}^m w_{ij} v_{ij}(t_k)$$

з ваговими коефіцієнтами w_j , які є оберненими величинами до відстаней між шуканим середньозваженим значенням і значенням $VTEC$ одного супутника [4]:

$$w_{ij} = \left(\sum_{k=1}^K [v_{ij}(t_k) - \bar{v}_j(t_k)]^2 \right)^{-1/2}.$$

Усереднені значення $VTEC$ $\bar{v}_i(t_k)$ згладжено з допомогою апроксимації згладжувальними сплайнами

$$\tilde{v}_i(t_k) \approx \bar{v}_i(t_k). \quad (7)$$

За згладженими усередненими значеннями (6) параметра іоносфери двох різних станцій $\tilde{v}_p(t_k)$, $\tilde{v}_q(t_k)$ за допомогою лінійної інтерполяції визначено $VTEC$ на прямій лінії, яка сполучає p -ту та q -ту станції, тобто у просторових точках (5). За допомогою такої інтерполяції знайдено значення параметра $VTEC$ у l -й точці на всіх лініях між станціями p, q :

$$\tilde{v}_{pql}(t_k), \quad (8)$$

Дані (8) апроксимовано на вузлах (5) з допомогою степеневого полінома двох аргументів. Коефіцієнти цього полінома знайдено з задачі мінімізації регуляризаційного функціоналу Тихонова [4, 5]:

$$\min_{c_k} \left\{ \sum_{p,q=1}^n \sum_{l=1}^L [\tilde{v}_{pql}(t_k) - P_k(\varphi_{pql}, \lambda_{pql})]^2 + \alpha \sum_{i_x+i_y \leq r} (c_{i_x i_y}^k)^2 \right\}, \quad (9)$$

де P_k — степеневий поліном двох аргументів:

$$P_k(x, y) = \sum_{i_x+i_y \leq r} c_{i_x i_y}^k x^{i_x} y^{i_y}, \quad (10)$$

r — степінь цього полінома, $c_{i_x i_y}^k$ — коефіцієнти полінома, α — параметр регуляризації. Додатково під час розв'язування задачі (9) застосовано метод регуляризації з допомогою редукції апроксимативного базису [1, 2, 8], який полягає у виявленні та видаленні «зайвих» доданків полінома (10). Під час першого розв'язування задачі (9) апроксимативний базис встановлено для вибраних станцій. Під час наступних розв'язувань цієї задачі встановлено лише значення параметрів полінома (10) за раніше встановленого апроксимативного базису. Завдяки цьому розроблений метод розв'язування задачі (9) придатний для застосування в засобах автоматизованого оброблення даних.

Розв'язок задачі (9) задає степеневе наближення показника $VTEC$ в момент часу t_k в околі області $\varphi \in [\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$, $\lambda \in [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$:

$$\hat{v}(\varphi, \lambda, t_k) = P_k(\varphi, \lambda). \quad (11)$$

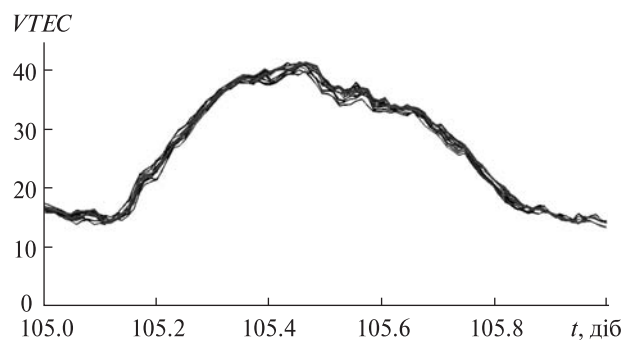


Рис. 2. Динаміка $VTEC$ на станціях ZAKPOS на 105-й день 2013 р.

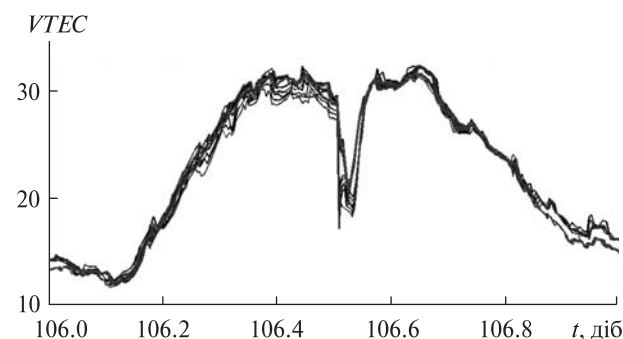


Рис. 3. Динаміка $VTEC$ на станціях ZAKPOS на 106-й день 2013 р.

На основі описаного методу визначено від 100 до 300 значень (7) протягом одного дня. За формулою (11) визначено показник $VTEC$ на території розміщення станцій ZAKPOS протягом окремих днів від 24 січня по 16 травня 2013 р. За окремими «часовими кадрами» $VTEC$ відновлено приблизну просторову зміну параметра іоносфери з часом.

Зокрема, для дослідження взято 100 вимірів $VTEC$ за 15 квітня (105-й день) і 300 таких вимірів за 16 квітня 2013 р. (106-й день). Цей часовий проміжок вибраний тому, що протягом 105-го дня відбувалася типова зміна іонізації (рис. 2), а протягом 106-го дня відбулося «нетипове» суттєве короткотривале зменшення іонізації у полудень (рис. 3).

На рис. 4 показано чотири типових фрагменти карти розподілу $VTEC$ по території досліджуваних нами станцій, отриманий з допомогою описаного методу.

На основі динаміки $\hat{v}(\varphi, \lambda, t)$ нами встановлено, що на досліджуваній території виникають області зростання іонізації атмосфери, інколи ці області утворюються безпосередньо на досліджуваній території, де іонізація поступово зростає аж до наступного переміщення області високої іонізації в іншу місцевість або її зниження без суттєвого переміщення. В інших випадках області високої іонізації переміщуються на досліджувану область із суміжних територій.

Характерний час утворення локального максимуму іонізації або його переміщення через територію досліджуваних GNSS-станцій в нічну і полуденну пору становить 15–20 хв. Під час ранкового (схід Сонця) зростання іонізації та її вечірнього спадання (захід Сонця) цей характерний час утворення або переміщення областей підвищеної іонізації скорочується в середньому до 5 хв, хоч трапляються випадки, що у полі $VTEC$ виникає своєрідна «буря», під час якої за декілька секунд повністю змінюється вид карти стану іоносфери.

Виконана ілюстрація зміни $VTEC$ з часом дозволяє зробити висновок, що для розв'язання задач координатного забезпечення на території між GNSS-станціями варто підбирати дані в ті моменти часу, коли на цій території не відбувається сильної зміни іонізації. Параметр $VTEC$ має невисокі значення і повільніше змінюється в нічну пору, також повільно змінюється у полуденну пору, хоча має тоді максимальне значення. Для розв'язання задач координатного забезпечення в момент, коли відбувається швидка зміна $VTEC$, необхідно брати до уваги більшу кількість даних вимірювання, щоб запобігти впливу даного типу похибки.

Характерний просторовий розмір неоднорідностей параметрів іоносфери має масштаб території досліджуваних станцій. Але в окремі моменти часу розмір цих неоднорідностей є меншим або значно більшим за розміри досліджуваних нами GNSS-станцій.

Описані закономірності збігаються з результатами дослідження характерного часу зміни показника $VTEC$, які були виконані за допомогою аналізу кореляційних інтегралів між значеннями $VTEC$ на різних станціях мережі ZAKPOS [9].

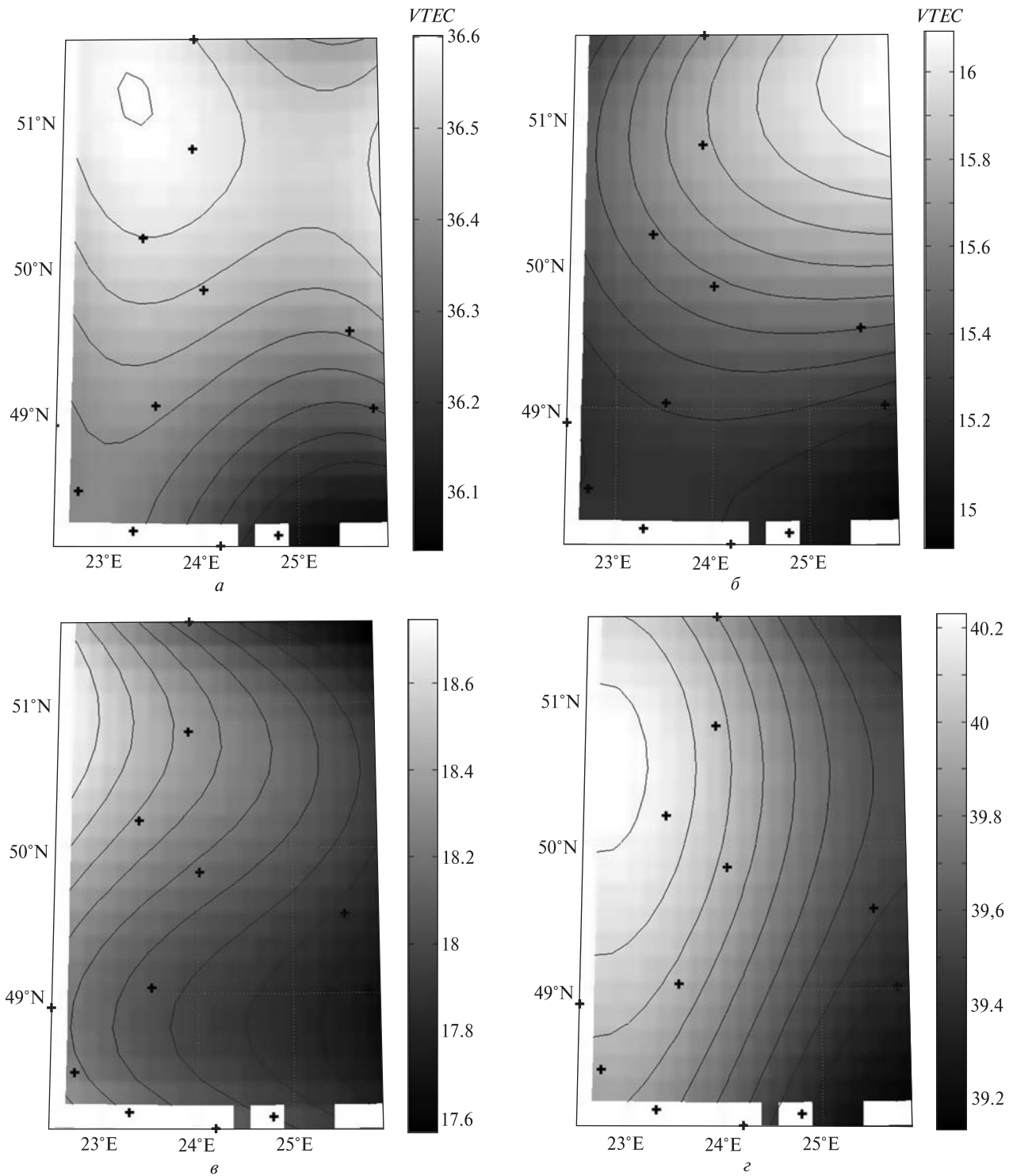


Рис. 4. Розподіл значень $VTEC$ по території ZAKPOS, на яких видно границю областей з високим і низьким значенням $VTEC$ і широкий локальний мінімум $VTEC$

ВИСНОВКИ

Програмне забезпечення, розроблене для відновлення поля *VTEC* для мережі GNSS-станцій *ZAKPOS* та його графічне відображення, може експлуатуватися в автоматизованому режимі реального часу, а також в системах опрацювання даних інших станцій. Тому запропонована методика дає можливість проводити детальний аналіз іоносфери на будь-якій території, дозволить здійснити короткотермінове прогнозування впливу іоносфери для високоточного визначення координат за допомогою GNSS-технологій.

Застосування даного алгоритму для опрацювання даних, що базуються на мережі GNSS-станцій, відкриває можливості для створення моделі іоносфери, аналізу особливостей параметрів іоносфери, дослідження зовнішніх впливів на їхню зміну з часом, а також для вдосконалення розв'язування задач координатного забезпечення.

1. Курганевич А., Матвійчук Я. Регуляризація задачі ідентифікації макромоделей нелінійних динамічних систем методом редукції апроксимаційного базису // Теоретична електротехніка. — 2000. — Вип. 55. — С. 31—36.
2. Матвійчук Я. М. Математичне макромоделювання динамічних систем: теорія та практика. — Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2000. — 215 с.
3. Матвійчук Я. М., Паучок В. К. Регуляризована ідентифікація динамічних прогностичних макромоделей // Теоретична електротехніка. — 2003. — Вип. 57. — С. 13—18.
4. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1979. — 288 с.
5. Тихонов А. Н., Гончаровский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. — М.: Наука, 1983. — 200 с.
6. Янків-Вітківська Л. М. Про обчислення параметрів іоносфери за допомогою спеціального алгоритму: перші результати // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 6. — С. 73—75.

7. Янків-Вітківська Л. М. Про дослідження параметрів іоносфери для GNSS-станцій Sulp, RVNE та SHAZ // Геодезія, картографія і аерофотознімання. — 2013. — Вип. 78. — С. 169—172.
8. Янків-Вітківська Л. М., Матвійчук Я. М., Савчук С. Г., Паучок В. К. Дослідження змін координат GNSS-станцій методом макромоделювання // Вісник геодезії та картографії. — 2012. — № 3. — С. 9—17.
9. Янків-Вітківська Л. М., Паучок В. К. Про кореляційний зв'язок геодезичних і геосейсмічних процесів // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. — 2012. — Вип.. — С. 188—190.
10. *ZAKPOS* — мережа референцних GPS станцій [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://zakpos.zakgeo.com.ua>.

Стаття надійшла до редакції 24.10.13

Л. Н. Янкив-Витковская

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ В СЕТИ СПУТНИКОВЫХ СТАНЦИЙ ЗАПАДНОЙ УКРАИНЫ

На основании определения параметров ионосферы из GNSS-наблюдений на отдельных станциях разработана система мониторинга ионосферы, базирующаяся на сети GNSS-станций, расположенных в Западной части Украины и проведено регуляризованное восстановление пространственного поля вертикальных значений интегральной электронной концентрации (*VTEC*) в режиме реального времени.

L. M. Yankiv-Vitkovska

A PROCEDURE FOR THE DETERMINATION OF IONOSPHERE PARAMETERS ON THE BASIS OF THE GNSS NETWORK IN WESTERN UKRAINE

We developed a system for monitoring the ionosphere which uses the GNSS network located in the western part of Ukraine. The system is based on determining the ionosphere parameters from GNSS observations performed at an individual station. Regularized restoration of spatial field of integral values of Vertical Total Electron Content (*VTEC*) in real time was carried out.

УДК 520.8, 521.97

В. С. Вовк, Е. С. Козырев, Н. А. Куличенко, Е. С. Сибирякова, А. В. Шульга

НДІ «Миколаївська астрономічна обсерваторія»

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГУЛЯРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В НИИ «НИКОЛАЕВСКАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ»

Приводятся результаты наблюдений низкоорбитальных космических объектов комбинированным ПЗС-методом, характеристики точности опорной системы и результаты сравнения полученных положений космических объектов с эфемеридой International Laser Ranging Service.

ВВЕДЕНИЕ

Для осуществления контроля орбит функционирующих КА и предупреждения их столкновений с КМ необходимо регулярно уточнять параметры их орбит, что требует регулярных наблюдений. Наблюдение низкоорбитальных космических объектов (НКО) преимущественно осуществляется радиолокационными станциями (РЛС) с фазированными решетками, способными одновременно сопровождать большое количество объектов, и параболическими антеннами для проведения высокоточных измерений отдельных КО. Оптические телескопы, более дешевые в разработке и эксплуатации, чем радары, используются преимущественно для наблюдения КО на высоких орбитах, так как малоэффективны для наблюдения НКО из-за их большой видимой скорости 0.05–2.0 град/с.

В НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» проблема высокой видимой скорости решена за счет применения оригинальных методов наблюдений, разработанных в обсерватории.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

Для наблюдений были задействованы два телескопа, входящие в мобильный комплекс телескопов (МОБИТЕЛ):

- КТ-50 ($D = 500$ мм, $F = 3000$ мм), оснащенный полнокадровой ПЗС-камерой Alta U9000, поле зрения $0.7 \times 0.7^\circ$, предельная звездная величина по опорным звездам 18.5^m с экспозицией 120 с;

- телевизионный телескоп ТВТ ($D = 48$ мм, $F = 135$ мм), оснащенный телевизионной ПЗС-камерой Watec LCL902H, поле зрения $2.70 \times 2.05^\circ$, предельная звездная величина 12.5 с экспозицией 2.56 с.

Наблюдения НКО проводились с использованием комбинированного метода, который заключается в разделении процессов формирования кадров с изображениями опорных звезд и НКО [7]. Для формирования изображений НКО с помощью телевизионных ПЗС-камер применялся способ накопления кадров со смещением, который заключается в суммировании последовательности кадров со смещением изображения каждого кадра в соответствии с перемещением объекта в поле зрения телескопа [5]. Для формирования изображений НКО с помощью полнокадровых ПЗС-камер применялся режим работы ПЗС-камеры time delay and intergration (TDI) в укороченном виде [2]. Так как обязательным условием применения TDI является установка столбцов ПЗС-матрицы параллельно направлению движения наблюдаемого объекта, для наблюдений использовалось специальное устройство — поворотная платформа (rotator), ко-

© В. С. ВОВК, Е. С. КОЗЫРЕВ, Н. А. КУЛИЧЕНКО,
Е. С. СИБИРЯКОВА, А. В. ШУЛЬГА, 2013

торая вращает ПЗС-камеру вокруг оптической оси объектива.

Наблюдательный список состоял из НКО с высотой орбиты от 400 км до 2800 км. Для исследования возможности наблюдения малоразмерных НКО в наблюдательный список телескопа ТВТ была включена группировка легких миниспутников дистанционного зондирования Земли RAPIDEYE с габаритами $1.17 \times 0.78 \times 0.94$ м и массой 150 кг. В наблюдательный список телескопа КТ-50 были включены наноспутники формата CubeSat, имеющие кубическую форму, размер 10–20 см и массу 1–12 кг. Для осуществления контроля погрешности получаемых положений в наблюдательные списки включены объекты, сопровождаемые службой International Laser Ranging Service (ILRS).

СТАТИСТИКА НАБЛЮДЕНИЙ

В 2011–2012 гг. на телевизионном телескопе было проведено 22 ночи наблюдений НКО, на телескопе КТ-50 проведено 37 ночей наблюдений. Все полученные изображения были обработаны до экваториальных координат объектов. Получено 41780 положений 241 КО, из них 5214 положений 10 КО, сопровождаемых службой ILRS, 151 положение пяти миниспутников RapidEye и 54 положения шести наноспутников CubeSat.

Экваториальные координаты были оформлены в виде каталога положений. Общая статистика полученного каталога положений приведена в табл. 1.

С использованием двух телескопов получено достаточное количество наблюдений НКО для оценки случайной погрешности наблюдений. Наличие наблюдений объектов, сопровождаемых службой ILRS, позволило оценить систематическую погрешность наблюдений НКО для обоих телескопов. Наличие наблюдений спутников группировки RapidEye и CubeSat подтверждает возможность наблюдения объектов размером 1 м на телескопе ТВТ и объектов размером 10 см на телескопе КТ-50.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ОРБИТ И СЛУЧАЙНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ НАБЛЮДЕНИЙ

Оценка качества опорной системы звезд. При использовании комбинированного метода наблюдений точность определения экваториальных координат объекта в первую очередь зависит от качества опорной системы — количества звезд и их невязок с каталогом.

При использовании комбинированного метода наблюдений на неподвижном телескопе изображения звезд формируются на дополнительных кадрах. Способ формирования изображения звезд зависит от используемого типа ПЗС-камеры. На телевизионном телескопе, оснащенном телевизионной ПЗС-камерой, используется способ накопления кадров со смещением, время экспозиции составляет 10 с (накопление 250 кадров). На телескопе КТ-50, оснащенном полнокадровой ПЗС-камерой, используется режим накопления с экспозицией 0.4 с. Обработка изображений звезд осуществлялась программой

Таблица 1. Статистика каталога положений низкоорбитальных космических объектов

Телескоп	Список	Количество объектов	Количество проводок*	Длительность проводок*, мин	Количество положений
ТВТ	Все	195	666	3129	40441
	RapidEye	5	9	14.8	151
	ILRS	7	57	363.7	4973
КТ-50	Все	46	218	763	1339
	CubeSat	6	19	21.2	54
	ILRS	10	33	159.1	241

* Под проводкой подразумевается множество положений одного НКО, полученных по наблюдениям одного телескопа на одном витке орбиты НКО

Astrometrica. Параметры обработки: минимальное отношение «сигнал/шум» используемых звезд — четыре, степень полиномов редукции — три, опорный каталог — UCAC 3.

Оценка предельной звездной величины и точности опорной системы для телескопов ТВТ и КТ-50 осуществлена по более чем 600 кадрам со звездами. Среднее количество опорных звезд на кадре для телескопа ТВТ составило 90, для телескопа КТ-50 — 180. При наблюдении НКО на телескопе ТВТ опорными являются звезды до 11^m , СКО опорной системы составляет $3''$. При наблюдении НКО на телескопе КТ-50 опорными являются звезды до 14^m , СКО опорной системы составляет $0.5''$.

Оценка случайной составляющей погрешности положений НКО. Оценка погрешности положений НКО, полученных в НИИ НАО, осуществлялась в два этапа:

- сравнение положений объектов, сопровождаемых службой ILRS, с эфемеридой ILRS, что позволило выявить систематические ошибки измерения времени наблюдений;

- анализ невязок между наблюдаемыми положениями и вычисленной при расчете элементов орбит эфемеридой, что дает представление об уровне случайной погрешности наблюдений.

По данным наблюдений НКО, для которых получено шесть и более положений на дуге более 3° , были вычислены элементы орбит. При вычислении элементов орбит оценивались невязки между наблюдаемыми и вычисленными положениями НКО. Для расчета орбит НКО использовалось специальное программное обеспечение, разработанное в НИИ АО ОНУ [4]. Расчет начальной орбиты осуществлялся по трем положениям с использованием классического метода Лапласа. Уточнение орбиты проводилось методом дифференциальных поправок на осно-

ве аналитической модели движения (задача двух тел) по всем положениям проводки. Для получения более достоверного вычисления из расчетов исключались положения с большими случайными невязкам по критерию 3σ . Дифференциальные уравнения интегрировались классическим методом Эверхарта 19 порядка с переменным шагом [6]. Модель движения учитывает следующие возмущения: гравитационный потенциал Земли до 150 порядка, влияние Луны, Солнца, Юпитера и Венеры (DE/LE 405), приливы в земной коре (модель Вара), световое давление, сопротивление атмосферы. Результатом вычисления является вектор состояния и оскулирующие элементы орбиты на средний момент времени наблюдений, а также следующие невязки $O - C$: da — по прямому восхождению, $d\delta$ — по склонению, dL — вдоль орбиты, dH — поперек орбиты, dR — линейная невязка (определяется с учетом наклонной дальности). На рис. 1, а приведены невязки 218 положений НКО 20720, полученные по наблюдениям на телевизионном телескопе. Невязки положений по прямому восхождению и склонению составили $\pm 1.57''$. На рис. 1, б приведены невязки 27 положений НКО 13003, полученные по наблюдениям на телескопе КТ-50. Невязки положений составили $\pm 0.68''$ по прямому восхождению и $\pm 0.59''$ по склонению.

Из рис. 1 следует, что выраженной систематической составляющей невязок нет, т. е. полученные положения хорошо описываются численной моделью движения НКО. С использованием 31103 положений были определены элементы орбит и оценены невязки НКО. В табл. 2 приведены погрешности положений НКО, вычисленные по наблюдениям на телескопах ТВТ и КТ-50.

Погрешности положений НКО находятся на уровне СКО опорной системы звезд, что свиде-

Таблица 2. Погрешности положений низкоорбитальных космических объектов по всему массиву наблюдений

Телескоп	Количество положений	СКО da	СКО $d\delta$	СКО dL	СКО dH	СКО dR , м
ТВТ	30317	$2.5''$	$2.5''$	$2.6''$	$2.3''$	38.2
КТ-50	786	$0.6''$	$0.6''$	$0.6''$	$0.5''$	8.3

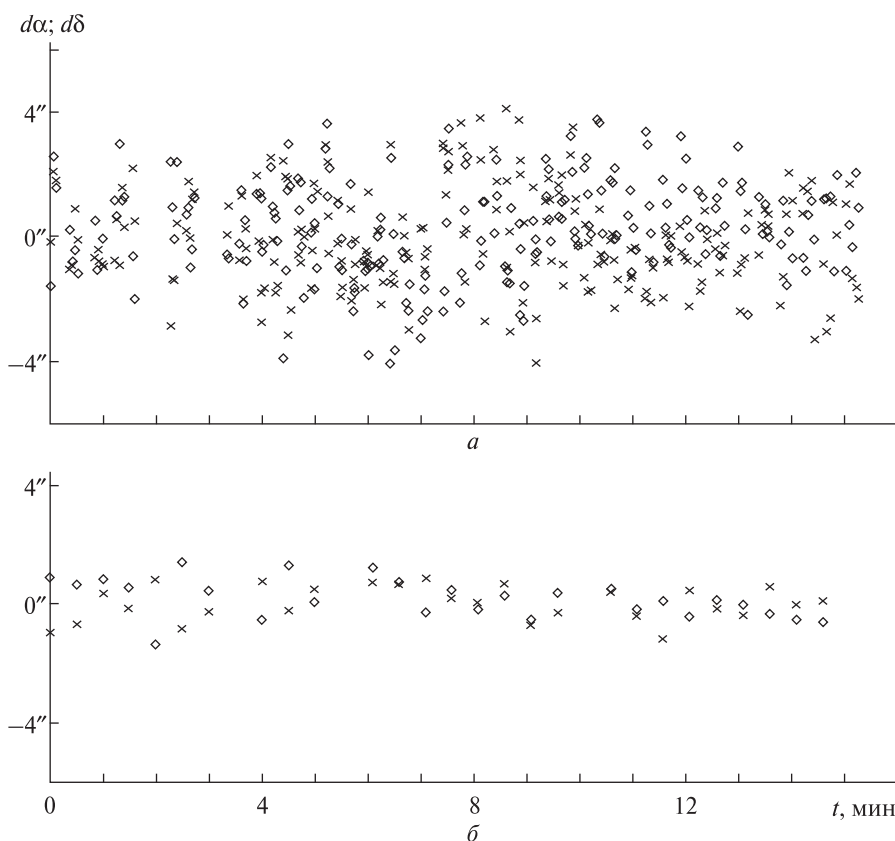


Рис. 1. Невязки расчета орбиты: *a* — по наблюдениям на телескопе ТВТ (объект NORAD 20720, высота орбиты 1503 км), *b* — по наблюдениям на телескопе КТ-50 (объект NORAD 13003, высота орбиты 1719 км). Ромбики — da , крестики — $d\delta$

тellecтвует о корректном определении координат объектов. Для сравнения: деклорированные точности координатных измерений НКО российских станций оптического слежения находятся в пределах 5–10"; лучшие оптические системы наблюдения геосинхронных КО имеют погрешность наблюдений на уровне $\pm 0.3''$, что на расстоянии 40000 км эквивалентно линейной погрешности ± 82 м.

Оценка систематической составляющей положений НКО. Оценка систематической погрешности наблюдений НКО проводилась сравнением положений, полученных из наблюдений, с эфемеридами ILRS. ILRS предоставляет в открытом доступе высокоточные эфемериды для КА, оснащенных уголковыми отражателями. Эфемериды рассчитываются по регулярным наблюдениям сети лазерных дальномеров (англ. Satellite Laser Ranging). Эфемерида, предоставляемая службой ILRS, представляет собой последовательность декартовых геоцентрических

координат спутника в системе ITRS. В данной работе для сравнения наблюдаемых положений НКО с эфемеридой службы ILRS использовалось специальное программное обеспечение, разработанное совместно с НИИ АО ОНУ. Алгоритм сравнения наблюдаемых положений с эфемеридой ILRS включает в себя: поиск и загрузку эфемерид для данного НКО и даты наблюдения; преобразование трехмерных прямоугольных координат эфемериды из системы ITRS в систему ICRS на эпоху J2000.0; внесение в данные наблюдений поправок за годовую, суточную и планетную абберации; определение прямоугольных координат эфемериды на моменты времени наблюдений с использованием интерполяции Лагранжа по 12 точкам; преобразование прямоугольных координат эфемериды к угловым топоцентрическим и определение разностей $O - C$ между наблюдаемыми и вычисленными угловыми топоцентрическими координатами КО. Разности $O - C$ определялись в тех же величинах,

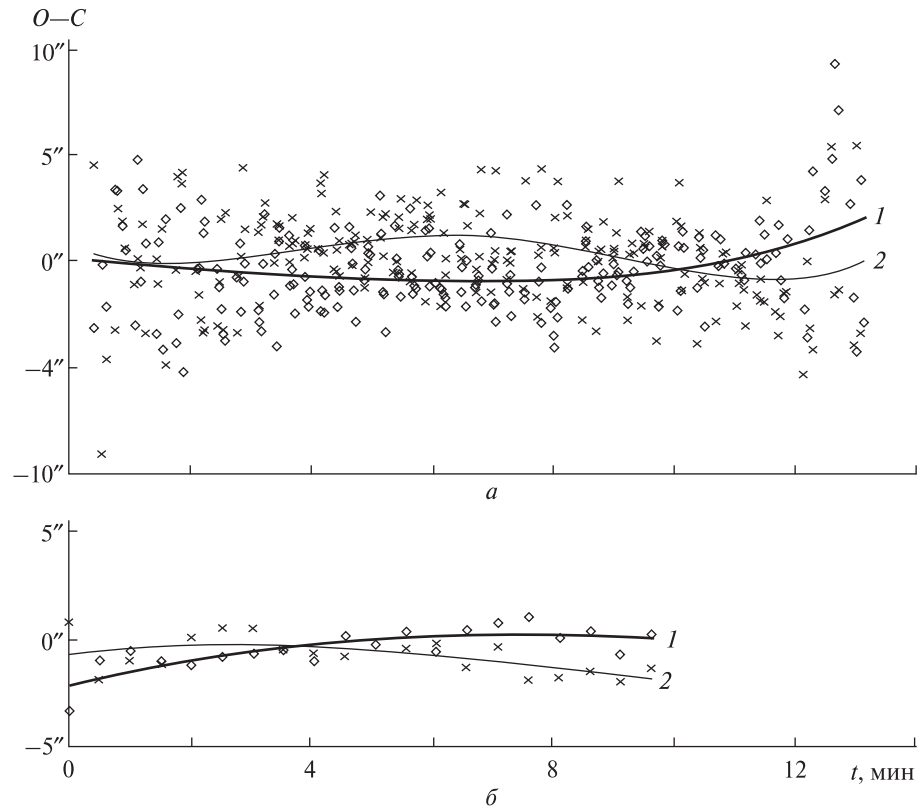


Рис. 2. Значения $O - C$ положений с аппроксимирующей кривой: a — полученные по наблюдениям спутника Jason (высота 1320 км) на телескопе ТВТ, b — по наблюдениям на телескопе КТ-50. Ромбики — $d\alpha$, крестики — $d\delta$, линия 1 — $d\alpha_{\text{ан}}$, линия 2 — $d\delta_{\text{ан}}$

что и невязки расчета орбиты: $d\alpha$, $d\delta$, dL , dH , dR . Дополнительно определялось значение $O - C$ по времени dLt , рассчитываемое через значение $O - C$ вдоль орбиты dL с использованием видимой угловой скорости НКО.

Для вычисления систематических погрешностей наблюдений на телевизионном телескопе использовались 4973 положения семи НКО, на телескопе КТ-50 — 241 положение десяти НКО. В течение наблюдений НКО на одном витке орбиты условия наблюдений изменяются плавно, поэтому среднее значение $O - C$ положений НКО может быть аппроксимировано полиномом. Значения аппроксимирующего полинома $O - C$ обозначаются как $d\alpha_{\text{ан}}$, $d\delta_{\text{ан}}$, $dL_{\text{ан}}$, $dH_{\text{ан}}$. На рис. 2 приведены значения $O - C$ проводок НКО с аппроксимирующей кривой для телескопов ТВТ и КТ-50.

Для телескопа ТВТ средние значения $O - C$ составили $-0.36''$ по прямому восхождению и $+0.11''$ по склонению, СКО аппроксимирующей

кривой $O - C$ составило $\pm 0.79''$ по прямому восхождению и $\pm 0.75''$ по склонению. Для телескопа КТ-50 значения $O - C$ составили $-0.43''$ по прямому восхождению и $-0.78''$ по склонению, СКО аппроксимирующей кривой $O - C$ составило $\pm 0.85''$ по прямому восхождению и $\pm 0.93''$ по склонению.

СКО аппроксимирующих кривых $O - C$ по всему каталогу приведены в табл. 3.

Определение поправки моментов времени наблюдений. Из-за большой видимой скорости НКО на точность получаемых положений сильно влияют погрешности определения моментов времени ПЗС-кадров. Например, при наблюдении НКО с видимой скоростью 0.2 град/с погрешность времени в 0.001 с приводит к угловой ошибке $0.72''$ вдоль орбиты. Различные задержки в электронном оборудовании вносят постоянную ошибку в моменты времени получаемых кадров, что требует учета поправки времени dt .

Таблица 3. СКО аппроксимирующих кривых $O - C$ по всему каталогу

Телескоп	Количество $O - C$	$d\alpha$	$d\delta$	$dL_{\text{ан}}$	$dH_{\text{ан}}$
ТВТ	4973	1.5"	1.5"	1.4"	1.6"
КТ-50	241	1.0"	1.3"	1.2"	1.1"

Таблица 4. Расчет поправки времени dt для телескопов ТВТ и КТ-50

dt	$d\alpha_{\text{ан}}$	$d\delta_{\text{ан}}$	$dL_{\text{ан}}$	$dH_{\text{ан}}$	Среднее dLt
Телескоп ТВТ					
0.0000	2.31	2.05	2.68	1.65	−0.0031
−0.0031	1.56	1.46	1.44	1.58	−0.0005
−0.0036	1.48	1.45	1.37	1.58	−0.0001
Телескоп КТ-50					
0.0000	1.36	1.77	1.95	1.21	0.0025
0.0025	0.99	1.34	1.17	1.11	−0.0001

Поправка dt времени наблюдений принималась как среднее значение $O - C$ сравнения с эфемеридой ILRS по времени dLt . Для проверки корректности внесенной поправки по времени осуществлялся повторный расчет $O - C$ и оценивалось изменение СКО аппроксимирующих кривых $O - C$ по прямому восхождению и склонению. Если новое среднее значение $O - C$ по времени dLt превосходило ± 0.0001 с, это значение прибавлялось к поправке dt времени наблюдений.

Поправка времени dt рассчитывалась по всем значениям $O - C$: для телескопа ТВТ по 4973 положениям, для телескопа КТ-50 по 241 положению. Значения рассчитанных поправок времени dt для телескопов ТВТ и КТ-50 приведены в табл. 4. Видно, что внесение поправки времени dt приводит к существенному уменьшению СКО аппроксимирующих кривых $O - C$ по склонению и прямому восхождению.

ВЫВОДЫ

1. За 2011–2012 гг. в НИИ НАО получено 41840 положений 241 НКО (на телевизионном телескопе 40441 положений 195 НКО; на телескопе КТ-50 1399 положений 46 НКО). Эффективность примененного метода наблюдений подтверждается наличием наблюдений микроспутников

класса RapidEye на телевизионном телескопе и наноспутников CubeSat на телескопе КТ-50.

2. Случайная погрешность положений, полученных на телевизионном телескопе, составила $\pm 2.5''$, на телескопе КТ-50 — $\pm 0.6''$. Определена средняя систематическая погрешность положений, которая составила $\pm 1.5''$ для наблюдений на телевизионном телескопе и $1.2''$ на телескопе КТ-50.

1. Базей А. А., Кара И. В. Применение методов Эверхарта 15, 17, 19, 21 порядков для вычисления траектории движения небесных тел в околопланетном пространстве // Вісник Астрон. школи. — 2009. — 6, № 2. — С. 155–157.
2. Ковальчук А. Н., Пинигин Г. И., Шульга А. В. Скоростной автоматический комплекс для регистрации небесных объектов естественного и искусственного происхождения в околоземном космическом пространстве // Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы. — М.: ИНАСАН, 2000. — С. 361–371.
3. Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Шульга А. В. Исследование точности астрометрической редукции при использовании комбинированного метода наблюдений небесных объектов // Космічна наука і технологія. — 2010. — 16, № 5. — С. 71–76.
4. Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Шульга А. В. Координатные наблюдения низкоорбитальных объектов

околоземного космического пространства с использованием режима синхронного накопления телевизионных кадров // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 3. — С. 83—87.

5. Шульга А. В., Козырев Е. С., Сибирякова Е. С. и др. Мобильный комплекс телескопов НИИ НАО для наблюдений объектов околоземного космического пространства // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 4. — С. 52—58.
6. Kara V. Monitoring the accuracy of observations of passive objects on the basis of the International Laser Ranging Service (ILRS) data // Odessa Astron. Publs. — 2010. — 22. — P. 20—24.
7. Shulga O., Kozryev Y., Sybiryakova Y. Observation of the fast NEO objects with prolonged exposure // roc. of IAU Symposium N 248 «A Giant Step: From Milli- to Micro-arcsecond Astrometry». — Shanghai, 2007. — P. 128—129.
8. Shulga O., Kozryev Y., Sybiryakova Y. Observation of NEO having high apparent rates with Mobitel telescope // Proc. of Gaia follow-up network for solar system objects workshop held at IMCCE — Paris observatory, France — 2011. — P. 97—100.

Стаття надійшла до редакції 21.10.13

В. С. Вовк, Є. С. Козирев, М. О. Куліченко,
Є. С. Сибирякова, О. В. Шульга

ПЕРШІ РЕЗУЛЬТАТИ РЕГУЛЯРНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ НИЗЬКООРБІТАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ В НДІ «МИКОЛАЇВСЬКА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ»

Наводяться результати спостережень низькоорбітальних космічних об'єктів комбінованим ПЗЗ-методом, характеристики точності опорної системи та результати порівняння отриманих положень космічних об'єктів з ефемеридою International Laser Ranging Service.

V. S. Vovk, Y. S. Kozryev, N. A. Kulichenko,
Y. S. Sybiryakova, O. V. Shulga

FIRST RESULTS OF REGULAR OBSERVATIONS OF LOW EARTH SPACE OBJECTS IN THE RI “NIKOLAEV ASTRONOMICAL OBSERVATORY”

We present some results of observations of low Earth satellites with the use of combined CCD-method, our value for the reference system accuracy and some results of comparisons of satellite positions with ephemerides of International Laser Ranging Service.

Б. А. Атаманенко, Н. Є. Редчиць

Державне космічне агентство України, Київ

ТРАНСПАРЕНТНІСТЬ ТА ЗМІЦНЕННЯ ДОВІРИ В КОСМОСІ

Представлено інформацію стосовно дослідження питання прозорості та зміцнення довіри в космосі; відзначено роботу Групи урядових експертів ООН із заходів прозорості та зміцнення довіри в космосі та результати цієї роботи; визначено основні характеристики заходів прозорості та зміцнення довіри в космічній діяльності; представлені їхні основні категорії і ті заходи, які застосовує Україна при здійсненні нею космічної діяльності. Вказані сучасні міжнародні ініціативи, пов'язані із заходами прозорості та зміцнення довіри в космосі. Запропоновано на розгляд проект Міжнародного кодексу поведінки в космосі, який розроблений Європейським Союзом та обговорюється міжнародною спільнотою з 2008 року.

Космічний простір є дуже важливим ресурсом для людства. 4 жовтня 1957 року ніхто навіть не підозрював, що вже через 50 років космічні технології стануть частиною життя кожної людини: телевізійне мовлення, супутниковий зв'язок, навігація, прогнозування погоди, попередження стихійних лих, телемедицина. Вся ця діяльність вимагає виведення на навколоромовну орбіту все більшої кількості супутників. Вже сьогодні більше тисячі активних супутників знаходиться в космічному просторі, і більше 60 країн світу, державних структур та приватних установ володіють космічними засобами та користуються ними.

Але космічний простір не є нескінченним ресурсом, тому його використання такою великою кількістю учасників вимагає застосування певних заходів безпеки космічної діяльності та забезпечення прозорості й зміцнення довіри в космосі.

Заходи прозорості та зміцнення довіри в космічній діяльності є частиною більш широкого комплексу заходів такого роду. В цілому заходи прозорості та зміцнення довіри представляють собою інструмент, за допомогою якого держави можуть обмінюватись інформацією в цілях формування взаємної довіри і тим самим сприяти припиненню військової конфронтації та зміцненню регіональної і глобальної стабільності. Заходи прозорості та зміцнення довіри у сфері космічної діяльності можуть сприяти підвищенню ступеня безпеки та стабільності повсякденних космічних операцій та сприяти зміцненню взаєморозуміння та дружніх відносин між державами та народами.

© Б. А. АТАМАНЕНКО, Н. Є. РЕДЧИЦЬ, 2013

ІСТОРІЯ ПИТАННЯ

Питання прозорості та зміцнення довіри в космосі на міжнародному рівні досліджується з початку 90-х років. Вже в своїх резолюціях 45/55 В від 4 грудня 1990 року¹ та 48/74 В від 16 грудня 1993 року² Генеральна асамблея Організації Об'єднаних Націй (ООН) підкреслювала необхідність більшої прозорості та підтверджувала важливість заходів зміцнення довіри. Вперше питання заходів прозорості та зміцнення довіри в космічній діяльності на міжнародному експертному рівні було розглянуто у 1993 році. 15 жовтня 1993 року Генеральному секретареві ООН була представлена доповідь урядових експертів, в додатку до якої міститься дослідження про застосування заходів зміцнення довіри в космічному просторі (A/48/305)³.

Наступним кроком з дослідження питання прозорості та зміцнення довіри в космосі стала резолюція Генеральної Асамблеї ООН 65/68⁴ 2010 року, якою була заснована друга Група урядових експертів ООН із заходів прозорості та зміцнення довіри в космосі.

Основною метою роботи цієї Групи було проведення дослідження про заходи прозорості та

¹ <http://daccess-dds-ny.un.org/doc/RESOLUTION/GEN/NR0569/60/IMG/NR056960.pdf?OpenElement>

² <http://daccess-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N94/010/75/PDF/N9401075.pdf?OpenElement>

³ <http://daccess-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N93/445/76/PDF/N9344576.pdf?OpenElement>

⁴ <http://daccess-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N10/516/64/PDF/N1051664.pdf?OpenElement>

зміцнення довіри, враховуючи сучасні тенденції космічної діяльності. До Групи увійшли експерти від 15 держав-членів ООН, а саме: Бразилії, Великобританії, Італії, Казахстану, Китаю, Нігерії, Південної Африки, Республіки Корея, Російської Федерації, Румунії, Сполучених Штатів Америки, України, Франції, Чилі та Шрі-Ланки. Головуючим групи був призначений експерт від Російської Федерації В. Л. Васильєв (заступник Постійного представника Постійного представництва РФ при ООН та інших міжнародних організаціях в Женеві).

Група урядових експертів провела три засідання: 23—27 липня 2012 року в Нью-Йорку, 1—5 квітня 2013 року в Женеві та 8—12 липня 2013 року знову в Нью-Йорку.

ЗАХОДИ ТРАНСПАРЕНТНОСТІ ТА ЗМІЦНЕННЯ ДОВІРИ, ВИКЛАДЕНІ В ДОПОВІДІ ГРУПИ УРЯДОВИХ ЕКСПЕРТІВ

За результатами трьох зазначених вище засідань Групою урядових експертів ООН із заходів транспарентності та зміцнення довіри в космосі була підготовлена розширена та ґрунтовна доповідь, викладена в документі ООН A/68/189⁵. Зазначена доповідь була представлена Генеральному секретареві ООН, і на сьогодні очікується прийняття відповідної резолюції Генеральної асамблеї ООН.

В доповіді було відзначено, що заходи транспарентності та зміцнення довіри в тій чи іншій формі вже передбачені рядом міжнародних документів, які стосуються космічного простору, зокрема: Договором про принципи діяльності держав щодо дослідження і використання космічного простору, включаючи Місяць та інші небесні тіла (1967); Угодою про порятунок космонавтів, повернення космонавтів і повернення об'єктів, запущених у космічний простір (1968); Конвенцією про міжнародну відповідальність за збитки, заподіяні космічними об'єктами (1972); Конвенцією про реєстрацію об'єктів, що запускаються у космічний простір (1975), Гаазьким кодексом поведінки проти розповсюдження балістичних ракет (2002) та іншими. Цими документами передбачається, серед іншого: інформування в максимально можливому та практично реалізованому ступені Генерального секретаря Організації Об'єднаних Націй, загалу та міжнародної наукової спільноти про характер, хід та результати діяльності в космічному просторі; пред-

ставлення даних про запущені космічні об'єкти та космічні об'єкти, які припинили своє існування на орбітах або змінили раніше заявлену орбіту; співпраця у спільному вирішенні проблем та інші.

Також Групою було відмічено, що деякі держави застосовують ряд заходів транспарентності та зміцнення довіри в космосі на основі двосторонніх домовленостей, а також в односторонньому ініціативному порядку.

Але всі зазначені заходи транспарентності та зміцнення довіри не є всеохопними як за різними видами космічної діяльності, так і за участю держав, що їх застосовують. Це пояснюється тим, що космічна діяльність тільки останнє десятиліття стала доступною для більш ніж 130 країн світу.

Доповідь Групи урядових експертів ґрунтується на:

- доповіді Генерального секретаря «Дослідження про застосування заходів зі зміцнення довіри в космічному просторі» (A/48/305⁶);
- інформації держав-членів ООН, направленої Генеральному секретареві ООН, щодо діючих заходів транспарентності та зміцнення довіри в космосі (A/65/123 та Add.1⁷);
- пропозиціях експертів та держав, не представлених в Групі;
- діючих міжнародних договорах, що стосуються космічного простору, та двосторонніх договірних заходах транспарентності та зміцнення довіри в космосі;
- результатах роботи Робочої групи з довготривалої сталості космічної діяльності Комітету ООН з використання космічного простору у мирних цілях;
- проведених консультаціях з представниками міжурядових організацій, які займаються питаннями вивчення та використання космічного простору у мирних цілях (Конференції з роззброєння, Комітету ООН з використання космічного простору в мирних цілях, Міжнародного Союзу електрозв'язку та Всесвітньої метеорологічної організації).

Групою урядових експертів консесуально було погоджено ряд заходів транспарентності та зміцнення довіри в космічній діяльності та рекомендовано державам враховувати та застосовувати їх на добровільній основі. Але деякі заходи транспарентності та зміцнення довіри, представлені в доповіді, передбачені діючими міжнародними договорами, що озна-

⁵ <http://daccess-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N13/408/37/PDF/N1340837.pdf?OpenElement>

⁶ <http://daccess-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N93/445/76/PDF/N9344576.pdf?OpenElement>

⁷ <http://daccess-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N10/448/69/PDF/N1044869.pdf?OpenElement>

чає, що ці заходи є заходами юридично обов'язкового характеру.

В рамках роботи Групи урядових експертів були визначені наступні категорії значимих заходів транспарентності та зміцнення довіри в космічній діяльності:

а) загальні заходи із забезпечення транспарентності та зміцнення довіри, націлені на підвищення ступеня доступності інформації про космічну політику держав, які беруть участь в космічній діяльності;

б) обмін інформацією про програми розробки нових космічних систем, а також інформацією про діючі системи космічного базування, які забезпечують послуги широкого використання, наприклад ведення метеорологічних спостережень або ж глобальне позиціонування, навігація та визначення часу;

в) чітке викладення прийнятих державами принципів та цілей, які стосуються їхньої діяльності з дослідження та використання космічного простору в мирних цілях;

г) конкретні заходи з обміну інформацією, націлені на підвищення доступності інформації про об'єкти, які перебувають у космічному просторі, та їхніх загальних задач, зокрема об'єкти, які знаходяться на навколосезній орбіті;

д) заходи, які стосуються визначення норм поведінки стосовно безпеки космічних польотів, такі як направлення повідомлень про запуски та проведення консультацій в цілях недопущення потенційно шкідливого втручання, обмеження об'ємів космічного сміття та мінімізації ризиків зіткнень з іншими космічними об'єктами;

є) заходи в рамках міжнародного співробітництва в космічній діяльності, включаючи заходи з нарощування потенціалу та поширення даних в інтересах забезпечення економічного та соціального розвитку з урахуванням діючих міжнародних зобов'язань та обов'язків⁸.

ЗАХОДИ ТРАНСПАРЕНТНОСТІ НА ЗМІЦНЕННЯ ДОВІРИ В КОСМОСІ В УКРАЇНІ

Україна у сфері космічної діяльності вела і веде політику прозорості та відкритості і активно підтримує діяльність міжнародної спільноти щодо дослідження питань транспарентності та зміцнення довіри в космосі. Зокрема, як зазначалось раніше, експерт від України брав участь у підготовці доповіді Групи урядових

експертів ООН; представники України взяли участь в регіональному семінарі Інституту ООН з питань досліджень проблем роззброєння (ЮНІДІР) «Зміцнення довіри до космічної діяльності в Євразійському просторі через норми поведінки»⁹, який відбувся в жовтні 2013 року у м. Астана (Республіка Казахстан); Україна є активною учасницею переговорного процесу з питань підготовки Міжнародного кодексу поведінки в космосі.

Україна застосовує як заходи транспарентності, передбачені Договорами ООН з космосу, іншими міжнародними договорами України та міжнародними документами, які не є юридично обов'язковими¹⁰,

⁹ <http://www.unidir.org/programmes/emerging-security-threats/facilitating-the-process-for-the-development-of-an-international-code-of-conduct-for-outer-space-activities/building-confidence-for-eurasian-space-activities-through-norms-of-behaviour>

¹⁰ Договір про принципи діяльності держав щодо дослідження і використання космічного простору, включаючи Місяць та інші небесні тіла (1967); Угода про порятунок космонавтів, повернення космонавтів і повернення об'єктів, запущених у космічний простір (1968); Конвенція про міжнародну відповідальність за збитки, заподіяні космічними об'єктами (1972); Конвенція про реєстрацію об'єктів, що запускаються у космічний простір (1975); Статут та Конвенцію Міжнародного Союзу Електрозв'язку та його Регламент Радіозв'язку, зі змінами; Договір про заборону ядерних випробувань в атмосфері, космічному просторі та під водою (1963); Договір про всеосяжну заборону ядерних випробувань (1996); Міжнародне співробітництво в галузі мирного використання космічного простору, прийняте Резолюцією Генеральної Асамблеї ООН (ГА ООН) 1721 (грудень 1961); Декларація правових принципів діяльності держав з дослідження та використання космічного простору, прийнята Резолюцією ГА ООН 1962 (XVIII) (1963); Принципи використання ядерних джерел енергії в космічному просторі, прийняті Резолюцією ГА ООН 47/68 (1992); Декларація про міжнародне співробітництво в дослідженні та використанні космічного простору на користь та в інтересах усіх держав, з особливим урахуванням потреб країн, що розвиваються, прийнята Резолюцією ГА ООН 51/122 (1996); Міжнародний кодекс поведінки проти розповсюдження балістичних ракет (2002), схвалений резолюціями ГА ООН 59/91 (2004), 60/62 (2005), 63/64 (2008) та 65/73 (2010); Рекомендації виходячи з практики держав та міжнародних організацій щодо реєстрації космічних об'єктів, закріплені Резолюцією ГА ООН 62/101 (2007); Керівні принципи Комітету ООН з мирного використання космічного простору щодо зменшення космічного сміття, закріплені Резолюцією ГА ООН 62/217 (2007).

⁸ Доповідь Групи урядових експертів із заходів транспарентності та зміцнення довіри в космосі A/68/187

так і ті, що не встановлені жодним міжнародним документом.

Основні заходи транспарентності та зміцнення довіри в космосі, які застосовує Україна, викладено на офіційній веб-сторінці Державного космічного агентства України (www.nkau.gov.ua), а саме:

- про державну політику у сфері космічної діяльності;
- про участь України у міжнародних космічних проектах;
- про діюче законодавство у сфері космічної діяльності;
- про міжнародні договори у сфері космічної діяльності, учасницею яких є Україна;
- про проекти нормативно-правових актів у сфері космічної діяльності;
- про космічні комплекси України;
- про пуски ракет-носіїв, виробництва України;
- про космічну продукцію, що виготовляється підприємствами, установами та організаціями України;
- про підприємства, установи та організації космічної галузі.

Україна щорічно інформує Генерального секретаря ООН про характер, хід, місце та результати космічної діяльності, а також подає інформацію про космічні апарати, які запущені у космічний простір та внесені до Державного реєстру космічних апаратів України.

Україна, яка має регіональне відділення підтримки програми Спайдер-ООН, надає громадськості та заінтересованим державам інформацію про попередження та ліквідацію надзвичайних ситуацій та екстреного реагування.

Україна на постійній основі надає інформацію відповідно до вимог Керівних принципів Режиму контролю за ракетними технологіями та Гаазького кодексу поведінки про нерозповсюдження балістичних ракет.

В рамках багатостороннього, регіонального та двостороннього співробітництва на договірній основі Україна:

- обмінюється науково-технічною інформацією;
- обмінюється знаннями, досвідом, спеціалістами та вченими;
- бере участь у спільних космічних проектах;
- організовує спільні симпозиуми, семінари та інше.

Україна в особі її підприємств, установ та організацій бере участь в міжнародних космічних виставках, заходах міжнародних організацій, міжнародних форумах та ініціативах з питань космічної діяльності.

МІЖНАРОДНІ ІНІЦІАТИВИ СТОСОВНО ЗАХОДІВ ТРАНСПАРЕНТНОСТІ ТА ЗМІЦНЕННЯ ДОВІРИ В КОСМОСІ

На сьогодні питанням забезпечення більшої транспарентності та зміцнення довіри в космосі переймаються не тільки міжнародні організації, а й регіональні міждержавні структури та окремі держави. Так, в 2008 році були започатковані дві ініціативи з розробки міжнародних документів: Міжнародний кодекс поведінки в космосі¹¹ та Договір про запобігання розміщення зброї в космічному просторі, застосування сили або загрози силою стосовно космічних об'єктів¹². Ці дві ініціативи були підтримані Україною.

Розробка Договору про запобігання розміщення зброї в космічному просторі, застосування сили або загрози силою стосовно космічних об'єктів є ініціативою Російської Федерації та Китаю, яка була започаткована в лютому 2008 року. Проект Договору як юридично обов'язкового міжнародного документу передбачає положення щодо здійснення на добровільній основі, якщо про інше не буде домовленості, погоджувати заходи зміцнення довіри. Російсько-китайська ініціатива позитивно оцінена багатьма країнами-учасницями космічної діяльності. Проект Договору внесений на розгляд Конференції з роззброєння з так званим дослідницьким мандатом. Тобто, по суті це живий документ, який буде враховувати результати широкої міжнародної дискусії по кожній із внесених пропозицій. На цей час багато держав вже подали свої пропозиції з уточнення, деталізації та коректування положень проекту Договору.

Ініціатива щодо розробки Міжнародного кодексу поведінки в космосі була започаткована в грудні 2008 року Європейським Союзом. Метою зазначеного Кодексу є зміцнення безпеки та стабільності космічної діяльності. Кодекс не є юридично обов'язковим, і приєднання до нього є відкритим для всіх держав на добровільній основі. Кодекс врегульовує космічну діяльність стосовно всіх космічних об'єктів, запущених на земну орбіту або за її межі, яка проводиться Державою, що підписалась, або спільно з іншими Державами чи неурядовими установами, які перебувають під юрисдикцією Держави, що підписалась, включаючи ту діяльність, яка провадиться в рамках міжнародних міждержавних організацій. Кодекс формує режим захо-

¹¹ Див. текст Кодексу в Додатку 1

¹² Див. текст Договору на сайтах: http://www.geneva.mid.ru/disarm/23_rus.html; http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/convdrafts.shtml

дів транспарентності та зміцнення довіри з метою побудови взаєморозуміння та довіри як для припинення конфронтації, так і для зміцнення національної, регіональної та глобальної безпеки й стабільності.

Зазначений проект Кодексу теж був представлений Конференції з роззброєння. Також в розвиток резолюції Генеральної Асамблеї ООН «Заходи із забезпечення транспарентності та зміцнення довіри в космічній діяльності»¹³ був представлений документ від ЄС, в якому говориться про проект Кодексу стосовно космічної діяльності, і зазначається, що зазначений проект містить основоположні норми, направлені на зниження ризику зіткнень та появи космічного сміття, а також зміцнення взаєморозуміння між державами. Хоча текст Міжнародного кодексу поведінки в космосі і був представлений в органах системи ООН, він на сьогодні обговорюється поза рамками ООН.

Після проведення ряду двосторонніх переговорів з державами-учасниками космічної діяльності 5 червня 2012 року Європейський Союз на багатонаціональній зустрічі у Відні презентував другу версію проекту Кодексу. 16-17 травня 2013 року Європейська служба зовнішньої діяльності разом із Державним космічним агентством України та Міністерством закордонних справ України провели в м. Києві перші Відкриті консультації з питань Кодексу, в результаті яких була підготовлена нова редакція проекту Кодексу. В період з 20 по 22 листопада у м. Бангкок (Королівство Таїланд) відбулись Другі Відкриті консультації, де учасники заходу представили їхні позиції стосовно поточного тексту під час його постатейного обговорення. Відсутність тексту Кодексу в українській версії, на жаль, не дозволила широкому загалу космічної спільноти України взяти участь в представленні своїх зауважень до Кодексу. Тому ми представляємо останню редакцію Міжнародного кодексу поведінки в космосі українською мовою (див. додаток) на розсуд читачів з метою отримання їхніх коментарів, що, сподіваємось, дозволить його покращити.

ВИСНОВКИ

Заходи із забезпечення транспарентності та зміцнення довіри в космічній діяльності сприяють підвищенню обізнаності про космічну політику держав, безпеки та передбачуваності використання космічного простору.

¹³ www.un.org (A/RES/63/68)

Враховуючи важливість відкритості і прозорості космічної діяльності, державам та міжнародним організаціям необхідно застосовувати заходи транспарентності та зміцнення довіри в космосі. Ці заходи повинні застосовуватись у максимально можливому та практично реалізованому ступені, відповідно до міжнародних зобов'язань та враховуючи національні інтереси держав.

Стаття надійшла до редакції 12.12.13

Б. А. Атаманенко, Н. Е. Редчиц

TRANSPARENCY AND CONFIDENCE-BUILDING MEASURES IN OUTER SPACE

Отмечается важность мер транспарентности и укрепления доверия в космосе. Представлена информация по исследованию вопроса транспарентности и укрепления доверия в космосе; отмечены работа Группы правительственных экспертов ООН по мерам транспарентности и укрепления доверия в космосе и результат этой работы; определены основные характеристики мер транспарентности и укрепления доверия в космической деятельности; представлены их основные категории и те меры, которые применяет Украина при осуществлении ею космической деятельности. Указаны современные международные инициативы, связанные с мерами транспарентности и укрепления доверия в космосе. Предложен на рассмотрение проект Международного кодекса поведения в космосе, который разработан Европейским Союзом и обсуждается международным сообществом с 2008 года.

Б. А. Атаманенко, Н. Е. Редчиц

TRANSPARENCY AND CONFIDENCE-BUILDING MEASURES IN OUTER SPACE

The importance of transparency and confidence-building measures in outer space is noted. We present information on the study of the transparency and confidence-building measures in outer space. The work of the UN Group of Governmental Experts on Transparency and Confidence-Building Measures in Outer Space Activities and the result of this work are mentioned. The basic characteristics of transparency and confidence-building measures in outer space activities are considered. Their main categories and some measures applied by Ukraine in performing its outer space activities are presented. Current international initiatives related to transparency and confidence-building measures in outer space are listed. The draft International Code of Conduct for Outer Space Activities which was developed by the European Union and has been discussed by the international community since 2008 is proposed for consideration.

Міжнародний кодекс поведінки в космосі

Проект від 23.11.2013 р.

Преамбула

Держави, що підписались,

З метою збереження подальшого мирного та сталого використання космічного простору для сучасних і майбутніх поколінь та у дусі більш тісного міжнародного співробітництва, співпраці, більшої відкритості та прозорості;

Вважаючи, що діяльність з дослідження та використання космічного простору у мирних цілях відіграє ключову роль в соціальному, економічному, науковому та технологічному розвитку всіх держав, в управлінні глобальними проблемами, такими як збереження навколишнього середовища, управління стихійними лихами, та в зміцненні національної безпеки та у забезпеченні міжнародного миру і безпеки;

Відзначаючи, що всі держави, як космічні, так і некосмічні, повинні робити більший вклад у сприяння та зміцнення міжнародного співробітництва, пов'язаного з цією діяльністю;

Усвідомлюючи потребу для якомога ширшого дотримання відповідних існуючих міжнародних документів, які сприяють використанню космічного простору у мирних цілях;

В подальшому усвідомлюючи те, що космічна діяльність та космічні засоби, включаючи пов'язані наземні та космічні сегменти, а також підтримувальні канали зв'язку, є життєво важливими для національної безпеки та збереження міжнародного миру і безпеки;

Нагадуючи про зростаючу важливість розробки заходів транспарентності та зміцнення довіри в космосі у світлі збільшення використання космічного простору урядовими та неурядовими установами;

Враховуючи те, що космічне сміття впливає на стале використання космічного простору, становить небезпеку для космічної діяльності та потенційно обмежує ефективне розміщення та використання відповідних космічних засобів;

Будучи впевненими, що багатосторонній кодекс поведінки, націлений на покращення безпеки та сталості космічної діяльності, може стати корисним доповненням міжнародного права, як воно застосовується до космосу;

Беручи до уваги те, що учасники-засновники космічної діяльності отримали знання стосовно загальної практики зміцнення безпеки та сталості космічної діяльності, які можуть ефективно стати доступними іншим Державам, що підписались, на благо всіх;

Підтверджуючи діючі зобов'язання вирішувати будь-який конфлікт, що стосується діяльності у космічному просторі, мирними засобами;

Усвідомлюючи необхідність всеохопного підходу до безпеки у космічному просторі;

Підтверджуючи їхню прихильність Статуту Організації Об'єднаних Націй;

Без завдання шкоди теперішній та майбутній роботі на інших відповідних міжнародних форумах, таких як Комітет ООН з мирного використання космічного простору у мирних цілях і Конференція з роззброєння;

Приєднуються до викладеного нижче Міжнародного кодексу поведінки в космосі (надалі — «Кодекс»)

I. Мета, сфера застосування та загальні принципи

1. Мета і сфера застосування

1.1. Метою цього Кодексу є зміцнення безпеки та стабільності космічної діяльності.

1.2. Цей Кодекс врегульовує космічну діяльність стосовно всіх космічних об'єктів, запущених на земну орбіту або за її межі, яка проводиться Державою, що підписалась, або спільно з іншими Державами чи неурядовими установами, які перебувають під юрисдикцією Держави, що підписалась, включаючи ту діяльність, яка провадиться в рамках міжнародних міжурядових організацій.

1.3. Цей Кодекс формує режим заходів транспарентності та зміцнення довіри з метою побудови взаєморозуміння та довіри, допомоги, як для припинення конфронтації, так і для зміцнення національної, регіональної та глобальної безпеки і стабільності, і є доповненням нормативної бази, що регулює космічну діяльність.

1.4. Приєднання до цього Кодексу відкрите для всіх держав на добровільній основі. Цей Кодекс не є юридично обов'язковим.

2. Загальні принципи

Держави, що підписались, вирішують дотримуватися таких принципів:

- свобода для всіх Держав, відповідно до міжнародного права та міжнародних зобов'язань, мати доступ, досліджувати та використовувати космічний простір у мирних цілях без завдання шкідливих втручань, цілком поважаючи безпеку і цілісність космічних об'єктів, та відповідно до міжнародної прийнятої практики, експлуатаційних процедур, технічних стандартів і політик, пов'язаних із довгостроковою стабільністю космічної діяльності, включаючи, серед іншого, безпечне ведення космічної діяльності;
- відповідальність держав утримуватись від загрози силою або застосування сили проти територіальної цілісності або політичної незалежності будь-якої держави, або від будь-якого способу, який не відповідає цілям Статуту Організації Об'єднаних Націй, та невід'ємне право держав на індивідуальну та колективну самооборону, як це визнано у Статуті Організації Об'єднаних Націй;
- відповідальність Держав застосувати всі відповідні заходи та співпрацювати на основі доброї волі з метою недопущення шкідливого втручання у космічну діяльність; та
- відповідальність Держав при проведенні наукової, цивільної, комерційної та військової діяльності для забезпечення мирного дослідження та використання космічного простору на благо та в інтересах людства, та вжиття всіх відповідних заходів, щоб не допустити перетворення космічного простору на зону конфлікту.

3. Дотримання та підтримка договорів, конвенцій та інших зобов'язань, що пов'язані з космічною діяльністю

3.1. Держави, що підписались, знову підтверджують свою прихильність Статуту Організації Об'єднаних Націй та діючим договорам, принципам і керівництвам стосовно космічної діяльності, учасниками яких вони є або до яких вони приєднались. Вони повторно підтверджують свою підтримку у сприянні зусиль з метою стимулювання універсального прийняття, виконання та повного дотримання таких міжнародних документів:

- а) діючі міжнародно-правові документи, що регулюють діяльність у космічному просторі, включаючи:
 - Договір про принципи діяльності держав щодо дослідження і використання космічного простору, включаючи Місяць та інші небесні тіла (1967 р.);
 - Угоду про порятунок космонавтів, повернення космонавтів і повернення об'єктів, запущених у космічний простір (1968 р.);
 - Конвенцію про міжнародну відповідальність за збитки, заподіяні космічними об'єктами (1972 р.);
 - Конвенцію про реєстрацію об'єктів, що запускаються у космічний простір (1975 р.);
 - Статут та Конвенцію Міжнародного Союзу Електрозв'язку та його Регламент Радіозв'язку, зі змінами;
 - Договір про заборону ядерних випробувань в атмосфері, космічному просторі та під водою (1963 р.) та Договір про всеосяжну заборону ядерних випробувань (1996 р.);
- б) декларації, принципи, рекомендації та керівництва, включаючи:
 - Міжнародне співробітництво в галузі мирного використання космічного простору, прийняте Резолюцією Генеральної Асамблеї ООН (ГА ООН) 1721 (грудень 1961 р.);
 - Декларацію правових принципів діяльності держав з дослідження та використання космічного простору, прийняту Резолюцією ГА ООН 1962 (XVIII) (1963 р.);
 - Принципи використання ядерних джерел енергії в космічному просторі, прийняті Резолюцією ГА ООН 47/68 (1992 р.);
 - Декларацію про міжнародне співробітництво в дослідженні та використанні космічного простору на користь та в інтересах усіх держав, з особливим урахуванням потреб країн, що розвиваються, прийняту Резолюцією ГА ООН 51/122 (1996 р.);
 - Міжнародний кодекс поведінки проти розповсюдження балістичних ракет (2002), схвалений резолюціями ГА ООН 59/91 (2004 р.), 60/62 (2005 р.), 63/64 (2008 р.) та 65/73 (2010 р.);
 - Рекомендації виходячи з практики держав та міжнародних організацій щодо реєстрації космічних об'єктів, закріплені Резолюцією ГА ООН 62/101 (2007 р.);
 - Керівні принципи Комітету ООН з мирного використання космічного простору щодо зменшення космічного сміття, закріплені Резолюцією ГА ООН 62/217 (2007 р.).

II. Безпека та стабільність космічної діяльності

4. Заходи із космічних операцій та зменшення космічного сміття

4.1. Держави, що підписались, вирішують встановити та виконувати політику і процедури з метою мінімізації ризику нещасних випадків у космосі, зіткнення між космічними об'єктами чи будь-якого шкідливого втручання в мирне дослідження та використання космічного простору іншою державою.

4.2. Держави, що підписались, вирішують при проведенні космічної діяльності:

- утримуватися від будь-якої дії, яка призводить, безпосередньо чи опосередковано, до завдання шкоди або знищення космічних об'єктів за виключенням того, якщо ця дія здійснюється:

- керуючись імперативними міркуваннями безпеки, зокрема якщо життя людини або її здоров'я перебуває під ризиком;

- керуючись Статутом Організації Об'єднаних Націй, включаючи невід'ємне право на індивідуальну або колективну самооборону; або

- з метою зменшення створення космічного сміття;

і якщо така виключна дія є необхідною, і вона здійснюється таким чином, щоб мінімізувати, максимально можливо, створення космічного сміття.

- здійснювати необхідні заходи, наприклад технічні заходи, попереднє повідомлення і консультації між країнами, для мінімізації ризику зіткнення; та

- удосконалювати дотримання і виконання правил Міжнародного Союзу Електрозв'язку стосовно розміщення радіоспектру та орбітальних призначень, а також направлення шкідливого радіочастотного втручання.

4.3. З метою мінімізації утворення космічного сміття і зменшення його впливу в космічному просторі Держави, що підписались, зобов'язуються обмежити, у максимально можливій мірі, будь-яку діяльність під час здійснення постійних космічних операцій, включаючи ті, які здійснюються під час запуску та повного орбітального життя космічного об'єкту, який може створювати космічне сміття тривалого життєвого циклу.

4.4. З цією метою вони зобов'язуються вживати і здійснювати, відповідно до їхніх власних внутрішніх процесів, відповідну політику і процедури або інші ефективні заходи з метою виконання Керівних принципів Комітету ООН з використання космічного простору у мирних цілях щодо зменшення космічного сміття, закріплені Резолюцією ГА ООН 62/217 (2007 р.).

III. Механізми співробітництва

5. Повідомлення про космічну діяльність

5.1. Держави, що підписались, які керуються принципами співробітництва та взаємної допомоги, вирішують повідомляти у розумний період часу, у максимально можливій мірі, всім потенційно зачепленим Державам, що підписались, про будь-яку подію, пов'язану з космічною діяльністю, яку вони провадять, і яка стосується цілей цього Кодексу, включаючи:

- заплановані маневри, які можуть становити небезпеку для безпечного польоту космічних об'єктів інших Держав, що підписались;

- передбаченні зближення, які становлять очевидний ризик зіткнень на орбіті, завдяки природним орбітальним рухам, між космічними об'єктами або між космічними об'єктами та космічним сміттям;

- попередні повідомлення запусків космічних об'єктів;

- передбачені заходи, пов'язані із повторним входженням зі значним ризиком, при яких космічний об'єкт, що повторно входить, або залишкові матеріали космічного об'єкту, що повторно входить, можуть призвести до потенційно великої шкоди або радіоактивного зараження;

- неналежне функціонування космічних об'єктів або втрата контролю над ними, що може призвести, зі значно збільшеною можливістю, до події повторного входження з високим ризиком або зіткнення між космічними об'єктами.

5.2. Держави, що підписались, вирішують надавати повідомлення про будь-яку подію, пов'язану з космічною діяльністю, описану вище, всім потенційно зачепленим Договірним Державам:

- через Центральний Контактний Пункт, заснований відповідно до статті 9; або

- дипломатичними каналами; або

- будь-яким іншим способом, як це може бути взаємно визначено Державами, що підписались.

При повідомленні Центрального Контактного Пункту Держави, що підписались, визначають, якщо це можливо, потенційно зачеплені Держави.

Центральний Контактний Пункт забезпечує своєчасне розповсюдження повідомлень серед усіх Держав, що підписались.

6. Інформація про космічну діяльність

6.1. Держави, що підписались, вирішують обмінюватися, на щорічній основі, коли необхідно та доречно, інформацією з іншими Державами, що підписались, стосовно:

- їхніх космічних стратегій та політик, включаючи ті, які стосуються безпеки, у всіх аспектах, які можуть вплинути на безпеку та сталість поточної і запланованої діяльності у космічному просторі;

- їхніх значних програм з космічних досліджень та космічного застосування;
- їхніх космічних політик і процедур з метою запобігання та мінімізації можливості нещасних випадків, зіткнень та інших форм шкідливих перешкод та утворення космічного сміття; та
- зусиль, прийнятих для сприяння загального прийняття та дотримання правових та політичних регуляторних інструментів стосовно космічної діяльності.

6.2. Держави, що підписались, також можуть розглянути можливість надання оперативної інформації про умови і прогнози космічного середовища, включаючи, зокрема, стосовно природних явищ, які можуть бути причиною небезпеки для космічних апаратів, відповідним державним та недержавним установам інших Держав, що підписались, зібраних їхніми космічними можливостями із ситуаційної обізнаності.

6.3. Держави, що підписались, зокрема ті, які мають відповідні космічні можливості та програми з дослідження та використання космічного простору, і які мають змогу, заохочують робити внески до сприяння та стимулювання міжнародного співробітництва в космічній діяльності, приділяючи особливу увагу благам та інтересам країн, що розвиваються. Кожна Держава, що підписалась, вільна визначати характер її участі в міжнародному космічному співробітництві на справедливій і взаємоприйнятній основі, беручи до уваги законні права та інтереси зацікавлених сторін. як, наприклад, на основі відповідних домовленостей з технологічної безпеки, багатосторонніх зобов'язань та відповідних стандартів і практик.

6.4. Держави, що підписались, прикладають зусилля для організації на добровільній основі, по мірі можливості, та відповідно до національного та міжнародного права та зобов'язань, включаючи зобов'язання із нерозповсюдження, діяльності з ознайомлення інших Держав, що підписались, з їхніми програмами, політиками та процедурами щодо дослідження та використання космічного простору, включаючи:

- ознайомлювальні візити для покращення міжнародного розуміння процесів та процедур для космічної діяльності Держав;
- експертні візити пускових площадок, центрів контролю за польотами та інших споруд космічної інфраструктури;
- спостереження за запусками космічних об'єктів;
- демонстрації ракетних та інших космічних технологій, відповідно до діючих багатосторонніх зобов'язань та правил з експортного контролю;
- діалоги з метою прояснення інформації з космічної діяльності; та
- тематичні семінари та конференції з дослідження та використання космічного простору.

7. Механізм консультацій

7.1. Не завдаючи шкоди для теперішніх механізмів консультацій, зазначених у статті IX Договору з космосу 1967 і відповідних положень Статуту та Регламенту Радіозв'язку МСЄ, Держави, що підписались, вирішують реалізовувати наступний механізм консультацій:

- Держава, що підписалась (або Держави, що підписались), яка може прямо бути зачеплена відповідною діяльністю в космічному просторі, що провадиться Державою або Державами, що підписались, і має причину вірити, що ця діяльність є або може бути такою, що не відповідає цьому Кодексу, може вимагати проведення консультацій з наміром досягти взаємоприйнятних рішень стосовно заходів, які мають бути прийняті для уникнення або зменшення можливих ризиків завдання шкоди особам або власності, або потенційно шкідливого втручання у космічну діяльність Держави, що підписалась.

- Держави, що підписались, які залучені до консультативного процесу, вирішують:

- консультуватись дипломатичними каналами або іншими способами, як це може бути взаємно визначено; та

- спільно працювати та співпрацювати у часових рамках, які є достатньо необхідними для зменшення або ліквідації виявленого ризику, спочатку розпочавши консультації.

- Будь-яка інша Держава, що підписалась (або Держави, що підписались), яка має причину вірити, що її космічна діяльність може бути прямо піддана визначеному ризику, має право взяти участь у консультаціях, якщо вона (або вони) запитує про це, за погодженням з Державою (або Державами, що підписались), яка запитувала консультації, та Державою (або Державами, що підписались), яка отримала запит.

- Держави, що підписались, які беруть участь у консультаціях, розраховують на пошук взаємно прийнятого рішення відповідно до міжнародного права.

7.2. Додатково Держави, що підписались, можуть пропонувати створювати на добровільній основі та в індивідуальному порядку незалежні, спеціальні Місії зі встановлення фактів для аналізу конкретних випадків завдання шкоди космічним об'єктам та збору надійної і об'єктивної інформації, яка сприяє наданню оцінки

Місії. Ці Місії із встановлення фактів, які створюються Зустріччю Держав, що підписались, та проводяться географічно представленою групою експертів, схваленою задіяними Державами, що підписались, використовують інформацію, надану на добровільній основі Державами, що підписались, відповідно до законів та правил, що застосовуються. Результати та будь-які рекомендації матимуть рекомендаційний характер та можуть бути поширені серед інших Держав, що підписались, на основі домовленості між задіяними Державами, що підписались.

IV. Організаційні питання

8. Зустріч Держав, що підписались

8.1. Держави, що підписались, вирішують проводити регулярні щорічні зустрічі з метою визначення, перегляду і подальшої розробки цього Кодексу, а також для забезпечення його ефективного виконання.

Додаткові зустрічі можуть проводитись, якщо це вирішено Державами, що підписались, консенсусом на попередній зустрічі або, як повідомлено через Центральний контактний пункт.

Порядок денний таких зустрічей може включати:

- огляд виконання цього Кодексу;
- зміна цього Кодексу;
- обговорення додаткових заходів, які можуть бути необхідними, включаючи ті, які пов'язані із досягненнями в розробці космічних технологій та їхнього застосування; та

• встановлення процедур щодо обміну повідомленнями та іншою інформацією в рамках цього Кодексу.

8.2. Рішення на таких зустрічах, як матеріальні, так і процесуальні, прийматимуться консенсусом присутніх Держав, що підписались.

8.3. На початку кожної регулярної зустрічі Держави, що підписались, повинні обирати на основі консенсусу їхнього Голову на період до початку наступної регулярної зустрічі.

8.4. Результати Зустрічі Держав, що підписались, повинні доводитись відповідним чином до уваги відповідних міжнародних форумів, включаючи Комітет ООН з використання космічного простору у мирних цілях та Конференцію з роззброєння.

9. Центральний контактний пункт

9.1. Центральний контактний пункт повинен бути створений Державами, що підписались, на першій Зустрічі Держав, що підписались, та йому повинно бути доручено:

- отримання та передача повідомлень про приєднання Держав до цього Кодексу;
- слугування механізмом передачі всім Державам, що підписались, інформації, якою обмінюються відповідно до цього Кодексу;
- слугування секретаріатом Зустрічі Держав, що підписались;
- підтримання електронної бази даних та систем зв'язку;
- здійснення організаційних функцій у зв'язку з підготовкою та виконанням ознайомлювальної діяльності відповідно до пунктів 6.4, якщо та в тому розмірі, який запитують задіяні Держави, що підписались; та
- виконання інших завдань, як це визначено Зустріччю Держав, що підписались;

9.2. Держави, що підписались, вирішують створити електронну базу даних та систему зв'язку, які повинні використовуватись для:

- збирання та розповсюдження повідомлень та інформації, представлених відповідно до цього Кодексу; та
- слугування механізмом направлення запитів для консультацій.

9.3. Фінансування розробки та супроводження електронної бази даних повинно вирішуватись першою Зустріччю Держав, що підписались.

Електронна база даних повинна використовуватись виключно в інтересах Держав, що підписались.

10. Участь регіональних інтеграційних організацій та міжнародних міжурядових організацій

В цьому Кодексі посилання на Держави, що підписались, призначені для застосування, з дати їхнього підписання цього Кодексу:

- до будь-якої регіональної інтеграційної організації, яка має компетенцію у питаннях, що покриваються цим Кодексом, без нанесення шкоди компетенції її Держав-членів;
- за виключенням пунктів 8.2 та 8.3: До будь-якої міжнародної міжурядової організації, яка проводить космічну діяльність, якщо більшість Держав-членів організації є Державами, що підписали цей Кодекс.

АРТЕМЕНКО Ігор Геннадійович — провідний інженер Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

Напрямок науки — кліматологія, моделювання, аналіз ризиків, дистанційне дослідження Землі.

АТАМАНЕНКО Борис Анатолійович — начальник управління міжнародних зв'язків Державного космічного агентства України, експерт з конверсії, кандидат фізико-математичних наук. Дійсний член Академії технологічних та інженерних наук України, почесний професор Національного університету «Львівська політехніка», має 40 наукових праць, в тому числі чотири винаходи.

Напрямок науки — контроль за нерозповсюдженням зброї масового ураження, зміцнення транспарентності та довіри в космічній діяльності.

БІЛОУС Юлія Геннадіївна — молодший науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

Напрямок науки — геоecологія, дослідження процесів енергомасообміну в геосистемах, моделювання та аналіз ризиків.

ВОВК Василь Семенович — інженер-дослідник Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія».

Напрямок науки — навколосезна астрономія.

ВОЛОШАНЕНКО Артем Сергійович — студент Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрямок науки — географія.

ДЕГТЯРЕВ Олександр Вікторович — Головний конструктор — Генеральний директор Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», академік Міжнародної академії астронавтики, заслужений машинобудівник України, доктор технічних наук, лауреат Державної премії України.

Напрямок науки — ракетно-космічна техніка.

ЕФИМЕНКО Микола Володимирович — заступник Головного конструктора з науки НВП ХАРТРОН-ЮКОМ, доцент Запорізького національного технічного університету, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — системи керування космічними апаратами.

КОЗИРЄВ Євген Сергійович — молодший науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія», кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — навколосезна астрономія.

КОПАЧЕВСЬКИЙ Іван Михайлович — провідний інженер Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України».

Напрямок науки — обробка та інтерпретація даних дистанційного зондування Землі, аналіз ризиків, пов'язаних з надзвичайними ситуаціями техногенного характеру.

КОСТЮЧЕНКО Юрій Васильович — провідний науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — гідрогеологія, дослідження процесів енергомасообміну в геосистемах методами математичного моделювання, обробка даних космічної зйомки з метою вирішення природоохоронних та природоресурсних задач.

КУЛІЧЕНКО Микола Олександрович — інженер-дослідник Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія».

Напрямок науки — навколосезна астрономія.

ЛЯЛЬКО Вадим Іванович — директор Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», академік НАН України, доктор геолого-мінералогічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державних премій України, член-кореспондент Міжнародної академії астронавтики.

Напрямок науки — географія, енергомасообмін в геосистемах, дистанційні дослідження природних ресурсів.

МИЛОВАНОВ Юрій Борисович — науковий співробітник кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Напрямок науки — космічна радіофізика, математичне моделювання.

ПОПАДЮК Любомир Володимирович — студент кафедри землезнавства та геоморфології Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрямок науки — географія.

РЕДЧИЦЬ Наталія Євгенівна — головний спеціаліст відділу контролю міжнародних зобов'язань Державного космічного агентства України, магістр міжнародного публічного права.

Напрямок науки — договірно-правова робота, співробітництво з міжнародними організаціями.

СИБІРЯКОВА Євгенія Сергіївна — завідувач сектору Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія», кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — навколосемна астрономія.

СОЛОВЬОВ Дмитро Маркович — науковий співробітник Морського гідрофізичного інституту Національної академії наук України.

Напрямок науки — морська гідрофізика та гідроекологія, обробка та дешифрування даних ДЗЗ.

ФЕДИНА Роман Володимирович — студент Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрямок науки — географія.

ФЕДОРЕНКО Володимир Миколайович — науковий співробітник кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Напрямок науки — космічна радіофізика, дослідження іоносфери за допомогою штучних супутників Землі.

ЦИМБАЛ Анатолій Михайлович — доцент кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, кандидат фізико-математичних наук, лауреат Державної премії УРСР в галузі науки і техніки.

Напрямок науки — космічна радіофізика, космічна погода.

ЧОРНОГОР Леонід Феоктистович — професор кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, доктор фізико-математичних наук, лауреат Державної премії УРСР в галузі науки і техніки, лауреат Премій Ради Міністрів СРСР.

Напрямок науки — космічна радіофізика, космічна фізика, космічна екологія та космічна погода.

ШУЛЬГА Олександр Васильович — заступник директора з наукових питань Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія», кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — навколосемна астрономія.

ЯНКІВ-ВІТКОВСЬКА Любов Миколаївна — доцент кафедри Вищої геодезії та астрономії Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка», кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — глобальні навігаційні супутникові системи.

- Агапитов А. В.* — див. Черемных О. К.
Апостолов О. А. — див. Лялько В. І.
Артеменко І. Г. — див. Костюченко Ю. В. (б)
Артеменко І. Г. — див. Лялько В. І.
Архипов В. Т. — див. Засуха С. А.
Атаманенко Б. А., Редчиць Н. Є. Транспарентність та зміцнення довіри в космосі // Космічна наука і технологія. — 2013. — 19, № 6. — С. 60—69.
- Балашов В. Н.* — див. Макаров А. Л. (а)
Басараб Р. М. — див. Федоров О. П.
Беспалова А. В., Федоренко А. К. Хвильові збурення швидкості нейтральних частинок та іонів у полярних областях // Космічна наука і технологія. — 2013. — 19, № 4. — С. 50—56.
Беспалова А. В. — див. Клименко Ю. А.
Білоус Ю. Г. — див. Костюченко Ю. В. (а)
Білоус Ю. Г. — див. Костюченко Ю. В. (б)
Білоус Ю. Г. — див. Костюченко Ю. В. (в)
Бовчалюк А. П. Вплив пожеж на розподіл аерозолів над Україною за даними супутникових та наземних вимірювань // Космічна наука і технологія. — 2013. — 19, № 5. — С. 27—41.
- Вергун Л. Ю., Черняк В. Я., Недибалюк О. А., Орловська С. Г., Карімова Ф. Ф., Шкоропато М. С.* Конформаційні зміни в структурі твердого парафінового палива на початковому етапі його спалювання // Космічна наука і технологія. — 2013. — 19, № 5. — С. 63—69.
Вовк В. С., Козырев Е. С., Куличенко Н. А., Сибирякова Е. С., Шульга А. В. Первые результаты регулярных наблюдений низкоорбитальных космических объектов в НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» // Космічна наука і технологія. — 2013. — 19, № 6. — С. 53—59.
Войцеховская А. Д. — див. Кришталь А. Н.
Воловик Д. В. — див. Кузьков С. В.
Волошаненко А. С. — див. Лялько В. І.
- Габ И. И.* — див. Найдич Ю. В.
Герасименко С. В. — див. Кришталь А. Н.
Горбулін В. П., Шевцов А. І., Шеховцов В. С. Особливості використання технологічної та виробничої бази ракетно-космічної галузі в інтересах розвитку машинобудівного комплексу України // Космічна наука і технологія. — 2013. — 19, № 4. — С. 3—7.
- Дегтярев А. В.* Актуальные вопросы развития ракетно-космической деятельности в Украине // Космічна наука і технологія. — 2013. — 19, № 2. — С. 43—52.
Дегтярев О. В. Про забезпечення ракетно-космічної галузі сучасними конструкційними та спеціальними матеріалами // Космічна наука і технологія. — 2013. — 19, № 6. — С. 3—11.
Донец В. В. Анализ физических и технологических аспектов создания бортового гиперспектрометра AVIRIS первого поколения // Космічна наука і технологія. — 2013. — 19, № 4. — С. 17—28.
Дробный Д. М. — див. Клименко Ю. А.
- Ефименко Н. В.* Взаимная привязка внутренних систем координат астродатчиков в задаче высокоточного определения ориентации космического аппарата // Космічна наука і технологія. — 2013. — 19, № 6. — С. 12—17.
- Жолобак Г. М.* — див. Лялько В. І.
- Зализовский А. В.* — див. Черемных О. К.
Засуха С. А., Макаров А. Л., Лихолит Н. И., Семенов Л. П., Меленевский Ю. А., Архипов В. Т. Особенности криогенных систем охлаждения детекторов ИК-сканеров для микроспутников // Космічна наука і технологія. — 2013. — 19, № 5. — С. 56—62.
Зелинский С. А. — див. Клименко Ю. А.
- Ивченко В. Н.* — див. Черемных О. К.
- Калинина М. Ф.* — див. Карачун В. В.
Карачун В. В., Мельник В. Н., Калинина М. Ф. Гиперзвуковой прорыв: перспективы и проблемы // Космічна наука і технологія. — 2013. — 19, № 2. — С. 63—73.
Карімова Ф. Ф. — див. Вергун Л. Ю.
Кислюк В. С. Космічні дослідження Місяця: сучасний стан та перспективи (огляд) // Космічна наука і технологія. — 2013. — 19, № 3. — С. 5—20.
Клецонок В. В. — див. Кузьков С. В.
Клименко Ю. А., Семенов О. В., Беспалова А. В., Пруцко Ю. В., Малетин Ю. А., Стрижакова Н. Г., Зелинский С. А., Тычина С. А., Дробный Д. М., Неймаш В. Б., Порошин В. Н. Радиационная восприимчивость суперконденсаторов и перспективы их космического применения // Космічна наука і технологія. — 2013. — 19, № 3. — С. 47—60.

- Козак Л. В. — див. Черемных О. К.
Козырев Е. С. — див. Вовк В. С.
Колосков А. В. — див. Черемных О. К.
Копачевський І. М. — див. Костюченко Ю. В. (а)
Копачевський І. М. — див. Костюченко Ю. В. (б)
Копачевський І. М. — див. Костюченко Ю. В. (в)
Кордюм Є. Л. Біологія рослин в космосі: наукові результати та проблеми // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 4. — С. 65—77.
Костюк Б. Д. — див. Найдич Ю. В.
Костюченко Ю. В., Ющенко М. В., Копачевський І. М., Соловійов Д. М., Білоус Ю. Г. Використання даних ДЗЗ для оцінки епідемічних (і соціоекологічних) ризиків у прибережних регіонах (на прикладі аналізу спалаху холери у м. Маріуполь у 2011 р.) // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 1. — С. 57—67. (а)
Костюченко Ю. В., Білоус Ю. Г., Мовчан Д. М., Копачевський І. М., Ющенко М. В., Артеменко І. Г., Попадюк Л. В. Застосування методів нелінійної просторово-часової регуляризації для аналізу даних метеорологічних спостережень // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 5. — С. 42—49. (б)
Костюченко Ю. В., Білоус Ю. Г., Соловійов Д. М., Копачевський І. М. Використання засобів супутникового спостереження в комплексі методів оцінки ризиків метеорологічних і кліматичних надзвичайних ситуацій на урбанізованих територіях // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 6. — С. 27—37. (в)
Костюченко Ю. В. — див. Лялько В. І.
Кочубей Г. С. — див. Шувалов В. А. (б)
Кравченко О. М. — див. Федоров О. П.
Кригін В. М. — див. Федоров О. П.
Кришталь А. Н., Герасименко С. В., Войцеховская А. Д. Генерация кинетических ионно-звуковых волн в предвспышечной атмосфере активной области на Солнце // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 3. — С. 37—46.
Кузьков В. П. — див. Кузьков С. В.
Кузьков С. В., Кузьков В. П., Соднік З., Воловик Д. В., Пуха С. П., Клецюнок В. В. Система наведення і супроводження для фотометричних та координатних вимірювань високоорбітальних супутників // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 3. — С. 61—67.
Кулабухов А. М. — див. Макаров А. Л. (а)
Кулагін С. Н. — див. Шувалов В. А. (а)
Куличенко Н. А. — див. Вовк В. С.
Кукуль Н. М. — див. Федоров О. П.
Лавренюк М. С. — див. Федоров О. П.
Лазученков Д. Н. — див. Шувалов В. А. (б)
Лихолит Н. И. — див. Засуха С. А.
Лукенюк А. А. — див. Шувалов В. А. (а)
Лялько В. І., Сахацький О. І., Жолобак Г. М., Апостолов О. А. Дистанційне визначення строків сівби соняшнику // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 2. — С. 74—78.
Лялько В. І., Костюченко Ю. В., Артеменко І. Г., Попадюк Л. М., Федина Р. М., Волошианенко А. С. Аналіз невизначеностей в задачах оцінки кліматичних змін на регіональному рівні за даними супутникових спостережень парникових газів // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 6. — С. 18—26.
Макаров А. Л., Мозговой Д. К., Кулабухов А. М., Хорошилов В. С., Балашов В. Н., Попель В. М. Учет погрешностей ориентации КА при съемке с ненулевыми угловыми скоростями // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 1. — С. 20—27. (а)
Макаров А. Л., Меланченко А. Г., Нагорнов В. С. Об одном направлении совершенствования бортовых систем измерения параметров космических аппаратов // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 2. — С. 53—62. (б)
Макаров А. Л. — див. Засуха С. А.
Малетин Ю. А. — див. Клименко Ю. А.
Меланченко А. Г. Отказоустойчивое управление космическим аппаратом наблюдения Земли с избыточной конфигурацией двигателей-маховиков // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 1. — С. 28—37. (а)
Меланченко А. Г. Реконфигурация системы управления космического аппарата в условиях отказов // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 4. — С. 8—16. (б)
Меланченко А. Г. — див. Макаров А. Л. (б)
Меленевский Ю. А. — див. Засуха С. А.
Мельник В. Н. — див. Карачун В. В.
Милованов Ю. Б. — див. Черногор Л. Ф.
Мовчан Д. М. Оцінка динаміки параметрів лісового покриття на території України (Західне Полісся) на основі даних дистанційного зондування // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 4. — С. 29—43.
Мовчан Д. М. — див. Костюченко Ю. В. (б)
Мозговой Д. К. — див. Макаров А. Л. (а)
Нагорнов В. С. — див. Макаров А. Л. (б)
Найдич Ю. В., Габ И. И., Стецюк Т. В., Костюк Б. Д. Влияние гравитации на смачивание и капиллярные явления в контактных системах жидкость — твердое тело // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 5. — С. 50—55.
Недибалюк О. А. — див. Вергун Л. Ю.
Неймаш В. Б. — див. Клименко Ю. А.
Носиков С. В. — див. Шувалов В. А. (б)
Орловська С. Г. — див. Вергун Л. Ю.
Парновский А. С. — див. Черемных О. К.
Письменный Н. И. — див. Шувалов В. А. (а)
Попадюк Л. В. — див. Костюченко Ю. В. (б)
Попадюк Л. М. — див. Лялько В. І.
Попель В. М. — див. Макаров А. Л. (а)
Порошин В. Н. — див. Клименко Ю. А.
Пруцко Ю. В. — див. Клименко Ю. А.
Пуха С. П. — див. Кузьков С. В.
Рапопорт Ю. Г. — див. Черемных О. К.
Редчиць Н. Є. — див. Атаманенко Б. А.
Сахацький О. І. — див. Лялько В. І.
Селиванов Ю. А. — див. Черемных О. К.
Семенов О. В. — див. Клименко Ю. А.

- Семенов Л. П. — див. Засуха С. А.
 Сибирякова Е. С. — див. Вовк В. С.
 Соднік З. — див. Кузьков С. В.
 Соколовська А. В., Суханов К. Ю., Федоровський О. Д. Використання космічної інформації ДЗЗ для моделювання впливу складових урболандшафту на екологічний стан території міста Києва // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 3. — С. 21—26. (а)
 Соколовська А. В. Космічний моніторинг екологічного стану міських територій (на прикладі міста Києва) // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 4. — С. 44—49. (б)
 Соловійов Д. М. — див. Костюченко Ю. В. (а)
 Соловійов Д. М. — див. Костюченко Ю. В. (в)
 Станкевич С. А. — див. Федотов Б. Н.
 Стецюк Т. В. — див. Найдич Ю. В.
 Стрижакова Н. Г. — див. Клименко Ю. А.
 Суханов К. Ю. — див. Соколовська А. В. (а)
 Тычина С. А. — див. Клименко Ю. А.
 Федина Р. М. — див. Лялько В. І.
 Федоренко А. К. Акустическая и гравитационная составляющие волновых возмущений в высокоширотной термосфере // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 3. — С. 27—36.
 Федоренко А. К. — див. Беспалова А. В.
 Федоренко В. Н. — див. Черногор Л. Ф.
 Федоров О. П., Кукуль Н. М., Кравченко О. М., Янчевський С. Л., Басараб Р. М., Кригін В. М., Лавренюк М. С. Інформаційна технологія географічного прив'язування даних космічної системи ДЗЗ «Сич-2» для території України // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 1. — С. 3—12.
 Федоровський О. Д. — див. Соколовська А. В. (а)
 Федотов Б. Н., Станкевич С. А. Технология увеличения ширины полосы обзора спутниковых радаров сверхвысокого разрешения // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 1. — С. 38—43.
 Хода О. А. Сравнение результатов обработки наблюдений GPS- И ГЛОНАСС-спутников на перманентных станциях, расположенных на севере Европы // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 1. — С. 44—56.
 Хорошилов В. С. — див. Макаров А. Л. (а)
 Цымбал А. М. — див. Черногор Л. Ф.
 Черемных О. К., Ямпольский Ю. М., Агапитов А. В., Зализовский А. В., Ивченко В. Н., Козак Л. В., Парновский А. С., Рапопорт Ю. Г., Селиванов Ю. А., Колосков А. В., Черемных С. О. Исследования МГД-колебаний внутренней магнитосферы Земли в космическом проекте РЕЗОНАНС // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 2. — С. 5—42.
 Черемных С. О. О поляризации поперечно-мелкомасштабных МГД-мод в магнитосфере Земли // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 4. — С. 57—64.
 Черемных С. О. — див. Черемных О. К.
 Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Федоренко В. Н., Цымбал А. М. Спутниковые наблюдения ионосферных возмущений, следовавших за падением Челябинского метеорита // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 6. — С. 38—46.
 Черняк В. Я. — див. Вергун Л. Ю.
 Шевцов А. І. — див. Горбулін В. П.
 Шеховцов В. С. — див. Горбулін В. П.
 Шкоропато М. С. — див. Вергун Л. Ю.
 Шувалов В. А., Лукенюк А. А., Письменный Н. И., Кулагин С. Н. Зондовая диагностика околоспутниковой среды на КА «Сич-2» // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 1. — С. 13—19. (а)
 Шувалов В. А., Лазученков Д. Н., Носиков С. В., Кочубей Г. С. Идентификация землетрясений по зондовым измерениям возмущений параметров ионосферной плазмы на КА «Сич-2» // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 5. — С. 16—26. (б)
 Шульга А. В. — див. Вовк В. С.
 Ющенко М. В. — див. Костюченко Ю. В. (а)
 Ющенко М. В. — див. Костюченко Ю. В. (б)
 Ямпольский Ю. М. — див. Черемных О. К.
 Янків-Вітковська Л. М. Методика визначення параметрів іоносфери у мережі супутникових станцій західної України // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 6. — С. 47—52.
 Янчевський С. Л. — див. Федоров О. П.

ХРОНІКА

- Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма на 2013—2017 роки // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 5. — С. 5—13.
 Концепція проекту Закону України «Про державне регулювання у сфері дистанційного зондування Землі» // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 5. — С. 14—15.
 До 100-річчя від дня народження академіка НАН України В. С. Будника // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 5. — С. 70—72.

Укладачі
 О. В. Клименко, В. М. Клименко