

УДК 528.813:633.11(477)

Г. М. Жолобак, З. М. Шпортюк, О. М. Сибірцева, С. С. Дугін

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ ЧЕРВОНОГО КРАЮ СПЕКТРІВ ВІДБИТТЯ ПОСІВІВ ОЗИМОЇ ПШЕНИЦІ, ВИРОЩЕНОЇ У ПОЛЬОВИХ УМОВАХ СТЕПОВОЇ ЗОНИ УКРАЇНИ

*Висвітлюються результати спектрометрування приладом ASD FieldSpec® 3FR дрібноділянкових посівів демонстраційно-го полігону елітного насінневого господарства «Золотий колос» у Миколаївській області, на підставі яких розраховано вегетаційні індекси червоного краю (REP, TCI, NDVI705) для двох різновидів (лютесценс та еритроспермум) озимої пшениці м'якої (*Triticum aestivum* L.) та різновиду гордеїформе озимої пшениці твердої (*Triticum durum* Desf.). Найнижчі значення індексів виявлено в озимої пшениці м'якої з безостим колосом різновиду лютесценс, а найвищі — в озимої пшениці твердої різновиду гордеїформе. Обговорюється питання широкого розмаху коливань значень вегетаційних індексів червоного краю для досліджених сортів озимої пшениці різновиду лютесценс.*

ВСТУП

Дослідження спектрів відбиття рослинності за допомогою високоточної апаратури активно проводиться вже понад три десятиліття. Можна виокремити принаймні три напрямки використання вимірювань спектральних характеристик рослинного покриву.

1. Пошук неруйнівних методів вивчення рослин, суть яких полягає у віднайденні кореляційних залежностей між спектральними коефіцієнтами яскравості (чи розрахованими на їх основі вегетаційними індексами) та окремими біохімічними компонентами рослинних органів (пігментами, вмістом азоту чи води). Накопичений досвід у дистанційному виявленні хлорофілів, каротиноїдів та антоціанів у листках рослин, обговорення успіхів і проблем їх кількісної оцінки методами спектрометрії високої розрізненності узагальнено в огляді [16].

2. Оцінювання можливості автоматизованого виділення окремих складових частин зі змішаного посіву. Таку спробу здійснено вченими

з університету м. Кассель (Німеччина) з метою встановлення пропорції бобових (конюшини та люцерни) у бобово-злакових (з райграсом) травосумішках, вирощених у вегетаційних умовах. У цьому експерименті застосовувались методи регресії та вегетаційні індекси *SR*, *NDVI*, *EVI*, *REP*, розраховані зі спектрів відбиття різних варіантів травостоїв, отриманих спектрометром FieldSpec Pro JR [9].

3. Зіставлення даних наземних гіперспектральних вимірювань відбивальних властивостей рослинності з даними космічних апаратів. Застосування методики й техніки високоточного спектрометрування дозволяє перевірити, наскільки взаємоузгоджуються індекси, розраховані на основі гіперспектральних даних наземного оптичного дистанційного зондування (ДЗ) та аналогічні індекси, обчислені на основі даних відбиття з порівняно ширших каналів космічних сенсорів. З них варто виділити вегетаційні індекси в області червоного краю (660–780 нм), за допомогою яких можна неруйнівними методами оцінити різноманітні параметри і культурної, і природної рослинності. Роботи в цьому напрямку проведені як для космічного апарата «RapidEye», який вже функціонує на орбіті [11],

так і для спеціально сконструйованих з метою дослідження рослинності й охорони довкілля мікосупутників VENμS та «Sentinel-2», запуск яких планується у 2013 р. [13].

В зоні червоного краю (660—780 нм) спектри відбиття рослин характеризуються високими значеннями коефіцієнтів відбиття та великою швидкістю їхнього зростання [10, 14]. Швидкість зміни залежить від типу та стану рослинного покриву [15, 16], що дає можливість використовувати цю властивість при його класифікації. Особливо важливим показником є довжина хвилі, на якій швидкість зміни спектру максимальна — так звана позиція червоного краю *REP* (Red Edge Position). Вона належить до вегетаційних індексів червоного краю, які можна визначати за гіперспектральними даними ДЗ. Індекс *REP* залежить від сумарного вмісту хлорофілу, який є показником функціонального стану рослин. Другим індексом, що характеризує вміст хлорофілу в рослинному покриві, є TCI (terrestrial chlorophyll index), який вперше визначено англійськими вченими [10] для даних сенсора MERIS як мерісівський наземний хлорофільний індекс MTCI (the MERIS terrestrial chlorophyll index). Третій індекс, який характеризує зміни спектрального відбиття в зоні червоного краю залежно від вмісту хлорофілу — модифікований нормалізований різницевий індекс червоного краю *NDVI*₇₀₅, запропонований вперше в роботі [12].

Свого часу методиці визначення *REP* за даними космознімання не приділялося достатньої уваги через відсутність на супутниках відповідних спектрометрів з достатньою кількістю каналів в зоні червоного краю. Та з 2010 р. в Україні поширюється інформація з німецького супутникового угруповання «Rapid Eye», котре оснащено 5-канальними багатоспектральними оптико-електронними системами, що дозволяють вперше серед комерційних супутників отримувати знімки земної поверхні каналом «червоного краю» (690—730 нм). Тому особливої актуальності набувають наземні підсупутникові дослідження спектральних особливостей рослинних угруповань з метою їхнього подальшого зіставлення з інформацією, отриманою шляхом обробки космічних знімків.

Детальне дослідження спектрів відбиття рослин проводилось в Україні з 1987 р. вченими під керівництвом проф. С. М. Кочубей на спеціально сконструйованих для цього приладах з різними діапазонами реєстрації та кроками відбору інформації [3, 8, 17]. Було створено кілька варіантів експериментальних зразків спектрометричного апаратурно-програмного комплексу для дистанційного визначення вмісту хлорофілу у рослинності в натуральних умовах та проведено їхнє випробування на дослідних ділянках Інституту фізіології рослин і генетики Національної академії наук України та на дослідних полях інституту у Васильківському районі Київської області [1].

З появою першого в Україні цифрового спектрорадіометра ASD FieldSpec® 3FR з'явилась можливість здійснювати спектрометрування наземного покриву у польових виробничих умовах для розв'язання різноманітних прикладних задач. Дані вимірювань спектральних характеристик рослинного покриву використано як еталонні для зіставлення з даними космознімання сенсора «Hyperion» [4] та для визначення впливу просочування природного газу на спектральні характеристики пшениці над Глібовським газоконденсатним родовищем [5].

Мета нашої роботи — дослідження вегетаційних індексів червоного краю окремих різновидів озимої пшениці, обчислених за даними вимірювань спектрорадіометром ASD FieldSpec® 3FR на дрібноділянкових сільськогосподарських посівах демонстраційного полігону елітного насінневого господарства «Золотий колос» поблизу м. Миколаєва задля подальшого їхнього зіставлення з аналогічними індексами, розрахованими за космічними знімками.

Об'єкти та методика досліджень. Експеримент зі спектрометрування сільськогосподарських культур було здійснено 16 червня 2010 року польовим спектрометром ASD FieldSpec® 3FR у степовій зоні України на дрібноділянкових посівах демонстраційного полігону елітного насінневого господарства «Золотий колос» поблизу м. Миколаєва. На рис. 1 світлим кольором позначено поле, на якому був розташований цей полігон.

На зазначену дату тут на ділянках довжиною 40 м та шириною півтора, три й шість метрів вирощувались різні сорти 14 сільськогосподарських культур, характерних для степової зони України. Об'єктом досліджень були посіви різновидів озимої пшениці м'якої або звичайної (*Triticum aestivum* L.) та озимої пшениці твердої (*Triticum durum* Desf.), які під час спектрометрування перебували у фазі молочно-воскової стиглості. Для отримання спектрів відбиття поверхні посівів озимої пшениці оптична насадка приладу встановлювалась скраю посіву на центральній поздовжній осі ділянки.

Під час вимірювань 16 червня 2010 р. о 7 год ранку та в післяобідню пору погода була ясною, сухою й сонячною, лише у полудень спостерігалася мінлива хмарність. Температура повітря вранці була 30 °С, вдень піднялась до 36 °С. Спектрометрування посівів озимої пшениці здійснювалось від 13 до 14 год при ясному небі.

Технічні характеристики спектро радіометра FieldSpec®3 FR. ASD FieldSpec® 3FR — польовий портативний переносний спектро радіометр, який охоплює діапазон реєстрації від 350 до 2500 нм. Весь спектр 350—2500 нм відображається в реальному часі на дисплеї. Деякі інші характеристики спектро радіометра наведено нижче:

- інтервал відліку — 1.4 нм у діапазоні довжин хвиль 350—1000 нм і 2.0 нм у діапазоні довжин хвиль 1000—2500 нм,
- спектральна розрізненність (повна ширина на половині максимуму) — 3.0 нм при 700 нм та 10 нм при 1400 нм і 2100 нм,
- яскравість, еквівалентна шуму (NeDL), для стандартного волоконно-оптичного кабеля довжиною 1.5 м становить 1.4, 2.4, 8.8 нВт·см⁻²·нм⁻¹ для довжин хвиль $\lambda = 700, 1100$ і 2100 нм відповідно.

З іншими технічними параметрами приладу можна ознайомитись на сайтах <http://www.asdi.com/products/fieldspec-3-portable-spectroradiometer> та <http://www.asdi-rus.ru/catalog/25/>.

Кут огляду використаного об'єктива — 1°, тримач пістолетного типу з оптичною насадкою закріплювався на стандартному штативі з висотою 1.2 м над поверхнею ґрунту, віддаль від об'єктива до ділянки спектрометрування посі-

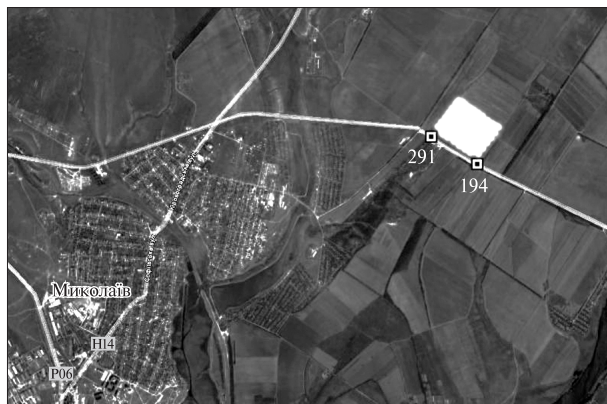


Рис. 1. Розташування демонстраційного полігону елітного насінневого господарства «Золотий колос» (світлий прямокутник між точками GPS 194 та 291), на якому 16 червня 2010 р. здійснювалось спектрометрування сільськогосподарських культур

ву складала 5 м, площа посіву, яка потрапляла у поле зору, складала 80 см², кут нахилу оптичної осі об'єктива до вимірюваної площі 14°. Калібрування до білого проводилось перед кожним вимірюванням на ділянці. Одне місце поверхні посіву кожного сорту вимірювалось десять разів. Отримані десять спектрів програмно усереднювались і надалі використовувались для обчислення вегетаційних індексів червоного краю.

Обчислення вегетаційних індексів *REP* [14], *TCI* [10] та *NDVI*₇₀₅ [12] здійснювалось за формулами

$$REP = 701 + 41 \frac{(\bar{R} - R(701))}{(R(742) - R(701))}, \quad (1)$$

$$\bar{R} = \frac{R(671) + R(783)}{2},$$

$$TCI = \frac{R(754) - R(708)}{R(708) - R(681)}, \quad (2)$$

$$NDVI_{705} = \frac{R(750) - R(705)}{R(750) + R(705)}, \quad (3)$$

де $R(\lambda)$ — значення спектрометричного коефіцієнта відбиття на довжині хвилі λ .

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХНЄ ОБГОВОРЕННЯ

Рід пшениці *Triticum* L. поліморфний за видовим складом. На демонстраційному полігоні зростали різні сорти двох озимих культурних голозер-

них видів: пшениці м'якої (ширина цих ділянок становила 3 м) та пшениці твердої (ширина ділянок — 1.5 м). Ми досліджували 23 сорти, що належать до трьох різновидів. Різновид лютесценс (*Tt. aestivum*) об'єднував сорти Служниця, Безоста, Подолянка, Фаворитка, Херсонська безоста; різновид еритроспермум (*Tt. aestivum*) — сорти Ліона, Селянка, Зміна, Ніконія, Кірія, Турунчук, Шестоपालовка, Отаман, Подяка, Пошана, Куяльник, Тітона, Кохана та Херсонська 99, різновид гордеїформе (*Tt. durum*) — сорти: Аргонавт, Лагуна, Дельфін та Алий парус.

Всі проаналізовані сорти озимої пшениці належать до групи середньоранніх із тривалістю вегетаційного періоду у межах 270—280 днів, за винятком сорту Фаворитка (різновид лютесценс), який належить до групи середньостиглих, та сорту Шестоपालівка (різновид еритроспермум), що входить до групи ранньостиглих сортів.

За даними спектрометра ASD FieldSpec®3 FR було розраховано значення трьох вегетаційних індексів червоного краю, які характеризують фотосинтетичний потенціал рослин (таблиця).

За даними таблиці найнижчі значення всіх розрахованих індексів червоного краю характерні для озимої пшениці різновиду лютесценс. Зокрема, значення *REP* для цих пшениць майже на 7 нм, а значення *TCI* та *NDVI*₇₀₅ достовірно майже удвічі нижчі, ніж у пшениць різновиду гордеїформе. Така різниця, вірогідно, зумовлена тим, що відбивні поверхні посівів пшениць лютесценс в умовах степової зони України до середини червня 2010 р. помітно втратили фотосинтетичні пігменти (про це свідчить найменший хлорофільний індекс *TCI*) і візуально видавались жовтішими порівняно з іншими різновидами пшениці. Серед остистих пшениць для різновиду еритроспермум були властиві, як правило, колос зеленого кольору, а остюки — жовтуватого, в той час як у *Tt. durum* гордеїформе зеленими були і колос, і остюки, і більша частина листків. Про це свідчать і отримані спектри відбиття посівів, які демонструють відмінності в конфігурації кривих відбиття на довжинах хвиль 350—750 нм та різну позицію точки початку підняття спектру на довжині хвилі $\lambda \approx 680$ нм (один з максимумів поглинання хлорофілу) (рис. 2).

Отже, під час спектрометрування посівів 16 червня 2010 р. ми зафіксували як достовірні відмінності значень проаналізованих індексів між двома видами озимої пшениці *Tt. aestivum* та *Tt. durum*, так і тенденцію до дещо вищих значень індексів для пшениць різновиду еритроспермум у порівнянні з лютесценс. Слід зазначити, що ця несхожість між вегетаційними індексами різновидів озимої пшениці не суперечить виявленням Т. А. Казанцевим зі співроб. [2] сортовим відмінностям у формі динамічних кривих зміни деривативного вегетаційного індексу D_{725}/D_{702} , розрахованого за спектрами відбиття посівів двох сортів озимої пшениці Смуглянка і Переяславка, вирощених на різних рівнях мінерального живлення в умовах мікропольового досліду лісо-степової зони України. Вищезазначене свідчить про неоднорідність спектрального відгуку посівів озимої пшениці молочно-воскової стиглості в зоні червоного краю, що слід брати до уваги при подальшому аналізі відповідних індексів, розрахованих за супутниковими даними.

Для досліджених ділянок пшениці різновиду лютесценс властиві найбільші варіації отриманих вегетаційних індексів (наприклад, *REP* — від 705.77 нм до 722.26 нм), про що свідчать високі значення похибок середнього для кожного з них (див. таблицю). Внаслідок цього відмінність середніх значень *REP* для пшениць лютесценс та гордеїформе лише у 2.4 рази перевищує помилку середнього арифметичного для сортів різновиду лютесценс. Водночас коефіцієнт варіації індексів для *REP* найменший із усіх трьох коефіцієнтів варіації. Постає логічне запитання, чому сортам пшениць з безостим колосом притаманна доволі сильна варіативність індексу *REP*, у той час як мінливість його варіаційного ряду можна вважати незначною (адже вона не сягає навіть 1 %)?

Як засвідчили наші розрахунки, найвищі показники індексу *REP* пшениць різновиду лютесценс були властиві сортам Подолянка (719.69 нм) і Фаворитка (722.26 нм). Це короткостеблові високоінтенсивні сорти озимої пшениці, які належать до нового покоління сортів, що забезпечують отримання рекордних урожаїв. Як зазначалось вище, сорт Фаворитка належить до групи середньостиглих, тож у порівнянні з іншими

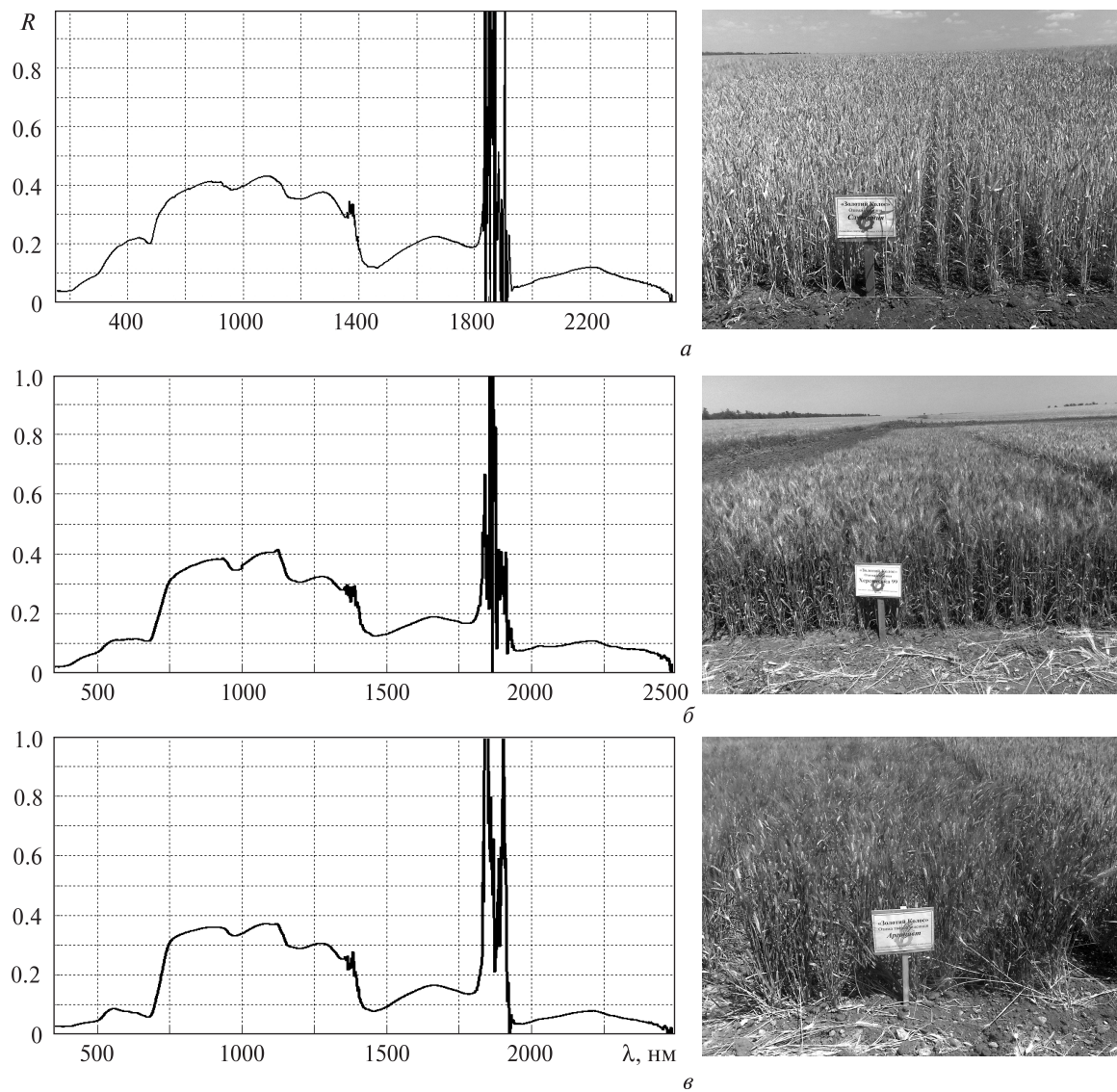


Рис. 2. Спектри відбиття дрібноділянкових посівів озимої пшениці у Миколаївській області, отримані спектрорадіометром ASD FieldSpec® 3FR 16 червня 2010 р. та фото цих посівів: а – озима пшениця м'яка, різновид лютесценс, сорт Служниця; б – озима пшениця м'яка, різновид еритроспермум, сорт Херсонська 99; в – озима пшениця тверда, різновид гордеїформе, сорт Аргонавт

Значення вегетаційних індексів червоного краю та коефіцієнтів ϵ їхньої варіації для різновидів озимої пшениці на дрібноділянкових посівах Миколаївської області за даними спектрорадіометра ASD FieldSpec® 3FR від 16 червня 2010 р.

| Різновид | Кількість сортів | REP, нм | TCI | NDVI ₇₀₅ | ϵ_{REP} , % | ϵ_{TCI} , % | ϵ_{NDVI} , % |
|---------------|------------------|---------------|-------------|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| Лютесценс | 5 | 715.21 ± 2.93 | 1.31 ± 0.28 | 0.22 ± 0.05 | 0.91 | 48.11 | 54.45 |
| Еритроспермум | 14 | 719.81 ± 0.35 | 1.76 ± 0.07 | 0.26 ± 0.01 | 0.18 | 15.59 | 19.14 |
| Гордеїформе | 4 | 722.14 ± 0.36 | 2.43 ± 0.06 | 0.43 ± 0.01 | 0.10 | 4.92 | 3.34 |

середньоранніми сортами рослини цього сорту на час спектрометрування, ймовірно, містили більше хлорофілу, що підтверджується високим значенням хлорофільного індексу TCl , яке майже вдвічі перевищувало значення TCl для інших пшениць цієї групи. За даними Г. О. Прядкіної [6] цей сорт характеризується більшою тривалістю активної роботи листкової поверхні в репродуктивний період розвитку, що забезпечується підтриманням функціональної активності листків усіх ярусів рослини. Вченими ІФРГ НАНУ для прапорцевих листків сорту Фаворитка у період наливу зерна було виявлено такі особливості обміну речовин, які сприяють підтриманню функціонального стану фотосинтетичного апарату на вищому рівні, ніж для традиційного сорту Миронівська 808 [7].

Отже, можна припустити, що найбільший діапазон відхилень від середніх значень вегетаційних індексів червоного краю різновиду лютеценс спричинений тривалішою фотосинтетичною активністю нових високоінтенсивних сортів на противагу іншим сортам пшениць з безостим колосом. Звісно, вивчення виявленої особливості потребує більшої кількості дистанційних спектрометричних вимірювань і подальших досліджень на ширшому обсязі рослинного матеріалу.

Зіставляючи коефіцієнти варіації, розраховані для трьох досліджених індексів, відзначимо, що для REP властива незначна мінливість варіаційного ряду (менше 1 % для всіх досліджених різновидів озимої пшениці), для TCl й $NDVI_{705}$ — незначна та середня (за винятком високоінтенсивних сортів, які демонстрували високі показники строкатості цих індексів через причини, описані вище). Можливо, це пов'язано з методиками обчислення даних індексів, адже розрахунок значень REP ведеться на підставі відбиття покриву на чотирьох довжинах хвиль, TCl — трьох, а $NDVI_{705}$ — лише двох. Оскільки більшість коефіцієнтів варіації за абсолютним значенням не перевищує 20 %, можна стверджувати про порівняно незначну строкатість досліджуваних індексів червоного краю, а отже, про подальшу доцільність їхнього використання для вивчення особливостей відбиття рослинного покриву.

ВИСНОВКИ

1. За даними спектрорадіометра ASD FieldSpec® 3FR, отриманими у польових умовах на дрібноділянкових посівах демонстраційного полігону елітного насінневого господарства «Золотий колос» на Миколаївщині, розраховано вегетаційні індекси області червоного краю для двох різновидів (лютеценс та еритроспермум, 19 сортів) озимої пшениці м'якої *Triticum aestivum* та різновиду гордеїформе (4 сорти) озимої пшениці твердої *Triticum durum*.

2. Виявлено відмінності значень вегетаційних індексів червоного краю (REP , TCl , $NDVI_{705}$) для проаналізованих різновидів озимої пшениці: найнижчими ці індекси були у озимої пшениці м'якої різновиду лютеценс, а найвищими — у озимої пшениці твердої різновиду гордеїформе.

3. Відносно незначні величини коефіцієнтів варіації досліджених вегетаційних індексів червоного краю свідчать про порівняно незначну строкатість їхніх значень, а отже, — про подальшу доцільність їхнього використання для вивчення особливостей відбиття рослинного покриву та зіставлення з аналогічними індексами, розрахованими за космічними знімками.

Автори вдячні співробітникам елітного насінневого господарства «Золотий колос» м. Миколаєва за відмінний стан демонстраційного полігону № 7 і можливість проведення вимірювань, а також О. О. Стасику за корисні поради.

1. *Донець В. В.* Обґрунтування структури апаратно-програмного комплексу для дистанційного зондування рослинності в польових умовах: Автореф. ... дис. канд. техн. наук. — К., 2010. — 22 с.
2. *Казанцев Т. А., Туменов Л. В., Кочубей С. М.* Дистанционные измерения динамики содержания хлорофилла в посевах озимой пшеницы // Физиол. и биохим. культ. растений. — 2010. — 42, № 6. — С. 544—549.
3. *Кочубей С. М., Казанцев Т. А., Донець В. В. и др.* Гиперспектральный аппаратно-программный комплекс и его информативные возможности в дистанционном зондировании растительности // Казахско-укр. конф. «Современные космические технологии», Алматы, 7—9 октября 2008 г. — Сб. мат. — Алматы, 2008. — С. 28—30.
4. *Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сахацький О. І. та ін.* Зіставлення супутникових та наземних гіперспект-

- ральних даних при визначенні позиції червоного краю спектрів відбиття // Космічна наука і технологія. — 2010. — **16**, № 3. — С. 39—45.
5. Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сибірцева О. М. та ін. Дослідження варіацій індексів червоного краю спектрів відбиття пшениці над газовим родовищем // Космічна наука і технологія. — 2010. — **16**, № 6. — С. 5—10.
 6. Прядкіна Г. О. Онтогенетична динаміка параметрів фотосинтетичного апарату посівів озимої пшениці різних за зерновою продуктивністю генотипів // Особливості фотосинтезу і продукційного процесу у високоінтенсивних генотипів озимої пшениці. — К.: Основа, 2011. — С. 64—73.
 7. Соколовская-Сергиенко О. Г., Кириций Д. А. Углекислотный газообмен и активность супероксиддисмутазы флаговых листьев различных сортов озимой пшеницы // Вісник Укр. тов-ва генетиків і селекціонерів. — 2010. — **8**, № 1. — С. 46—50.
 8. Яценко В. А., Кочубей С. М., Хандрига П. А. и др. Новый метод дистанционного оценивания содержания хлорофилла в растительности и его программно-аппаратная реализация // Космічна наука і технологія. — 2007. — **13**, № 3. — С. 35—44.
 9. Biewer S., Erasmi S., Fricke T., Wachendorf M. Prediction of yield and the contribution of legumes in legume-grass mixtures using field spectrometry // Precision Agriculture. — 2009. — **10**, № 2. — P. 128—144.
 10. Dash J., Curran P. J. The MERIS terrestrial chlorophyll index // Int. J. Remote Sens. — 2004. — **25**. — P. 5403—5413.
 11. Eitel J. U. H., Long D. S., Gessler P. E., Smith A. M. S. Using *in-situ* measurements to evaluate the new RapidEye™ satellite series for prediction of wheat nitrogen status // Int. J. Remote Sens. — 2007. — **28**, N 18. — P. 4183—4190.
 12. Gitelson A. A., Merzlyak M. N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation // J. Plant Physiology. — 1994. — **143**. — P. 286—292.
 13. Herrmann I., Pimstein A., Karnieli A., et al. LAI assessment of wheat and potato crops by VENµS and Sentinel-2 bands // Remote Sens. Environ. — 2011. — **115**, N 8. — P. 2141—2151.
 14. Horler D. N. H., Dockray M., Barber J. The red edge of plant leaf reflectance // Int. J. Remote Sens. — 1983. — **4**. — P. 273—288.
 15. Kiang N. Y., Siefert J., Govindjee, Blankenship R. E. Spectral signatures of photosynthesis. I. Review of Earth organisms // Astrobiology. — 2007. — N 7. — P. 222—251.
 16. Ustin S. L., Gitelson A. A., Jacquemoud S., et al. Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy // Remote Sens. Environ. — 2009. — **113**. — Supplement 1 (Imaging Spectroscopy Special Issue). — P. S67—S77.
 17. Yatsenko V., Kochubey S., Donets V., Kazantsev T. Hardware software complex for chlorophyll estimation in phytocenoses under field conditions // Proc. of SPIE. — 2005. — **5964**. — P. 267—270.

Надійшла до редакції 11.07.11

G. M. Zholobak, Z. M. Shportiuik,
O. N. Sibirtseva, S. S. Dugin

STUDY OF VEGETATION RED EDGE INDICES OF REFLECTANCE SPECTRA FOR CROPS OF WINTER WHEAT CULTIVATED IN THE STEPPE ZONE OF UKRAINE

We give some results of spectrometry surveying with ASD FieldSpec®3FR for small-plot crops of the demonstration test site of the elite seminal enterprise «Zoloty Kolos» in the Mykolaiv Region. On the basis of these results, vegetation red edge indices (REP, TCI, NDVI₇₀₅) are calculated for 19 cultivars of hard red winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and 4 cultivars of winter durum wheat (*Triticum durum* Desf.). The lowest values of indices are detected for awnless hard red winter wheat var. *lutescens* and the highest ones are seen for winter durum wheat var. *hordeiforme*. We discuss a wide range of oscillations of values for vegetation red edge indices in the case of winter wheat var. *lutescens*.

УДК 520.02, 520.072, 520.075

А. В. Шульга, Е. С. Козырев, Е. С. Сибирякова, М. И. Халалей, В. М. Чернозуб

Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія», Миколаїв

МОБИЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ТЕЛЕСКОПОВ НИИ НАО ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ ОБЪЕКТОВ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Мобільний комплекс телескопів МОБИТЕЛ був розроблений в НДІ «Миколаївська астрономічна обсерваторія» для спостережень штучних та природних космічних об'єктів. Наведено технічні характеристики комплексу МОБИТЕЛ, а також дані тестових спостережень.

ВВЕДЕНИЕ

Мобильный комплекс телескопов МОБИТЕЛ является транспортируемым астрономическим средством и предназначен для высокоточных измерений угловых координат естественных и искусственных космических объектов (КО), движущихся по геоцентрическим и гелиоцентрическим орбитам.

Основными преимуществами мобильного варианта оптического астрономического средства являются:

- экономическая целесообразность, обусловленная отсутствием капитального строительства, что существенно снижает стоимость телескопа;
- технологическая целесообразность — комплекс позволяет одновременно проводить наблюдения разного рода КО с использованием нескольких телескопов, установленных на одном транспортируемом средстве;
- возможность проведения астрономических наблюдений в благоприятных астроклиматических и метеорологических условиях, а также в заранее определенных географических пунктах.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Комплекс телескопов МОБИТЕЛ предназначен для решения задач околоземной астрономии, таких как наблюдения КО искусственного

и естественного происхождения. В частности, в 2010 г. на телескопе МОБИТЕЛ в тестовом режиме проводились наблюдения навигационных и низкоорбитальных искусственных КО, а также астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), в том числе и потенциально опасных астероидов (ПОА). Все перечисленные объекты имеют значительную видимую скорость, отличную от скорости суточного движения звезд. Для наблюдения такого рода объектов обычно применяется двух- или трехосные телескопы, обеспечивающие механическое сопровождение КО. На МОБИТЕЛ применяются методы электронного и цифрового сопровождения объектов на неподвижной в момент наблюдения монтировке. Методы электронного и цифрового сопровождения разработаны в Научно-исследовательском институте «Николаевская астрономическая обсерватория» [1].

Для телескопов, оснащенных полнокадровыми ПЗС-камерами, применяется режим работы камеры — time delay and integration (TDI), который позволяет накапливать изображение объекта вдоль траектории движения по матрице. Основным условием применения режима работы TDI является установка столбцов ПЗС-матрицы параллельно направлению видимого движения наблюдаемого КО, для чего на телескопах НИИ НАО применяется специальное механическое устройство — поворотная платформа [2]. Поворотная платформа обеспечивает вращение ПЗС-камеры вокруг оптической оси объектива. При-

менение режима TDI в сочетании с поворотной платформой позволяет наблюдать подвижные объекты с экспозицией, ограниченной только временем прохождения изображения КО по ПЗС-матрице телескопа.

Для телескопов, оснащенных телевизионными ПЗС-камерами, применяется способ накопления кадров со смещением. Способ заключается в сложении кадров видеоряда со смещением, соответствующим смещению изображения наблюдаемого объекта в поле зрения телескопа за время накопления кадра [3].

Применение методов электронного и цифрового сопровождения обусловило направление модернизации телескопов КТ-50 и АФУ-75, входящих в состав МОБИТЕЛ.

СТРУКТУРА КОМПЛЕКСА МОБИТЕЛ

В состав комплекса телескопа МОБИТЕЛ входят:

- транспортируемая платформа с павильоном-укрытием;
- телескоп КТ-50-М (модернизированный);
 - объектив ЛЗО-50 ($D = 500$ мм, $F = 300$ мм),
 - поворотная платформа,
 - ПЗС-камера Alta U9000 (поле зрения $0.7 \times 0.7^\circ$) с фотометрическим фильтром R;
- телескоп АФУ-75 (модернизированный);
 - объектив Сатурн ($D = 260$ мм, $F = 750$ мм),
 - поворотная платформа,

- ПЗС-камера Alta U9000 (поле зрения $2.8 \times 2.8^\circ$);
- телевизионный телескоп ТВТ (изготовленный);
 - объектив Таир-11А ($D = 50$ мм, $F = 135$ мм),
 - телевизионная ПЗС-камера Watec LCL902H (поле зрения $2.8 \times 2.1^\circ$);
- система определения местоположения и единого времени;
- система независимого энергообеспечения.

Транспортируемая платформа с павильоном-укрытием. Транспортируемая платформа (ТП) в рабочем (развернутом) положении является основанием для монтаровок телескопов. На большие расстояния по автомобильным дорогам перевозка ТП осуществляется на автомобильном прицепе. На небольшие расстояния по пересеченной местности перевозка ТП производится с использованием колесных пар самой платформы. Для перевода телескопа из транспортного положения в рабочее и обратно оба хода ТП (передний и задний) оборудованы специальным гидравлическим устройством. Конструкция ТП обеспечивает высокоточное горизонтирование телескопов в полевых условиях с помощью винтовых домкратов. Винтовые домкраты установлены вдоль оси ТП на откидных опорах и обеспечивают опорную базу в 3.5 м вдоль меридиана и первого вертикала при установке на местности.

Для защиты ТП и телескопов от атмосферных осадков в НИИ НАО спроектирован и изготовлен павильон-укрытие (рис. 1, а) транспортиру-

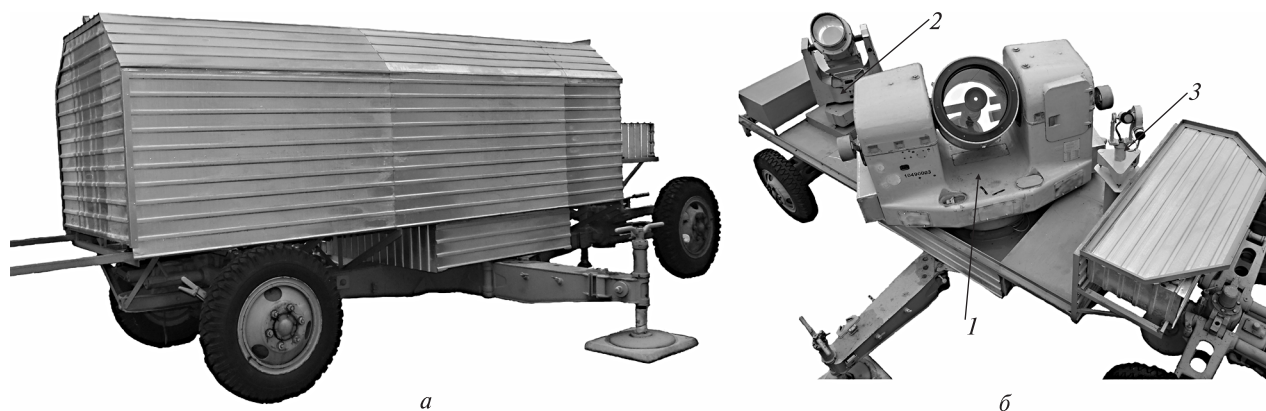


Рис. 1. Внешний вид комплекса телескопов МОБИТЕЛ: а — укрытие телескопа, б — транспортируемая платформа с телескопами

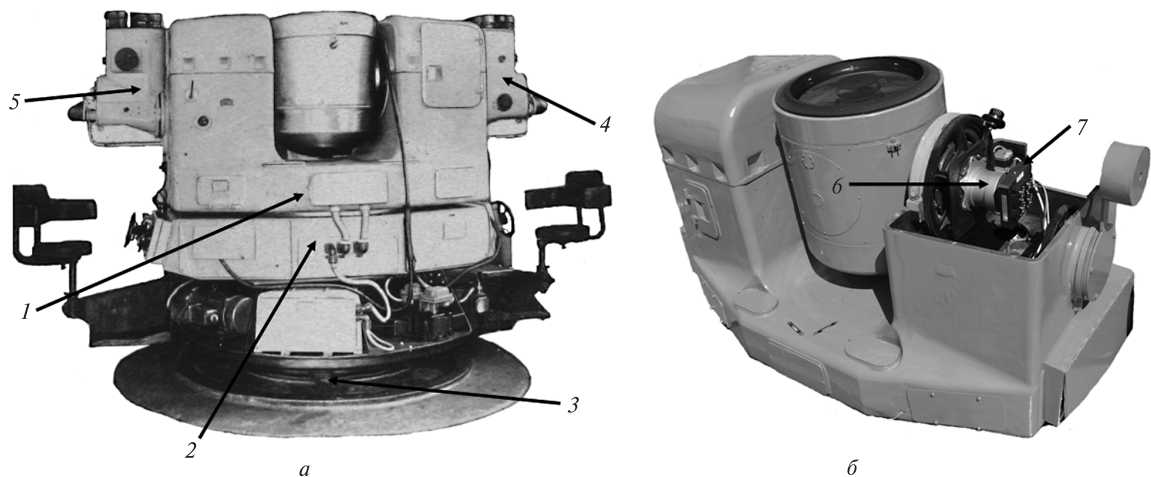


Рис. 2. Комплектация телескопа КТ-50: а, б — до и после модернизации соответственно

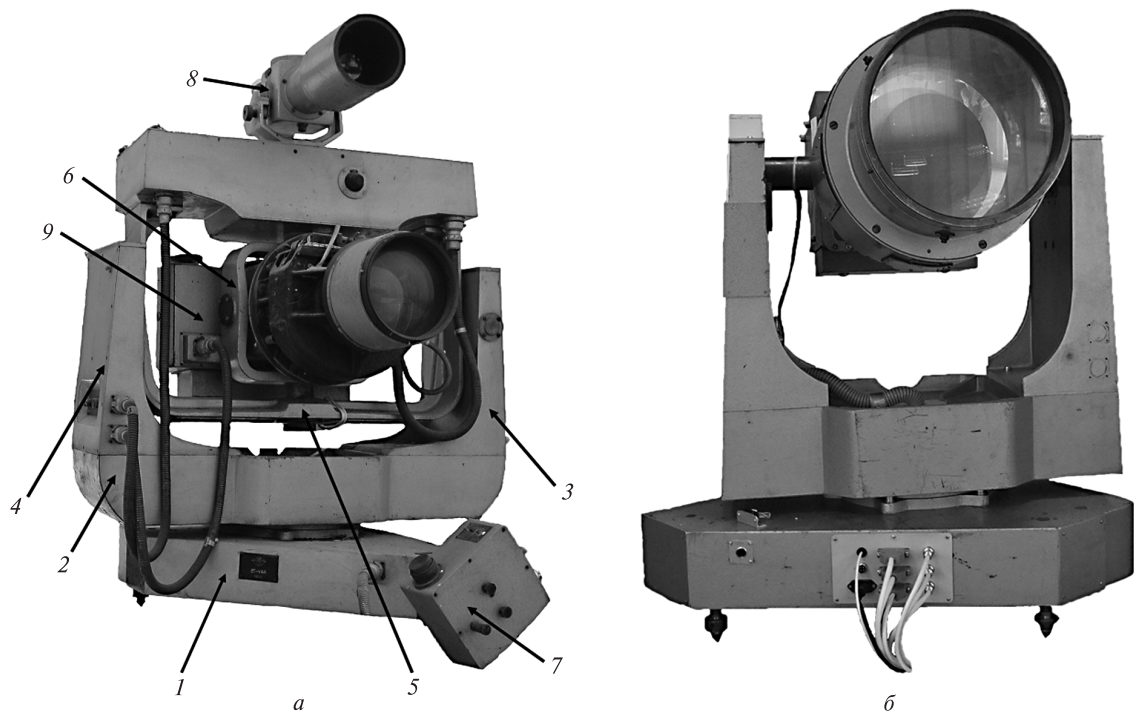


Рис. 3. Комплектация телескопа АФУ-75: а, б — до и после модернизации соответственно

емой платформы с телескопами (рис. 1, б). В укрытии предусмотрена температурная изоляция и установлена охранная сигнализация. Укрытие движется по рельсовым путям, прикрепленным к транспортируемой платформе.

Телескоп КТ-50 (модернизированный). Автоматизация процесса наблюдения на телескопе

КТ-50 (рис. 2, а) позволила в ходе модернизации оставить только алидадную часть 1 телескопа с объективом. Блок управления 2 и станина с вращающейся платформой 3 были демонтированы. На алидадной части были демонтированы горизонтальный 4 и вертикальный 5 визиры. На месте кинокамеры в правой цапфе объектива

установлена поворотная платформа 6 с ПЗС-камерой 7 (рис. 2, б). В приводах телескопа по азимуту и углу места использовались штатные червячные пары, а также спроектированные и изготовленные в НИИ НАО червячные редукторы. Проведенная модернизация привела к значительному облегчению конструкции телескопа КТ-50, вес телескопа был уменьшен в 3.6 раза и составил 1250 кг.

Телескоп АФУ-75 (модернизированный). Переход от механического к электронному сопровождению позволил отказаться от двух дополнительных осей в телескопе АФУ-75.

В результате модернизации системы наведения телескопа АФУ-75 (рис. 3, а) основание лиры 2 уменьшено в размерах на 300 мм. Демонтированы полурама горизонтальной оси 5, рама 6 камеры, привод 7 экваториальной платформы, телескоп-гид 8, кассетная часть 9. Червячная пара орбитальной оси использована при изготовлении привода по оси азимута, размещенного в корпусе экваториальной платформы 1. Горизонтальная ось лежит на лагерах левой и правой стоек лиры. В левой стойке 4 установлена изготовленная червячная пара. Для балансировки телескопа изготовлены новые балансирсы. В корпусе лентопротяжного механизма размещены поворотная платформа и ПЗС-камера. Демонтирован обтюраторный затвор. Проведенная модернизация привела к значительному упрощению и облегчению конструкции телескопа АФУ-75 (рис. 3, б), масса телескопа составила 320 кг.

Телевизионный телескоп. Азимутальная монтировка телевизионного телескопа (ТВТ) (рис. 4) разработана и изготовлена в НИИ НАО. Телевизионный телескоп отличается малой массой (25 кг), а также большой скоростью наведения $20^\circ/\text{с}$. Наблюдения проводятся методом цифрового сопровождения на неподвижном телескопе с применением способа накопления кадров со смещением [3].

Поворотная платформа. Поворотная платформа (ПП) представляет собой механическое устройство с приводом для вращения ПЗС-камеры вокруг оптической оси объектива [2]. ПП (рис. 5) включает в себя: шаговый двигатель 1,



Рис. 4. Внешний вид телевизионного телескопа



Рис. 5. Поворотная платформа

датчик 2 угла поворота, платформу 3 с червячной передачей. Одним фланцем ПП крепится к трубе телескопа, ко второму фланцу ПП крепится ПЗС-камера 4. В состав комплекса МОБИТЕЛ входит две поворотные платформы, установленные на телескопах КТ-50 и АФУ-75.

СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ И ЕДИНОГО ВРЕМЕНИ

Система определения местоположения и единого времени разработана и изготовлена в НИИ НАО на базе GPS-модуля Resolution T. Для работы с GPS приемником разработан интерфейсный модуль, который позволяет:

- эмулировать работу com-порта для считывания данных при подключении через USB;
- преобразовывать напряжение, поступающее с шины USB, из 5 В в 3.3 В для питания GPS-приемника.

Разработанная система потребляет малое количество энергии и имеет удобный USB интерфейс. Система определения местоположения и единого времени позволяет синхронизировать время со шкалой UTC с ошибкой, не превышающей 0.0001 с.

СИСТЕМА НЕЗАВИСИМОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ

В настоящее время решается вопрос автономного электроснабжения с использованием портативных электростанций-генераторов, работающих на бензиновых или дизельных двигателях внутреннего сгорания. Требуемая мощность рассчитывается как сумма мощностей всех активных приборов с 10 % запасом. Учитывая то, что наблюдения на телескопе МОБИТЕЛ, находящемся в удаленном районе, для астрономов-наблюдателей будут носить характер экспедиций, следует иметь в виду возможность подключения дополнительных потребителей электроэнергии: холодильника, электрообогревательных и электроотопительных приборов. Общую мощность этих приборов можно оценить величиной 2—2.5 Квт.

СТРУКТУРА ПРИВОДОВ ТЕЛЕСКОПОВ КОМПЛЕКСА МОБИТЕЛ

- Червячные пары, штатные или изготовлены в НИИ НАО;

- редукторы цилиндрические, штатные или изготовленные в НИИ НАО;

- датчики угла абсолютные, разрешение 11 бит (производство Китай), на различных осях редукция составляет от 11 до 124;

- шаговые двигатели фирмы Nanotec;

- блоки управления приводами производства НИИ НАО:

- драйверы шаговых двигателей фирмы «Ever Elettronica»,

- силовой блок питания шаговых двигателей,

- контролер шаговых двигателей на три или две оси на базе микроконтроллеров ATMEL, изготовлен в НИИ НАО,

- плата дискретного ввода/вывода фирмы «Advantage».

СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСА МОБИТЕЛ

Пакет программ системы программного управления, разработанный в НИИ НАО, обеспечивает полную автоматизацию процесса наблюдений и включает в себя следующие программы:

- Commutator — серверная программа, обеспечивающая сетевое взаимодействие между программами, которые участвуют в процессе наблюдения.

- Control — программа автоматического управления процессом наблюдения. Основные функции программы: чтение эфемерид и автоматический выбор списка наблюдаемых объектов с учетом оптимальных точек наблюдения. Программа также осуществляет управление программами Motion, CCD и Video.

- Motion — программа управления наведением телескопа. Основными функциями программы являются: управление работой двигателей, считывание значений с датчиков угла, перевод экваториальных координат в систему координат телескопа, управление наведением поворотной платформы.

- CCD — программа управления работой полнокадровых ПЗС-камер производства «Силар» и «Арогее» с применением разных режимов работы (накопление, TDI). Включает в себя функции автоматического выбора времени экспонирования

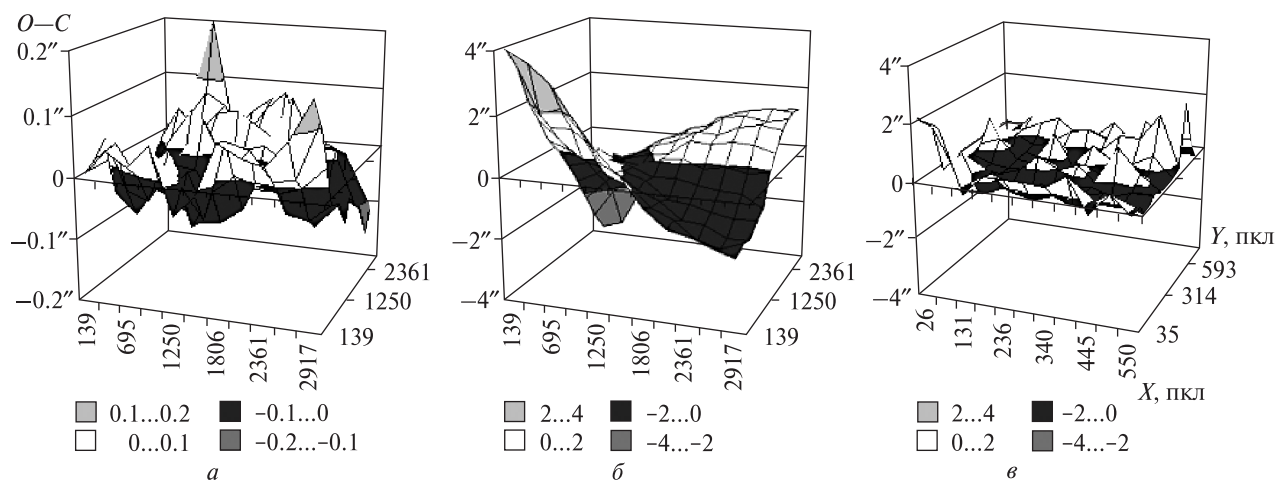


Рис. 6. Распределение значений $O - C$ для опорных звезд по полю ПЗС-матриц телескопов: а — КТ-50, б — АФУ-75, в — ТВТ

с учетом скорости и блеска наблюдаемого объекта, формирования, визуализации, сохранения и первичной обработки ПЗС-кадров, а также регистрации моментов времени наблюдений.

- Video — программа управления работой телевизионных ПЗС-камер через плату видеозахвата. Основными функциями являются настройка параметров оцифровки видеосигнала, визуализация и сохранение видеоряда, параллельное накопление изображений объекта и опорных звезд с использованием способа накопления кадров со смещением, регистрация моментов времени наблюдений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Для оценки проникающей способности телескопов, а также погрешности получаемой информации проведены тестовые наблюдения звездных площадок. По результатам наблюдений выполнена обработка полученных кадров в системе каталога UCAC-3. В табл. 1 представлены сред-

ние квадратичные отклонения координат звезд и предельная звездная величина (m) для каждого телескопа, входящего в состав комплекса МОБИТЕЛ.

Для исследования качества объективов были построены распределения невязок $O - C$ опорных звезд по полю ПЗС-матрицы, полученных при использовании линейной модели редукции.

Для объективов телескопа КТ-50 (рис. 6, а) и ТВТ (рис. 6, в) распределение оказалось равно-

Таблица 1. Астрометрические характеристики телескопов комплекса МОБИТЕЛ

| Телескоп | Режим работы ПЗС-камеры | τ , с | СКО | m |
|----------|--------------------------------|------------|------------|-------------------|
| КТ-50 | TDI (bin = 0) | 10.0 | 0.04–0.25" | 17.0 ^m |
| КТ-50 | кадровый (bin = 2) | 0.5 | 0.13–0.47 | 15.5 |
| АФУ-75 | кадровый (bin = 2) | 0.5 | 0.30–1.00 | 14.0 |
| ТВТ | накопление кадров со смещением | 30.0 | 1.40–4.00 | 13.0 |

Таблица 2. Погрешности определения координат космических объектов, оснащенных уголковыми отражателями

| Телескоп | Тип объектов (высота орбиты) | Количество объектов | Количество положений | СКО | |
|----------|------------------------------|---------------------|----------------------|----------|----------|
| | | | | α | δ |
| ТВТ | низкоорбитальные | 4 | 144 | 3.56" | 3.68" |
| КТ-50 | навигационные (20000 км) | 2 | 120 | 0.53 | 0.57 |
| АФУ-75 | навигационные (20000 км) | 4 | 57 | 1.68 | 1.63 |

мерным, что свидетельствует о незначительных деформациях изображения оптикой. Для объектива телескопа АФУ-75 выявлена значительная неравномерность распределения $O - C$ по полю ПЗС-матрицы (рис. 6, б), что говорит о необходимости дополнительных исследований.

На всех телескопах, входящих в комплекс МОБИТЕЛ, проводились тестовые наблюдения искусственных космических объектов, оснащенных уголковыми отражателями. Для определения погрешности наблюдений проводилось сравнение полученных координат КО с эфемеридой International laser ranging system. Погрешности, полученные в результате сравнения, представлены в табл. 2.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕЛЕСКОПОВ КОМПЛЕКСА МОБИТЕЛ

Технические и астрометрические характеристики телескопов, входящих в состав МОБИТЕЛ, а также применяемые методы наблюдений позволяют решать задачи наблюдений объектов околоземного пространства. В списки наблюдаемых объектов на МОБИТЕЛ включены КО:

- искусственного происхождения, а именно: искусственные спутники Земли (ИСЗ) и космический мусор (КМ) на низких (200—2000 км), средних (2000—20000 км) и геостационарных (36000 км) орбитах;
- природного происхождения, а именно: астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ), включая

Таблица 3. Объекты, наблюдаемые на телескопах комплекса МОБИТЕЛ

| Космические объекты в околоземном пространстве | КТ-50 | АФУ-75 | ТВТ |
|--|-------|--------|-----|
| Низкоорбитальные ИСЗ (200—500 км) | | * | * |
| Низкоорбитальные ИСЗ (500—2 500 км) | * | * | * |
| Среднеорбитальные ИСЗ (2 500—36 000 км) | * | * | |
| Геосинхронные ИСЗ (36 000 км) | * | * | |
| Астероиды, сближающиеся с Землей | * | | |
| Потенциально опасные астероиды | * | | |

потенциально опасные астероиды (ПОА), чьи траектории пересекаются с орбитой Земли [4, 5].

В табл. 3 звездочкой отмечены объекты, наблюдаемые телескопами комплекса.

Списки наблюдаемых объектов сформированы в соответствии с выполнением национальных и международных наблюдательных программ. Для ИСЗ и КМ списки составляются с учетом потребностей системы контроля космического пространства Украины. Для формирования списков АСЗ и ПОА используется информация международного центра малых планет и Neodys (Near Earth Objects — Dynamic Site Department of Mathematics, University of Pisa).

1. 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. — Москва: ИНАСАН, 2000. — С. 361—371.
2. 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.
3. 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.
4. Shulga O., Kozryrev Y., Sybiryakova Y. Observation of the fast NEO objects with prolonged exposure // Proc. of IAU Symp. N 248 «A Giant Step: From Milli- to Micro-arcsecond Astrometry». — Shanghai, 2007. — P. 128—129.
5. Shulga O., Kozryrev 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.

Надійшла до редакції 08.02.12

O. V. Shulga, Y. S. Kozryrev, Y. S. Sybiryakova, M. I. Khalaley, V. M. Chernozub

THE MOBILE TELESCOPE COMPLEX OF RI MAO FOR OBSERVATION OF NEAR-EARTH SPACE OBJECTS

The mobile telescope complex (MOBITEL) was designed and made at the Research Institute Mykolaiv Astronomical Observatory (RI MAO) for observations of artificial and natural space objects. The technical characteristics of the MOBITEL complex are described and some results of test observations are given.

УДК 528.2:629.78

О. А. Хо́да

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

ОБРАБОТКА ЭТАЛОННОЙ ТЕСТОВОЙ КАМПАНИИ EPN В ЦЕНТРЕ АНАЛИЗА ГНСС-ДАННЫХ ГАО НАН УКРАИНЫ

У Центрі аналізу ГНСС-даних ГАО НАН України було оброблено еталонну тестову кампанію EPN за допомогою програмного комплексу «Bernese GPS Software ver. 5.0». Показано, що комбінований розв'язок еталонної тестової кампанії покращується при включенні до нього розв'язку ГАО НАН України.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с октября 2003 г. в Центре анализа ГНСС-данных Главной астрономической обсерватории НАН Украины (ГАО) проводится регулярная обработка наблюдений, полученных на восточноевропейских перманентных ГНСС-станциях. Естественно, возникает вопрос о качестве выполненной обработки. Долгое время одним из критериев качества было сравнение полученного решения с комбинированным решением Европейской перманентной ГНСС-сети (EPN) путём определения параметров преобразования Гельмерта между этими двумя решениями.

Понятно, что этот способ не идеален, так как сравниваемые решения включали в себя разное количество перманентных станций, покрывающих разные по площади территории. Кроме того, для задания системы координат использовались различающиеся наборы референчных станций.

Эталонная тестовая кампания EPN позволяет избежать вышеназванных проблем. Идея эталонной тестовой кампании появилась на Рабочей встрече центров анализа ГНСС-данных EPN в г. Варшаве (ноябрь 2010 г.) [7]. Каждый центр анализа должен был обработать наблюдения GPS-спутников, выполненных на определённых

перманентных станциях в определённый период времени. Сравнение индивидуальных решений каждого центра анализа с комбинированным решением позволяет определить качество полученных решений.

Для эталонной тестовой кампании были выбрана сеть, состоящая из 30 станций, расположенных на территории Европы (рис. 1), и период наблюдений, соответствующий GPS-неделе 1381 (25 июня — 1 июля 2006 г., дни года 176—182). При обработке должны использоваться абсолютные модели вариаций фазовых центров комбинаций антенна—купол, комбинированные точные эфемериды GPS-спутников и параметры вращения Земли, полученные в результате кампании Международной ГНСС-службы (IGS) репроцессинга GPS-данных (IGS Repro1) [4] и представленные в системе координат IGS05.

Эталонная тестовая кампания EPN была обработана в Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины с помощью программного комплекса «Bernese GPS Software ver. 5.0» [2] в соответствии требованиям EPN [3]. Обработка была выполнена в следующей последовательности.

1. Предварительная обработка суточных сессий наблюдений.
2. Получение оценок координат для отдельного дня наблюдений.
3. Получение оценок координат для недели.
4. Получение финальных значений зенитных тропосферных рефракций для всех станций.

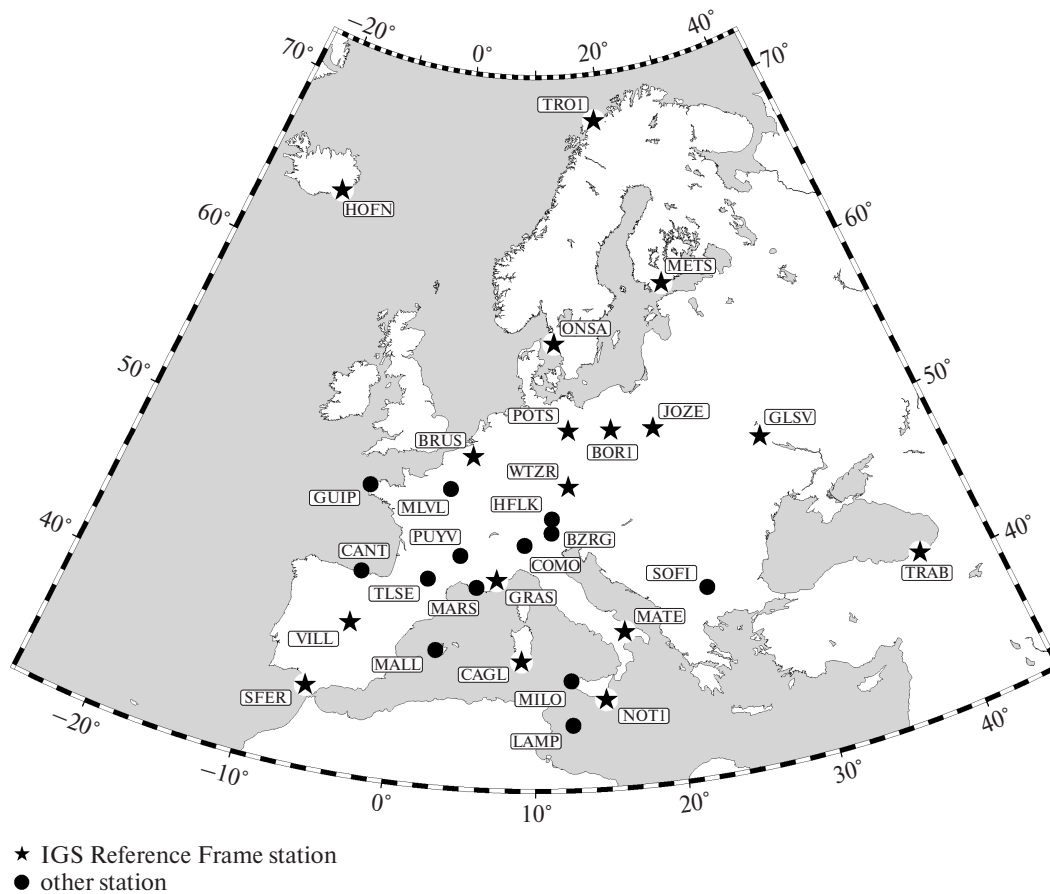


Рис. 1. Расположение GPS-станций

Схема получения решения показана на рис. 2 и 3. Подробнее процедура обработки описана в работе [1].

Система координат IGS05 задавалась путём ограничения No-Net Translation на координаты референчных станций (BOR1, BRUS, CAGL, GLSV, GRAS, HOFN, JOZE, MATE, METS, NOT1, ONSA, POTS, SFER, TRAB, TRO1, VILL, WTZR) из соответствующего каталога. Вычисленные координаты станций сети приведены в табл. 1.

Полученный файл недельного решения (обозначенного как MAO) в формате SINEX [6] был отослан Координатору анализа данных EPN в Федеральное агентство картографии и геодезии (BKG, Германия).

Для получения комбинированного недельного решения (обозначенного как EUQ) вместе с

решением ГАО НАН Украины использовалось семнадцать решений тринадцати центров анализа ГНСС-данных (табл. 2). Стоит заметить, что из восемнадцати решений двенадцать было получено с помощью программного комплекса «Bernese GPS Software», пять — с помощью программного обеспечения GIPSY—OASIS [8], одно — с помощью программного обеспечения GAMIT/GLOBK [5].

Средние значения повторяемости координат станций (критерия точности оценки координат) для комбинированного решения EUQ составили 0.88 мм, 1.08 мм и 2.28 мм для северной, восточной и высотной составляющих соответственно. В то же время средние значения повторяемости координат станций для комбинированного решения, полученного без учёта решения ГАО НАН Украины, составили 0.91 мм, 1.11 мм и

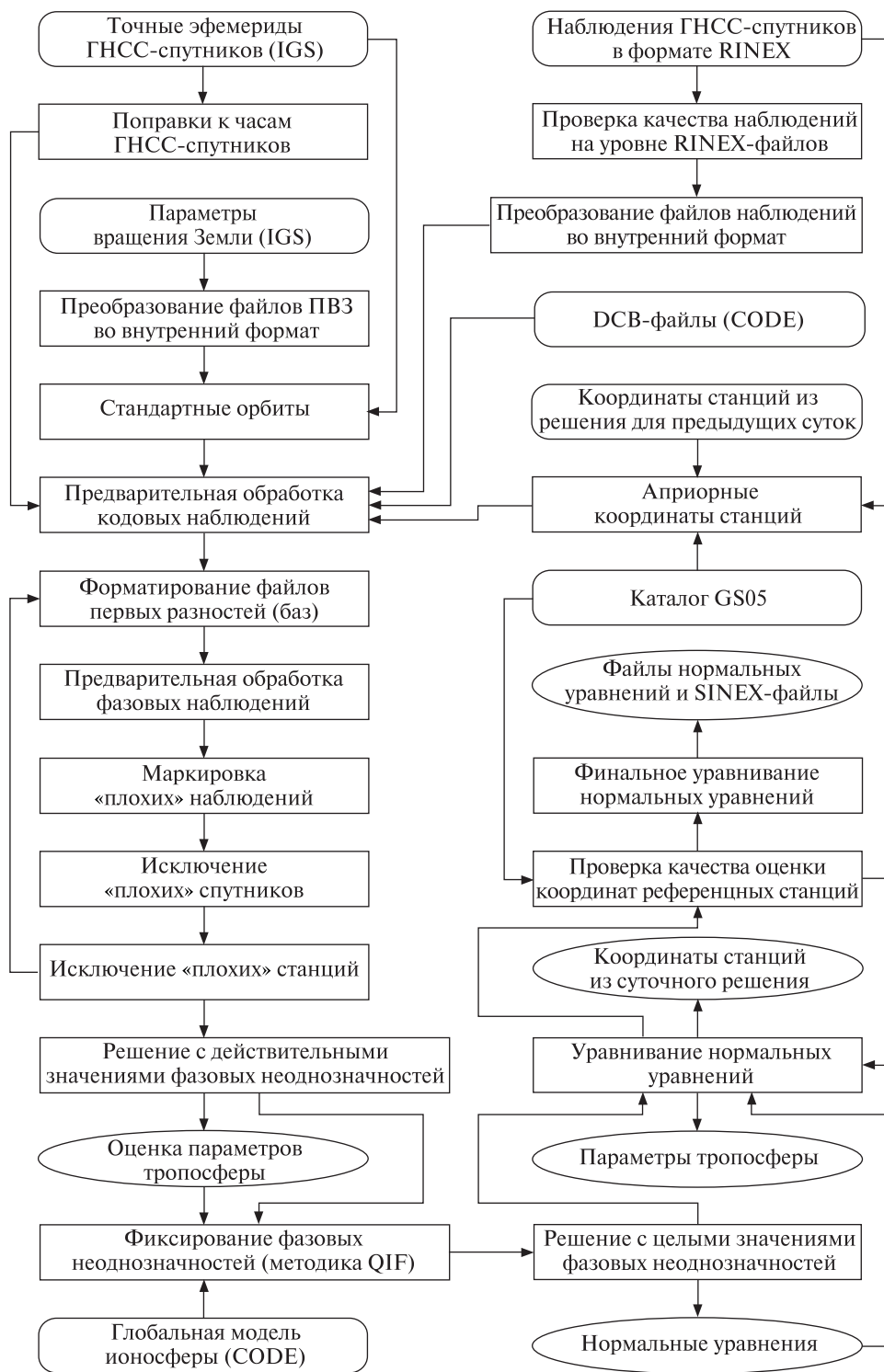


Рис. 2. Диаграмма получения суточного решения

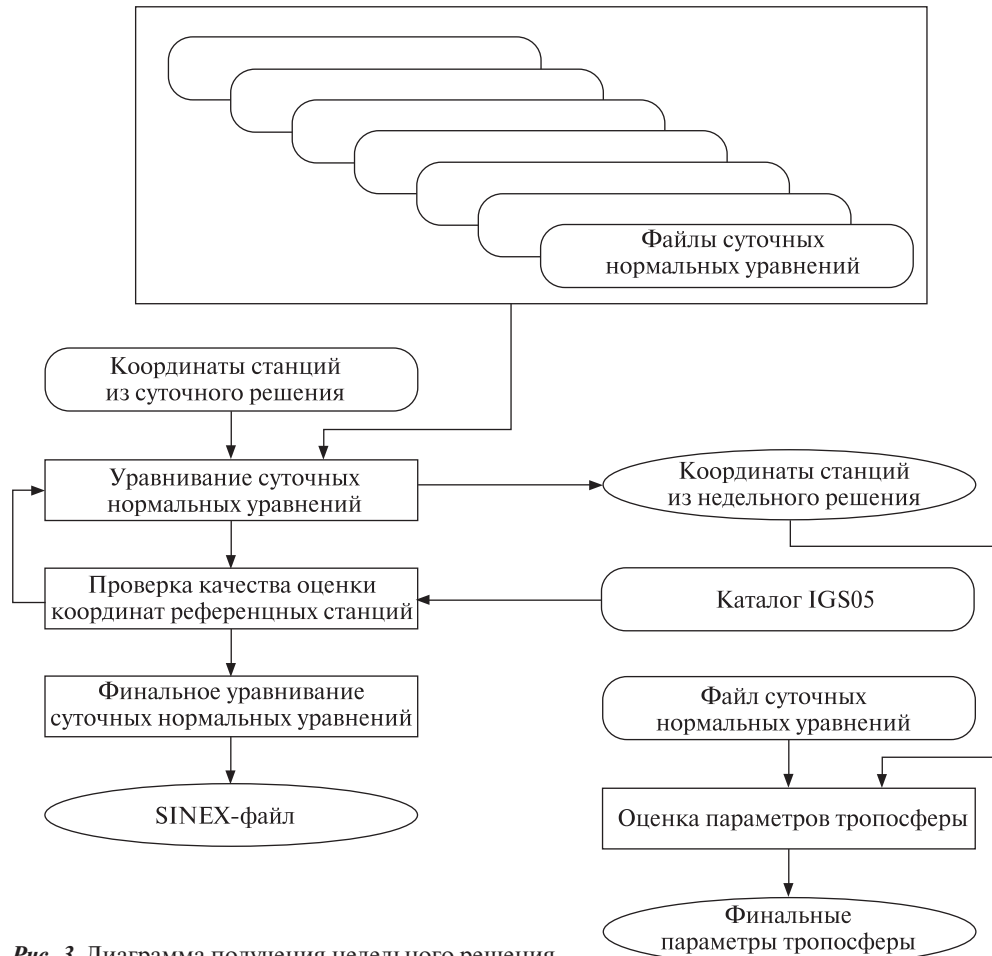


Рис. 3. Диаграмма получения недельного решения

Таблица 1. Координаты станций, система координат: IGS05, эпоха: 28 июня 2006 г. 12:00 (время GPS)

| Идентификатор | Номер DOMES | Станция | X, м | Y, м | Z, м |
|---------------|-------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------|
| BOR1 | 12205M002 | Боровец (Польша) | 3738358.4289 | 1148173.7329 | 5021815.7855 |
| BRUS | 13101M004 | Брюссель (Бельгия) | 4027893.7274 | 307045.8450 | 4919475.1341 |
| BZRG | 12751M001 | Больцано (Италия) | 4312657.4700 | 864634.6846 | 4603844.4518 |
| CAGL | 12725M003 | Кальяри (Италия) | 4893378.8033 | 772649.8198 | 4004182.1806 |
| CANT | 13438M001 | Сантандер (Испания) | 4625924.4617 | -307096.4909 | 4365771.4121 |
| COMO | 12761M001 | Комо (Италия) | 4398306.2593 | 704149.8864 | 4550154.6872 |
| GLSV | 12356M001 | Киев/Голосеево (Украина) | 3512888.9258 | 2068979.9024 | 4888903.2228 |
| GRAS | 10002M006 | Грас/Коссоль (Франция) | 4581690.8865 | 556114.8639 | 4389360.8155 |
| GUIP | 10004M501 | Гипава (Франция) | 4226392.7388 | -326080.2446 | 4749929.4043 |
| HFLK | 11006S003 | Инсбрук (Австрия) | 4248505.0336 | 855575.7700 | 4667172.3099 |
| HOFN | 10204M002 | Хёбн (Исландия) | 2679689.9665 | -727951.2033 | 5722789.3317 |
| JOZE | 12204M001 | Юзефослав (Польша) | 3664940.1371 | 1409153.8868 | 5009571.3980 |
| LAMP | 12706M002 | Лампедуза (Италия) | 5073164.7372 | 1134512.5931 | 3683181.1681 |
| MALL | 13444M001 | Пальма (Испания) | 4919369.4552 | 225499.8754 | 4039849.8480 |

Окончание табл. 1

| Идентификатор | Номер DOMES | Станция | X, м | Y, м | Z, м |
|---------------|-------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------|
| MARS | 10073M008 | Марсель (Франция) | 4630532.7517 | 433946.3431 | 4350142.7484 |
| MATE | 12734M008 | Матера (Италия) | 4641949.5314 | 1393045.4571 | 4133287.4834 |
| METS | 10503S011 | Метсяхови (Финляндия) | 2892570.7623 | 1311843.4673 | 5512634.1539 |
| MILO | 12758M001 | Трапани — Мило (Италия) | 4911058.9459 | 1096340.3248 | 3906215.0348 |
| MLVL | 10092M001 | Марн-ла-Валле (Франция) | 4201576.9468 | 189860.1171 | 4779064.8084 |
| NOT1 | 12717M004 | Ното (Италия) | 4934546.2069 | 1321265.0391 | 3806456.1419 |
| ONSA | 10402M004 | Онсала (Швеция) | 3370658.5190 | 711877.1588 | 5349786.9669 |
| POTS | 14106M003 | Потсдам (Германия) | 3800689.6130 | 882077.4091 | 5028791.3334 |
| PUYV | 10065M001 | Ле-Пюи-ан-Веле (Франция) | 4504322.1010 | 305405.2446 | 4491277.4177 |
| SFER | 13402M004 | Сан-Фернандо (Испания) | 5105518.9941 | -555145.8501 | 3769803.3918 |
| SOFI | 11101M002 | София (Болгария) | 4319372.0652 | 1868687.8118 | 4292063.9481 |
| TLSE | 10003M009 | Тулуза (Франция) | 4627851.8136 | 119640.0467 | 4372993.5673 |
| TRAB | 20808M001 | Трабзон (Турция) | 3705250.3392 | 3084421.7197 | 4162044.7870 |
| TRO1 | 10302M006 | Тромсё (Норвегия) | 2102928.4499 | 721619.4652 | 5958196.2664 |
| VILL | 13406M001 | Вильяфранка (Испания) | 4849833.6787 | -335048.9968 | 4116014.9506 |
| WTZR | 14201M010 | Ветцель (Германия) | 4075580.5303 | 931853.8211 | 4801568.1490 |

Таблица 2. Центры анализа ГНСС-данных

| Код решения | Центр анализа ГНСС-данных | Программное обеспечение |
|-------------|---|--|
| A_Q | Итальянское космическое агентство, Центр космической геодезии, Италия | GIPSY—OASIS (PPP + xfile) |
| A_D | Итальянское космическое агентство, Центр космической геодезии, Италия | GIPSY—OASIS (PPP + sigma for datum in cov) |
| A_N | Итальянское космическое агентство, Центр космической геодезии, Италия | GIPSY—OASIS (free network + fixed amb) |
| A_A | Итальянское космическое агентство, Центр космической геодезии, Италия | GIPSY—OASIS (PPP + xfile + ambizap) |
| BEQ | Баварская комиссия международной геодезии, Германия | Bernese GPS Software |
| BKQ | Федеральное агенство картографии и геодезии, Германия | Bernese GPS Software |
| DEQ | Делфтский технический университет, Нидерланды / Лаборатория анализа геодезических наблюдений, Португалия | GIPSY—OASIS |
| GOQ | Геодезическая обсерватория Пецни, Чехия | Bernese GPS Software |
| IGQ | Национальный географический институт, Центр геодезических наблюдений, Испания | Bernese GPS Software |
| MAO | Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Украина | Bernese GPS Software |
| MUQ | Военная техническая академия, Польша | Bernese GPS Software |
| M_Q | Военная техническая академия, Польша | GAMIT/GLOBK |
| NKQ | Северная геодезическая комиссия /Лантметериет/ Космическая обсерватория Онсала, Швеция | Bernese GPS Software |
| ROQ | Королевская обсерватория Бельгии, Бельгия | Bernese GPS Software |
| SUQ | Словацкий технический университет, Словакия | Bernese GPS Software |
| SGQ | Обсерватория спутниковой геодезии, Венгрия | Bernese GPS Software |
| UPQ | Падуанский университет, Италия | Bernese GPS Software |
| WUQ | Варшавский политехнический университет, Польша | Bernese GPS Software |

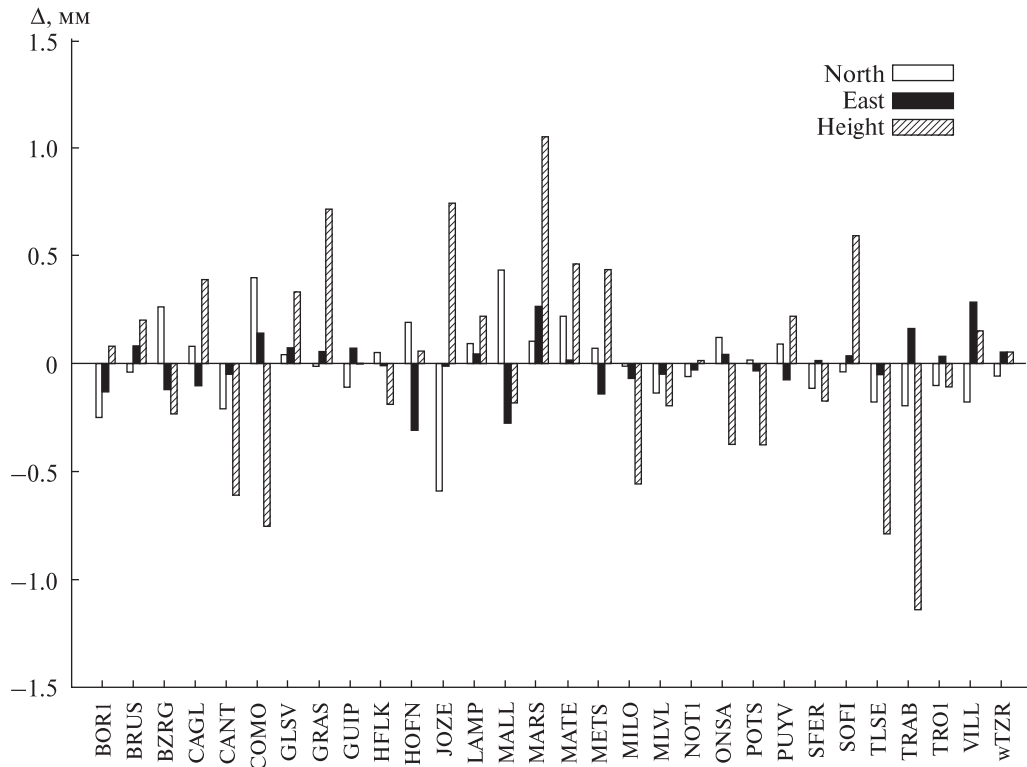


Рис. 4. Остатки Δ после преобразования Гельмерта между решением *MAO* и комбинированным решением *EUQ*

Таблица 3. Параметры преобразования Гельмерта между решениями центров анализа и комбинированным решением

| Код решения | СКО преобразования, мм | Сдвиг, мм | | | Вращение, мсд | | | Масштабный множитель, 10^{-9} |
|-------------|------------------------|-----------|-------|-------|---------------|-------|-------|---------------------------------|
| | | T_x | T_y | T_z | R_x | R_y | R_z | |
| A_Q | 2.61 | 1.9 | -4.0 | -14.8 | 0.0 | 0.4 | 0.0 | 1.43 |
| A_D | 2.80 | 1.9 | -11.5 | -8.8 | 0.3 | 0.2 | -0.2 | 1.32 |
| A_N | 2.53 | -4.3 | -8.5 | -2.6 | 0.2 | -0.1 | -0.2 | 1.13 |
| A_A | 2.54 | 0.6 | -3.6 | -14.8 | 0.0 | 0.4 | -0.0 | 1.55 |
| BEQ | 0.58 | 2.8 | -2.2 | -2.3 | 0.0 | 0.1 | -0.1 | 0.05 |
| BKQ | 0.84 | 1.4 | 5.2 | -2.4 | -0.1 | 0.1 | 0.1 | -0.04 |
| DEQ | 3.32 | 7.9 | 8.0 | -18.4 | -0.3 | 0.9 | 0.2 | 0.28 |
| GOQ | 0.44 | 0.5 | 2.8 | -0.6 | -0.1 | 0.0 | 0.1 | -0.04 |
| IGQ | 0.35 | -0.6 | 3.3 | 0.7 | -0.1 | 0.0 | 0.1 | -0.07 |
| MAO | 0.32 | -0.6 | 2.2 | 0.6 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | -0.05 |
| MUQ | 0.38 | -1.3 | 2.1 | 0.9 | 0.0 | -0.1 | 0.1 | -0.03 |
| M_Q | 1.35 | -2.6 | 1.5 | -6.9 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 1.09 |
| NKQ | 0.35 | 0.2 | 1.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | -0.05 |
| ROQ | 0.35 | -0.1 | 4.5 | -0.2 | -0.1 | 0.0 | 0.1 | -0.05 |
| SUQ | 0.84 | -2.4 | -0.3 | 1.8 | 0.0 | -0.1 | 0.0 | -0.01 |
| SGQ | 1.03 | -1.6 | -6.5 | 2.7 | 0.2 | -0.1 | -0.1 | -0.02 |
| UPQ | 0.64 | 2.5 | -0.9 | -4.4 | 0.0 | 0.2 | -0.1 | 0.31 |
| WUQ | 0.39 | -1.5 | 1.7 | 1.6 | 0.0 | -0.1 | 0.0 | -0.07 |

2.34 мм соответственно. Таким образом, включение решения *MAO* улучшило значения повторяемости координат станций на 3.3, 2.7 и 2.6 % для северной, восточной и высотной составляющих соответственно.

Для каждого индивидуального решения центров анализа ГНСС-данных были определены параметры преобразования Гельмерта между данным решением и комбинированным решением *EUQ*. Полученные значения параметров представлены в табл. 3. Значение СКО преобразования принимает минимальное значение для решения *MAO* — 0.32 мм. Остальные значения СКО преобразования лежат в диапазоне от 0.35 мм (для решения *IGQ*) до 3.32 мм (для решения *DEQ*). Значения параметров преобразования Гельмерта между решением *MAO* и комбинированным решением *EUQ* либо минимальны, либо близки к минимальным значениям. Таким образом, решение ГАО НАН Украины отлично соответствует комбинированному решению.

Остатки составляющих координат станций после преобразования Гельмерта между решением *MAO* и комбинированным решением *EUQ* показаны на рис. 4. Видно, что почти все абсолютные значения остатков не превышают 1.0 мм, кроме остатков для высотной составляющей для станций *MARS* (1.05 мм) и *TRAB* (–1.14 мм). Максимальные абсолютные значения остатков для северной и восточной составляющих координат у станций *JOZE* (–0.59 мм) и *HOFN* (–0.31 мм) соответственно.

Таким образом, комбинированное решение улучшается при включении в него решения *MAO*, и Центр анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины успешно выполнил эталонный тест EPN.

Автор благодарен А. Кеньерешу (А. Kenyeres, Обсерватория спутниковой геодезии, Венгрия) за помощь в организации проведения эталонного теста и Х. Хабриху (Н. Habrich, Федеральное агентство картографии и геодезии, Германия) за получение

комбинированного решения эталонной тестовой кампании.

1. Хода О. А. Определение координат перманентных станций региональной сети: GPS vs GPS+ГЛОНАСС // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, N 6. — С. 45–53.
2. Bernese GPS Software Version 5.0. / Eds R. Dach, U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl. — Berne: Astronomical Institute, University of Berne. — 2007. — 612 p.
3. Guidelines for EPN Analysis Centres [Электронный ресурс] / Prepared by the EPN Coordination Group and the EPN Central Bureau // Режим доступа: http://www.epncb.oma.be/_organisation/guidelines/guidelines_analysis_centres.pdf
4. Gendt G., Griffiths J., Nischan T., Ray J. IGS reprocessing — summary of orbit/clock combination and first quality assessment [Электронный ресурс] // Presented at IGS 2010 Workshop. — United Kingdom, 2010. — Режим доступа: http://acc.igs.org/repro1/repro1_IGSW10.pdf
5. Herring T. A., King R. W., McClusky S. C. Introduction to GAMIT/GLOBK. Release 10.4. // Massachusetts Institute of Technology. — 2010. — 48 p.
6. SINEX Format [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.iers.org/IERS/EN/Organization/AnalysisCoordinator/SinexFormat/sinex_cont.html
7. Voelksen C. An Update on the EPN Reprocessing Project: Current Achievement and Status [Электронный ресурс] // Presented at EUREF Symposium 2011. — Moldova. — 2011. — Режим доступа: <http://www.euref.eu/symposia/2011Chisinau/01-06-p-Voelksen.pdf>
8. Zumberge J. F., Heflin M. B., Jefferson D. C., et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. // J. Geophys. Res. — 1997. — 102B, N 3. — P. 5005–5017.

Надійшла до редакції 10.05.12

O. A. Khoda

THE PROCESSING OF EPN BENCHMARK TEST CAMPAIGN AT THE GNSS DATA ANALYSIS CENTRE OF THE MAIN ASTRONOMICAL OBSERVATORY

The EPN benchmark test campaign is processed at the GNSS data analysis centre of the Main Astronomical Observatory with the Bernese GPS Software ver. 5.0. It is shown that the combined solution of the EPN benchmark test campaign was improved by adding the solution of the Main Astronomical Observatory.

УДК 528.2:629.78

М. В. Ищенко

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕПРОЦЕССИНГА GPS-НАБЛЮДЕНИЙ НА ПЕРМАНЕНТНЫХ СТАНЦИЯХ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕТИ ДЛЯ GPS-НЕДЕЛЬ 1236–1399

Спостереження GPS-супутників на перманентних станціях, які розташовані на території України та Східної Європи, було оброблено за допомогою програмного комплексу «Bernese GPS Software ver. 5.0» з використанням нових моделей та методик обробки, впроваджених Міжнародною ГНСС-службою з GPS-тижня 1400. Визначено координати GPS-станцій для GPS-тижнів 1236–1399. Для оцінки якості отриманого розв'язку виконано порівняння з комбінованими розв'язками, що були отримані в ході кампаній репроцесингу Міжнародної ГНСС-служби та Європейської перманентної ГНСС-мережі.

На протяжении многих лет улучшались инструменты анализа и моделирования физики Земли, взаимосвязь между спутниковым сигналом, атмосферными рефракциями и ГНСС-оборудованием. К примеру, уменьшался угол наблюдения места спутников, совершенствовались модели океанической нагрузки на перманентные станции, улучшались алгоритмы фиксирования фазовых неоднозначностей, разрабатывались модели абсолютных вариаций фазового центра комбинаций антенна — купол. В тоже время различные модели, стратегии и реализации Международной земной системы отсчета (ITRS) вносили свои коррективы в точность определения координат. Эти эффекты, вносимые различиями в используемых моделях, априорных данных и программном обеспечении, вызвали несогласованность полученных временных рядов перманентных ГНСС-станций.

Кампания репроцесинга Международной ГНСС-службы (IGS) «IGS Repro1» показала улучшение точности полученных координатных рядов и параметров тропосферы, в том числе снижение уровня шума, влияющего на прохождение GPS-сигнала. Улучшения удалось достичь благодаря новой модели океанической нагрузки

на перманентные станции, использованию абсолютных вариаций фазового центра комбинаций антенна — купол, новым эфемеридам GPS-спутников и параметрам вращения Земли, полученным уже в результате кампании репроцесинга «IGS Repro1» [7, 8]. SINEX-файлы решения «IGS Repro1» доступны на ftp-сервере IGS (<ftp://igs-ftp.engr.seu/pub/igb/>) (решение обозначено как *IGB*).

В 2010 г. Рабочей группой Европейской перманентной ГНСС-сети (EPN), являющейся региональной сетью ГНСС-станций на территории Европы, было принято решение провести репроцесинг наблюдений на ГНСС-станциях, входящих в EPN. Обработка проводилась с учетом географического положения сети (к примеру, использовалась модель движения Евразийской литосферной плиты).

В рамках эталонного теста (Benchmark Test) [10] для формирования комбинированного решения кампании репроцесинга были определены локальные центры анализа, использовавшие программный комплекс «Bernese GPS software ver. 5.0» [5] (11 локальных центров), GAMIT/GLOBK и GIPSY-OASYS (по одному локальному центру). Стоит отметить, что все локальные центры, выполнявшие репроцесинг с помощью «Bernese GPS software ver. 5.0», показали хорошую согласованность полученных результатов [9].

Получив обнадеживающие результаты тестового репроцессинга, EPN начала кампанию «EPN Repro1», в рамках которой были обработаны архивные GPS-наблюдения на станциях сети. Решение было обозначено как *EU0*. Результаты репроцессинга представлены на ftp-сервере EPN (<ftp://igs.bkg.bund.de/EPNrepro1/products/>).

В Центре анализа ГНСС-наблюдений Главной астрономической обсерватории НАН Украины (ГАО НАН Украины) был выполнен репроцессинг наблюдений GPS-спутников для GPS-недель 1236–1399 (14 сентября 2003 г. — 4 ноября 2003 г.)

Таблица 1. Список GPS-станций

| Идентификатор | Станция | Страна | Международные сети (на 4 ноября 2006 г.) |
|---------------|----------------|---------|--|
| GLSV | Киев/Голосеево | Украина | IGS, EPN |
| UZHL | Ужгород | Украина | IGS, EPN |
| KHAR | Харьков | Украина | IGS, EPN |
| POLV | Полтава | Украина | IGS, EPN |
| MIKL | Николаев | Украина | IGS, EPN |
| SULP | Львов | Украина | IGS, EPN |
| CRAO | Симеиз | Украина | IGS, MGN |
| CNIV | Чернигов | Украина | EPN |
| EVPA | Евпатория | Украина | EPN |
| ALCI | Алчевск | Украина | |
| SHAZ | Шацк | Украина | |
| DNMU | Днепропетровск | Украина | |
| MDVJ | Менделеево | Россия | IGS, EPN |
| MOBN | Обнинск | Россия | IGS |
| ZECK | Зеленчукская | Россия | IGS, EPN |
| TRAB | Трабзон | Турция | IGS, EPN |
| ISTA | Стамбул | Турция | IGS, EPN |
| BUCU | Бухарест | Румыния | IGS, EPN |
| COST | Констанца | Румыния | EPN |
| BACA | Бакэу | Румыния | EPN |
| BAIA | Байя-Маре | Румыния | EPN |
| DEVA | Дева | Румыния | EPN |
| GRAZ | Грац | Австрия | IGS, EPN |
| PENC | Пенц | Венгрия | IGS, EPN |
| BOR1 | Боровец | Польша | IGS, EPN |
| LAMA | Ольштын | Польша | IGS, EPN |
| VLNS | Вильнюс | Литва | EPN |
| KLPD | Клайпеда | Литва | |
| RIGA | Рига | Латвия | IGS, EPN |

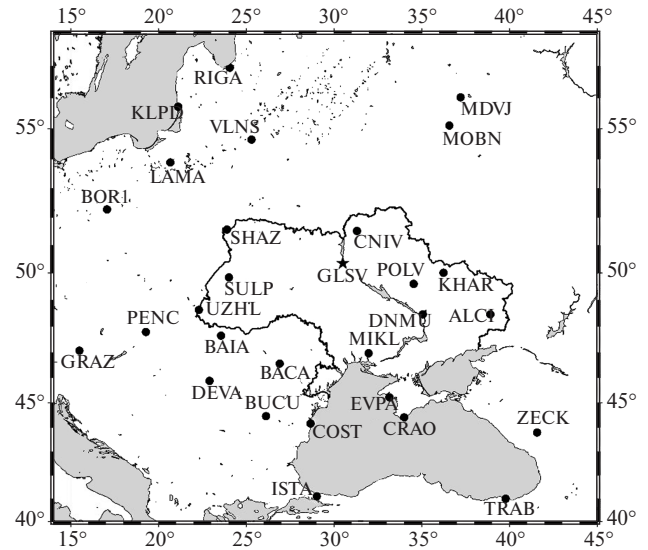


Рис. 1. Расположение GPS-станций

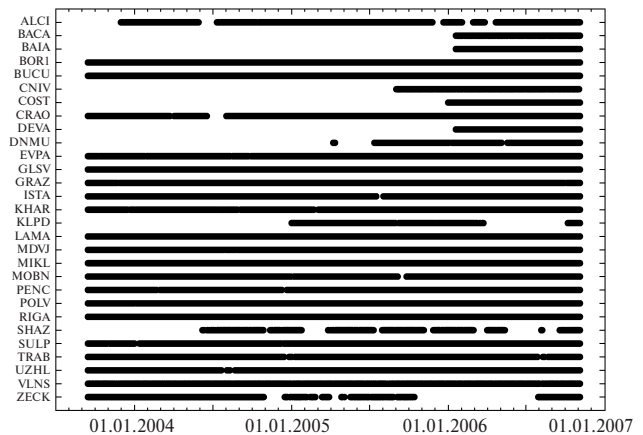


Рис. 2. Диаграмма наблюдений на перманентных станциях

2006 г.). Цель данного репроцессинга — получить однородные ряды координат перманентных ГНСС-станций, прежде всего украинских. Репроцессинг был выполнен для 29 GPS-станций, расположенных на территории Восточной Европы, 12 из которых — на территории Украины. Список GPS-станций представлен в табл. 1, а их географическое положение — на рис. 1.

На рис. 2 показана диаграмма наблюдений на перманентных станциях сети.

Обработка была выполнена согласно новым рекомендациям EPN, вступившим в силу с GPS-недели 1400 [6]:

Таблица 2. Координаты GPS-станций для решения MAI и разности координат между решениями MAI и EU0, MAI и IGB для GPS-недели 1399 (система координат: IGS05, эпоха: 1 ноября 2006 г. 12 ч 00 мин 00 с, время GPS)

| Стан- ция | X_{MAI}, M | | | Y_{MAI}, M | | | Z_{MAI}, M | | |
|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|--|--|
| | $X_{MAI} - X_{EU0}, M$ | $Y_{MAI} - Y_{EU0}, M$ | $Z_{MAI} - Z_{EU0}, M$ | Стан- ция | X_{MAI}, M | Y_{MAI}, M | Z_{MAI}, M | | |
| | $X_{MAI} - X_{IGB}, M$ | $Y_{MAI} - Y_{IGB}, M$ | $Z_{MAI} - Z_{IGB}, M$ | | $X_{MAI} - X_{EU0}, M$ | $Y_{MAI} - Y_{EU0}, M$ | $Z_{MAI} - Z_{EU0}, M$ | | |
| GLSV | 3512888.9164 | 2068979.9021 | 4888903.2181 | ISTA | 4208830.2732 | 2334850.3360 | 4171267.2604 | | |
| | -0.0014 | -0.0030 | -0.0025 | | -0.0009 | -0.0024 | -0.0021 | | |
| | 0.0003 | 0.0005 | -0.0058 | | 0.0034 | 0.0014 | -0.0065 | | |
| UZHL | 3907587.4231 | 1602428.7224 | 4763783.7753 | BUCU | 4093760.8361 | 2007793.8385 | 4445129.9896 | | |
| | -0.0007 | -0.0033 | -0.0014 | | 0.0005 | -0.0013 | -0.0013 | | |
| | 0.0032 | -0.0007 | -0.0039 | | 0.0046 | 0.0032 | -0.0037 | | |
| KHAR | 3312984.2903 | 2428203.4624 | 4863307.8359 | COST | 4021613.6689 | 2197896.3639 | 4421014.7147 | | |
| | -0.0019 | -0.0032 | -0.0033 | | -0.0010 | -0.0025 | -0.0025 | | |
| | 0.0020 | 0.0017 | -0.0082 | | n/a | n/a | n/a | | |
| POLV | 3411557.3074 | 234864.0129 | 4834396.9000 | BACA | 3917524.9356 | 1988524.1326 | 4608585.6250 | | |
| | -0.0013 | -0.0030 | -0.0027 | | -0.0007 | -0.0026 | -0.0013 | | |
| | 0.0006 | 0.0008 | -0.0054 | | n/a | n/a | n/a | | |
| MIKL | 3698553.9493 | 2308676.0304 | 4639769.5066 | BAIA | 3945839.7481 | 1720428.2930 | 4691082.7247 | | |
| | -0.0017 | -0.0032 | -0.0027 | | 0.0001 | -0.0032 | -0.0019 | | |
| | 0.0039 | 0.0017 | -0.0036 | | n/a | n/a | n/a | | |
| SULP | 3765296.9567 | 1677559.2308 | 481297.4224 | DEVA | 4097210.4635 | 1731870.4169 | 4556026.7684 | | |
| | -0.0012 | -0.0032 | -0.0023 | | -0.0008 | -0.0032 | -0.0025 | | |
| | 0.0034 | 0.0016 | -0.0017 | | n/a | n/a | n/a | | |
| CNIV | 3397785.1825 | 2066990.5707 | 4969811.5963 | GRAZ | 4194423.7880 | 1162702.7251 | 4647245.4301 | | |
| | -0.0013 | -0.0032 | -0.0025 | | -0.0001 | -0.0028 | -0.0012 | | |
| | n/a | n/a | n/a | | 0.0051 | -0.0006 | -0.0018 | | |
| EVPA | 3767253.4523 | 2461876.3777 | 4504591.8160 | PENC | 4052449.4329 | 1417681.1526 | 4701407.1178 | | |
| | -0.0017 | -0.0029 | -0.0028 | | -0.0010 | -0.0027 | -0.0016 | | |
| | n/a | n/a | n/a | | 0.0029 | -0.0004 | -0.0042 | | |
| CRAO | 3783897.0719 | 2551404.4460 | 4441264.2960 | BORI | 3738358.4220 | 1148173.7350 | 5021815.7862 | | |
| | n/a | n/a | n/a | | 0.0007 | -0.0021 | 0.0007 | | |
| | 0.0036 | 0.0031 | -0.0044 | | 0.0037 | -0.0006 | -0.0015 | | |
| ZECK | 3451174.6703 | 3060335.4675 | 4391955.6673 | LAMA | 3524522.8860 | 1329693.6520 | 5129846.3548 | | |
| | -0.0026 | -0.0035 | -0.0038 | | 0.0000 | -0.0025 | -0.0002 | | |
| | 0.0037 | 0.0060 | -0.0036 | | 0.0023 | -0.0008 | -0.0021 | | |
| MDVJ | 284556.0430 | 2160954.2681 | 5265993.2439 | VLNS | 3343600.5805 | 1580417.7616 | 5179337.3025 | | |
| | n/a | n/a | n/a | | -0.0006 | -0.0027 | -0.0016 | | |
| | -0.0001 | 0.0008 | -0.0014 | | n/a | n/a | n/a | | |
| MOBN | 2936432.0167 | 2178364.5752 | 5208858.2602 | RIGA | 3183899.1629 | 1421478.5140 | 5322810.8151 | | |
| | n/a | n/a | n/a | | 0.0000 | -0.0026 | -0.0013 | | |
| | -0.0021 | 0.0005 | -0.0061 | | 0.0016 | -0.0002 | 0.0003 | | |
| TRAB | 3705250.3326 | 3084421.7262 | 4162044.1907 | KLPD | 3359228.1008 | 1297490.5008 | 5246690.3582 | | |
| | -0.0025 | -0.0029 | -0.0046 | | n/a | n/a | n/a | | |
| | 0.0020 | 0.0036 | -0.0081 | | 0.0021 | -0.011 | -0.0022 | | |

- эфемериды GPS-спутников и координаты станций задавались в системе координат IGS05 (IGS-реализация системы координат ITRF2005);

- использовалась модель океанической нагрузки FES2004;

- использовались абсолютные калибровки фазовых центров комбинаций антенна — купол и т. д. [2].

Решение было выполнено с помощью программного комплекса «Bernese GPS Software ver. 5.0». Обозначим это решение как *MA1*.

Процесс получения решения для отдельной GPS-недели можно разделить на четыре этапа [3, рис. 2, 3].

1. Предварительная обработка суточных сессий наблюдений.

2. Получение оценок координат для отдельного дня наблюдений.

3. Получение оценок координат для отдельной недели.

4. Получение финальных значений зенитных тропосферных рефракций для всех станций.

Для задания системы координат использовалось ограничение «No-net translation» (отсутствие общего смещения) на координаты референционных станций GLSV, POLV, MDVJ, BOR1 и TRAB. Априорные координаты и скорости референционных станций на эпоху 2000.0 были получены из каталога IGS05.

Полученные файлы для решения *MA1* в формате SINEX размещены на ftp-сервере ГАО НАН Украины (<ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/gps/products/IGS05/>).

В табл. 2 показаны разности координат между решениями *MA1* и *EU0*, *MA1* и *IGB* для GPS-недели 1399 (29 октября — 4 ноября 2006 г.). Максимальные абсолютные значения разностей координат между решениями *MA1* и *EU0* составили:

- по оси *X*: 2.6 мм для станции ZECK,
- по оси *Y*: 3.5 мм для станции ZECK,
- по оси *Z*: 4.6 мм для станции TRAB.

Максимальные значения разностей координат между решениями *MA1* и *IGB* составили:

- по оси *X*: 3.7 мм для станции ZECK,
- по оси *Y*: 6.0 мм для станции ZECK,
- по оси *Z*: 8.1 мм для станции TRAB.

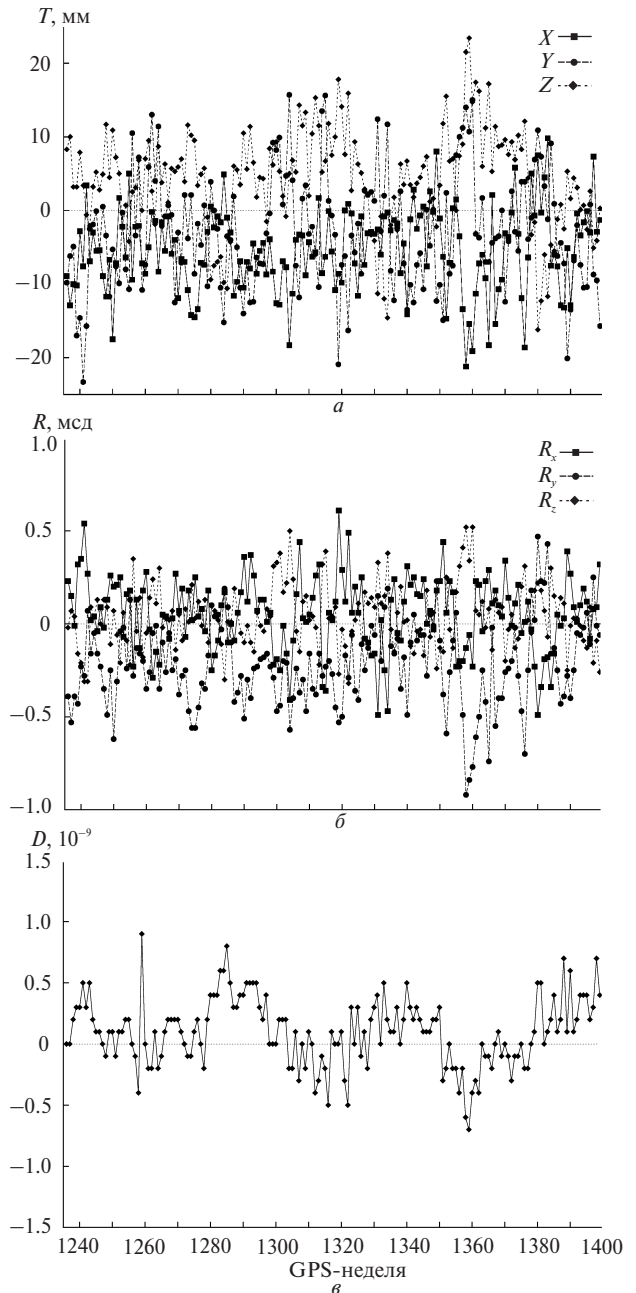


Рис. 3. Параметры преобразований Гельмерта между решениями *MA1* и *EU0*: *a* — смещение *T*, *b* — вращение *R*, *c* — масштабный множитель *D*

Сравнение решений *MA1* и *EU0*, *MA1* и *IGB* выполнялось путем определения параметров преобразования Гельмерта. Сравнение было выполнено для GPS-станций, общих для всех трех решений для каждой GPS-недели.

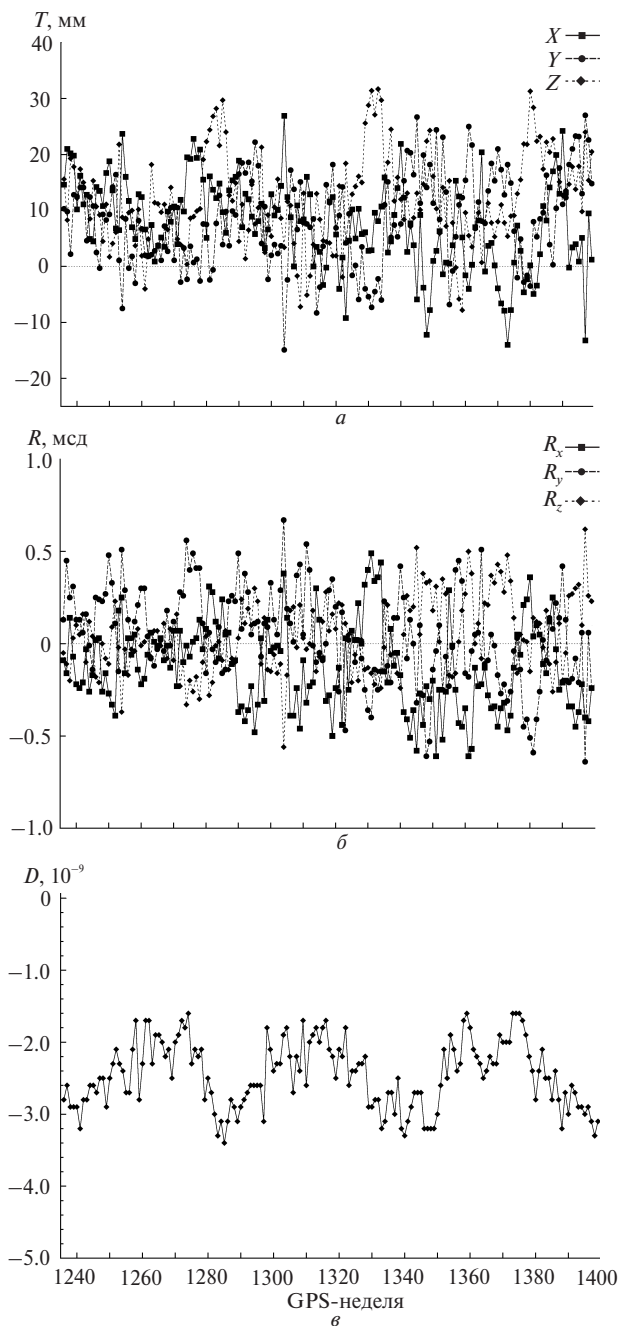


Рис. 4. То же между решениями *MA1* и *IGB*

Значения параметров преобразований Гельмерта между решениями *MA1* и *EU0*, *MA1* и *IGB* представлены на рис. 3 и 4 соответственно. Минимальные и максимальные значения полученных параметров преобразования между решениями *MA1* и *EU0* приведены ниже.

Смещение:

по оси *X*: -21.2 ... 9.8 мм,
по оси *Y*: -23.3 ... 15.7 мм,
по оси *Z*: -16.2 ... 23.4 мм.

Вращение:

вокруг оси *X*: -0.49 ... 0.61 мсд,
вокруг оси *Y*: -0.92 ... 0.47 мсд,
вокруг оси *Z*: -0.32 ... 0.52 мсд.

Масштабный множитель: $(-0.7 \dots 0.9) \cdot 10^{-9}$.

Минимальные и максимальные значения полученных параметров преобразования между решениями *MA1* и *IGB* приведены ниже.

Смещение:

по оси *X*: -14.0 ... 24.2 мм,
по оси *Y*: -8.3 ... 26.7 мм,
по оси *Z*: -5.1 ... 29.7 мм.

Вращение:

вокруг оси *X*: -0.61 ... 0.49 мсд,
вокруг оси *Y*: -0.61 ... 0.47 мсд,
вокруг оси *Z*: -0.33 ... 0.50 мсд.

Масштабный множитель: $(-3.3 \dots -1.7) \cdot 10^{-9}$.

На рис. 5 и 6 показаны средние значения остатков координат на перманентных станциях после преобразований Гельмерта между решениями *MA1* и *EU0*, *MA1* и *IGB* соответственно для северной, восточной и высотной компонент.

Наименьшие и наибольшие разности для решений *MA1* и *EU0* по модулю для северной, восточной и высотной составляющих равны:

по оси *X*: от 0.01 мм (для станции *EVPA*) до 0.48 мм (для станции *BAIA*),

по оси *Y*: от 0.00 мм (для станции *EVPA*) до 0.38 мм (для станции *MDVJ*),

по оси *Z*: от 0.01 мм (для станции *MIKL*) до 2.01 мм (для станции *DEVA*),

а для решений *MA1* и *IGB* — по оси *X*: от 0.06 мм (для станции *GLSV*) до 0.60 мм (для станции *MDVJ*),

по оси *Y*: от 0.01 мм (для станции *SULP*) до 0.39 мм (для станций *PENC* и *MDVJ*),

по оси *Z*: от 0.29 мм (для станции *UZHL*) до 4.59 мм (для станции *MOBN*).

При наличии трех разных решений стало возможным получить «внешние» оценки точности для решений. Поскольку каждое решение представляет свою координатную реализацию, то при выполнении трансформации Гельмерта

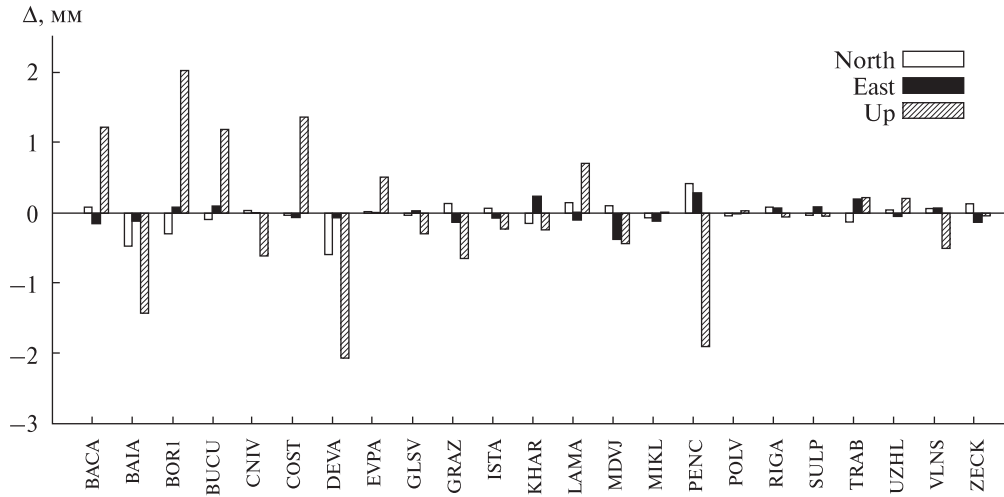


Рис. 5. Значения средних остатков координат после преобразований Гельмерта между решениями MA1 и EU0

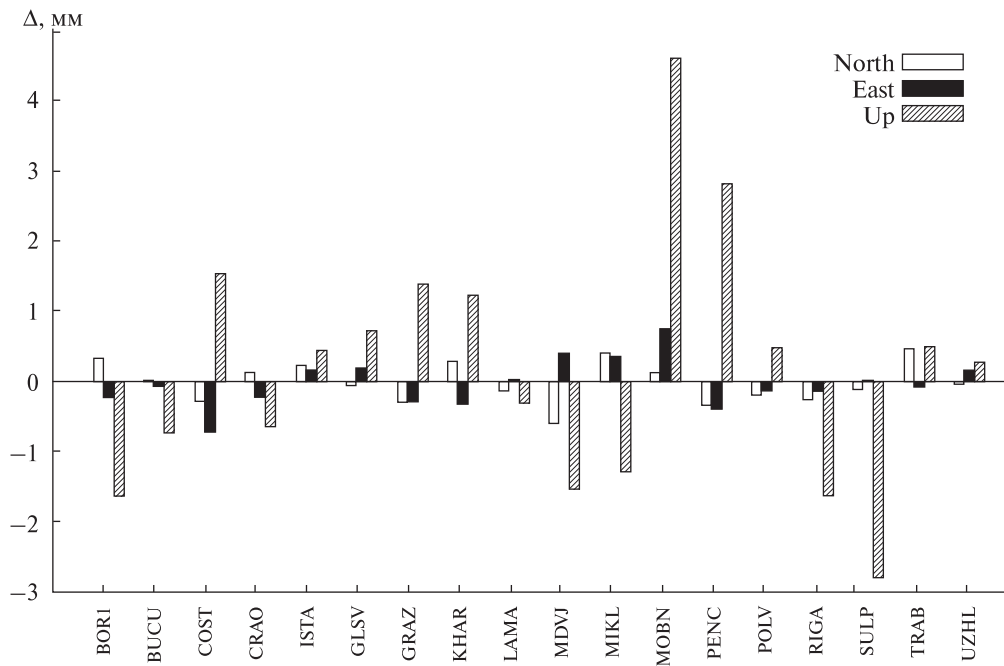


Рис. 6. То же между решениями MA1 и IGB

решения MA1 и EU0 были приведены к координатной реализации решения IGB. Это позволило исключить систематические ошибки. Так как все три решения основаны практически на одном и том же наблюдательном материале, то между ними должна наблюдаться большая взаимная корреляция.

Для расчета «внешних» погрешностей решений и коэффициентов корреляций применен метод, который был разработан и использовался в ГАО НАН Украины [1, 4]. Суть метода лежит в следующем. Пусть имеем M решений с N общими станциями. Обозначим одну из координат (X , Y или Z) через x .

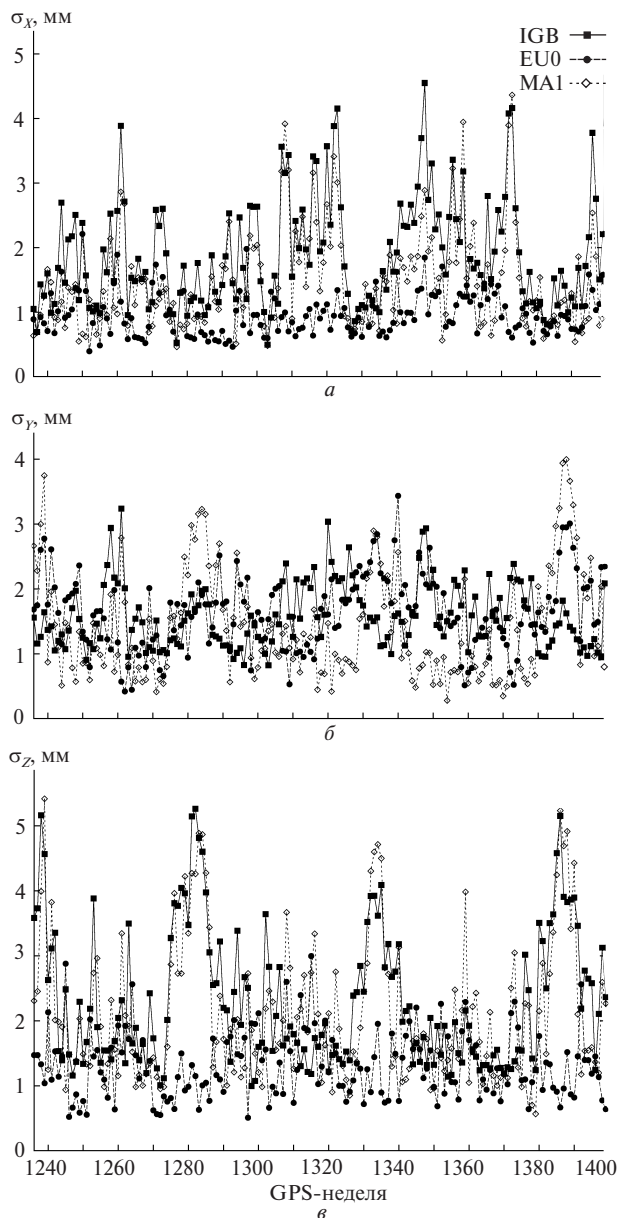


Рис. 7. Значения «внешних» средних квадратичных ошибок решений MA1, EU0 и IGB по координатам X (а), Y (б), Z (в)

Для i -й станции найдем значения x_i^0 и погрешность σ_i^0 :

$$x_i^0 = \frac{\sum_{j=1}^M p_i^{(j)} x_i^{(j)}}{\sum_{j=1}^M p_i^{(j)}}, \quad (\sigma_i^0)^2 = \frac{1}{\sum_{j=1}^M p_i^{(j)}}$$

где $p_i^{(j)} = \sqrt{\sigma_i^{(j)}}$ — вес координаты i -й станции из j -го решения x_i^j . Найдем для каждой общей станции разности координат $\Delta x_i^{j0} = x_i^j - x_i^0$ и будем рассматривать полученные величины $\{\Delta x_i^{j0}\}_{i=1, \dots, N}$ как случайные. Перейдем от них к центрированным величинам и определим математическое ожидание квадратов сумм и разниц полученных центрированных величин для l -го и k -го решений:

$$d_{kl} = M[(\hat{\Delta x}^{k0} - \hat{\Delta x}^{l0})^2] = \sigma_k^2 + \sigma_l^2 - \rho_{kl} \sigma_k \sigma_l,$$

$$s_{kl} = M[(\hat{\Delta x}^{k0} + \hat{\Delta x}^{l0})^2] = \sigma_k^2 + \sigma_l^2 + \rho_{kl} \sigma_k \sigma_l,$$

где $M[\cdot]$ — оператор математического ожидания, σ_k и σ_l — «внешние» средние квадратичные погрешности определения координат l -го и k -го решений, ρ_{kl} — коэффициент корреляции между соответствующими координатами l -го и k -го решений, Δx^{k0} — центрированные значения Δx_i^{k0} .

В случае трех решений, создавая суммы d_{kl} и s_{kl} , получим линейную систему уравнений относительно σ_k^2 ($k = 1, 2, 3$), решение которой можно записать в виде

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{4}(s_{12} + s_{13} - s_{23} + d_{12} + d_{13} - d_{23}),$$

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{4}(s_{12} + s_{23} - s_{13} + d_{12} + d_{23} - d_{13}),$$

$$\sigma_3^2 = \frac{1}{4}(s_{23} + s_{13} - s_{12} + d_{23} + d_{13} - d_{12}).$$

Из выражений для d_{kl} и s_{kl} можно получить выражение для коэффициентов корреляции:

Таблица 3. Средние «внешние» оценки точности решений: средние квадратичные ошибки и коэффициенты корреляций

| Координата | σ_{IGS} , мм | σ_{EU0} , мм | σ_{MA1} , мм | $\rho_{IGS-EU0}$ | $\rho_{IGS-MA1}$ | $\rho_{EU0-MA1}$ |
|------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|
| X | 1.878 | 0.966 | 1.451 | -0.608 | -0.794 | 0.122 |
| Y | 1.573 | 1.644 | 1.413 | -0.608 | -0.418 | -0.252 |
| Z | 2.310 | 1.307 | 2.127 | -0.408 | -0.752 | -0.115 |

$$\rho_{12} = \frac{s_{12} - d_{12}}{4\sigma_1\sigma_2}, \quad \rho_{13} = \frac{s_{13} - d_{13}}{4\sigma_1\sigma_3}, \quad \rho_{23} = \frac{s_{23} - d_{23}}{4\sigma_2\sigma_3}.$$

Результаты сравнения решений *MA1*, *EU0* и *IGB* приведены в табл. 3. На рис. 7 представлены «внешние» средние квадратичные погрешности по координатам *X*, *Y* и *Z* для решений *MA1*, *EU0* и *IGB*.

ВЫВОДЫ

С помощью программного комплекса «Bernese GPS Software ver. 5.0» был выполнен репроцессинг GPS-наблюдений для GPS-недель 1236-1399 и получены координатные ряды для 29 ГНСС-станций (решение *MA1*).

Для проверки качества решения были вычислены параметры преобразований Гельмерта между решением *MA1*, комбинированным решением *EU0* (результат кампании репроцессинга Европейской перманентной ГНСС-сети) и комбинированным решением *IGB* (результат кампании репроцессинга Международной ГНСС-службы). Полученные результаты позволяют сделать вывод, что результаты репроцессинга, выполненного в Центре анализа ГНСС-наблюдений ГАО НАН Украины, соответствуют по качеству результатам репроцессингов EPN и IGS. Основные отличия вызваны различиями в геометрии сети и набором референчных станций для задания системы координат.

Работа выполнялась как конкурсная тема «Дослідження регіональної та локальної динаміки земної кори за даними регулярного моніторингу координат постійнодіючих ГНСС-станцій» в рамках целевой комплексной программы фундаментальных исследований НАН Украины «Дослідження сонячно-земних зв'язків та їхнього впливу на функціонування геосистем (ГЕОКОСМОС)», 2011 р., и целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012 г.

1. Болотін С. Л., Литвин С. О. Порівняння об'єднання каталогів RSC (GAOUA)05 C 03 та RSC(PUL)06 C 02 з реалізацією Міжнародної небесної системи відліку ICRF / Кинематика и физика небес. тел. — 2010. — 26, № 1. — С. 31—42.
2. Ищенко М. В., Хода О. А. Репроцессинг GPS-наблюдений на перманентных станциях региональной сети

для GPS-недель 1390-1399 // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 5. — С. 40—50.

3. Хода О. А. Обработка эталонной тестовой кампании EPN в Центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 4. — С. 59—65.
4. Чолій В. Я. Сравнение различных реализаций земной системы координат, построенных по данным лазерной локации искусственных спутников Земли // Кинематика и физика небес. тел. — 1987. — 3, № 4. — С. 75—79.
5. Bernese GPS Software Version 5.0 / Eds R. Dach, U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl. — Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 2007. — 612 p.
6. Guidelines for EPN Analysis Centres // Prepared by the EPN Coordination Group and the EPN Central Bureau [электронный ресурс: http://www.epncb.oma.be/_organisation/guidelines/guidelines_analysis_centres.pdf]
7. Gendt G., Griffiths J., Nischan T., Ray J. IGS Reprocessing — Summary of Orbit/Clock Combination and First Quality Assessment // Presented at the IGS Workshop 2010. — Newcastle upon Tyne (United Kingdom). — 2010.
8. Steigenberger P., Rothacher M., Dietrich R., et al. Reprocessing of a global GPS network, Journal of Geophysical Research, Vol. 111, Nr. B5, EID B05402, American Geophysical Union, ISSN 0148-0227, DOI: 10.1029/2005JB003747, 2006.
9. Völksen C. An Update on the EPN Reprocessing Project: Current Achievements and Status / Project EUREF Symposium 2011, Moldova, 25—28 May 2011 [Электронный ресурс: <http://www.euref.eu/symposia/2011Chisinau/01-06-p-Voelksen.pdf>]
10. Völksen C. EPN Reprocessing: Report on the current status of the EPN / Project EUREF Symposium, Sweden, 2—5 June 2010 [Электронный ресурс: <http://www.euref.eu/symposia/2010Gavle/01-05-Voelksen.pdf>].

Надійшла до редакції 05.06.12

M. V. Ischenko

QUALITY ESTIMATION FOR THE REPROCESSING OF GPS OBSERVATIONS AT PERMANENT STATIONS OF THE REGIONAL NETWORK FOR GPS WEEKS 1236—1399

Observations of GPS satellites at permanent stations located in Ukraine and in the Eastern Europe were reprocessed with the *Bernese GPS Software ver. 5.0* using new models and processing procedures adopted by the International GNSS Service since GPS week 1400. Coordinates of the GPS stations for GPS weeks 1236—1399 were determined. To estimate the quality of the solution obtained, its comparison with the combined solutions obtained during the reprocessing campaigns of the International GNSS Service and European Permanent GNSS Network was performed.

БЛОКРИНИЦЬКА Людмила Мечиславівна — старший науковий співробітник кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — геофізика.

БОВЧАЛЮК Андрій Павлович — аспірант кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрямок науки — фізика навколоземного космічного простору та фізика атмосфери.

БРОВЧЕНКО Вадим Володимирович — інженер-конструктор Корпорації «Науково-виробниче об'єднання «Арсенал», Київ.

Напрямок науки — спектрометрія, гіперспектрометрія, радіолокаційні системи.

ДАНИЛЕВСЬКИЙ Василь Олексійович — науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика навколоземного космічного простору та фізика атмосфери.

ДОНЕЦЬ Володимир Володимирович — голова правління Корпорації «Науково-виробниче об'єднання «Арсенал», Київ, кандидат технічних наук. Державний повіритель спектрофотометричної апаратури.

Напрямок науки — спектрометрія, гіперспектрометрія, аерокосмічні мульти- і гіперспектральні системи, підсупутникова валідація.

ДУГІН Станіслав Сергійович — головний приладист Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрямок науки — дистанційне зондування Землі та обробка даних наземної спектрометрії.

ЖОЛОБАК Галина Михайлівна — старший науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат біологічних наук, доцент.

Напрямок науки — фізіологія рослин, ботаніка, дистанційне дослідження Землі.

ІВАНОВ Юрій Стратонович — старший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрямок науки — розрахунок, конструювання та виготовлення оптичних та оптико-електронних систем, що покривають всі класи оптичних приладів, поляриметрія та інтерферометрія, космічне приладобудування.

ЩЕНКО Марина Вікторівна — інженер першої категорії Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрямок науки — обробка ГНСС-спостережень.

КИСЕЛЬОВ Микола Миколайович — головний науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрямок науки — астрофізика, спектрофотометрія, поляриметрія.

КОЗИРЄВ Євген Сергійович — молодший науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія».

Напрямок науки — навколоземна астрономія.

КРУЧЕНИЦЬКИЙ Григорій Михайлович — завідувач відділу озонного моніторингу Центральної аерологічної обсерваторії Росгідромету, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — геофізика.

КРЮЧКОВ Євген Іванович — старший науковий співробітник відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — фізика атмосфери, космічне приладобудування.

МАКАРОВ Олександр Леонідович — Головний конструктор-начальник КБ космічних апаратів, систем та комплексів Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», кандидат технічних наук, лауреат Державної премії України.

Напрямок науки — ракетно-космічна техніка.

МІЛНІВСЬКИЙ Геннадій Петрович — завідувач науково-дослідної лабораторії «Фізика космосу» кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика навколосезного космічного простору та фізика атмосфери.

МІТКОВ Юрій Олексійович — завідувач кафедри двигунобудування Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара, кандидат технічних наук, доцент. Лауреат премії Ленінського комсомолу, нагороджений медаллю ВВЦ (колишня ВДНГ).

Напрямок науки — розрахунок і проектування систем передпускового і польотного наддування рухових установок ракет-носіїв.

МІЩЕНКО Михайло Іванович — головний науковий співробітник Годдардівського інституту космічних досліджень НАСА, Нью-Йорк, США, доктор фізико-математичних наук, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрямок науки — теорія електромагнітного розсіяння, перенесення випромінювання, дистанційне зондування, поляриметрія.

МІЩИШИНА Ірина Гнатівна — молодший науковий співробітник кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — астрономія.

ПЕТУХОВ Володимир Миколайович — провідний інженер Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрямок науки — астрономічне і космічне приладобудування.

РОЗЕНБУШ Віра Калениківна — провідний науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрямок науки — фізика малих тіл Сонячної системи, спектrophотометрія, поляриметрія.

СИБІРЦЕВА Оксана Миколаївна — молодший науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрямок науки — математичне моделювання та методи обробки даних дистанційного зондування Землі.

СИБІРЯКОВА Євгенія Сергіївна — молодший науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія», кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — навколосезна астрономія.

СИНЯВСЬКИЙ Іван Іванович — науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — розрахунок, конструювання та виготовлення оптичних та оптико-електронних систем та приладів, космічне приладобудування.

ТИХА Майя Віталіївна — студентка Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара

Напрямок науки — розрахунок і проектування систем передпускового і польотного наддування рухових установок ракет-носіїв.

ФЕДОРЕНКО Алла Костянтинівна — старший науковий співробітник відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика верхньої атмосфери та іоносфери.

ХАЛАЛІЇ Михайло Іванович — провідний інженер-електронік Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія».

Напрямок науки — астрономічне приладобудування.

ХОДА Олег Олександрович — старший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — глобальні навігаційні супутникові системи.

ЦИМБАЛ Андрій Юрійович — інженер-конструктор III категорії Публічного акціонерного товариства «Завод «Маяк», Київ.

Напрямок науки — сучасні стратегії та методи обробки металів різанням, обробка складних поверхонь фрезеруванням.

ЧЕРЕМНИХ Олег Костянтинівич — завідувач відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, доктор фізико-математичних наук, професор.

Напрямок науки — фізика ближнього космосу, фізика плазми.

ЧЕРНОЗУБ Віктор Михайлович — технік першої категорії Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія».

Напрямок науки — астрономічне приладобудування.

ШАХОВСЬКИЙ Дмитро Миколайович — старший науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Кримська астрофізична обсерваторія», кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — астрофізика, поляриметрія, астрономічне і космічне приладобудування.

ШПОРТЮК Зіновія Михайлівна — старший науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — математичне моделювання процесів енергомасообміну в геосистемах, методи обробки даних дистанційного зондування Землі.

ШУЛЬГА Олександр Васильович — заступник директора з наукових питань, завідувач лабораторії Науково-до-

слідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія», кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

Напрямок науки — навколоземна астрономія.

ЯЦКІВ Ярослав Степанович — директор Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, академік НАН України, лауреат Державних премій України і СРСР, міжнародної премії Євросоюзу імені Рене Декарта.

Напрямок науки — дослідження особливостей обертання Землі, фундаментальна астрометрія, космічна геодинаміка.