ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕВПОРЯДКУВАННЯ

УДК 528.24

Тадєєв О. А., к.т.н., доцент, Тадєєва О. О., магістр (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

НАБЛИЖЕНЕ РІШЕННЯ ЗАДАЧІ ТРАНСФОРМУВАННЯ СИСТЕМ КООРДИНАТ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО РАЙОНУ

Пропонується спрощений алгоритм трансформування координатної основи в загальноземну референцну систему на рівні точності опорних мереж 3 та 4 класів. Розкриті можливості застосування такого рішення для трансформування існуючих картографічних матеріалів.

Предлагается упрощенный алгоритм трансформирования координатной основы в общеземную референцную систему на уровне точности сетей 3 и 4 классов. Раскрыты возможности использования такого решения для трансформирования имеющихся картографических материалов.

The simple algorithm of the transformation the coordinate's basis to the earth reference system on the standard of precision a network of 3 and 4 classes is proposed. The possibilities of use of this solution to the transformation of the existent cartography materials are exposed.

Ключові слова: трансформування систем координат, картографування.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями. З 1 січня 2007 року в Україні задекларовано перехід на нову національну систему координат УСК2000. Параметри системи визначені постановою Кабінету Міністрів України [5] із змінами [1]. Національна геодезична система координат УСК2000 ґрунтується на основі загальноземної референцної системи для GPS-технологій ITRS з відповідною реалізацією ITRF89. На перехідний період до введення системи УСК2000 для обчислення координат пунктів Державної геодезичної мережі залишається система координат 1942 року СК42 (чи її видозміна СК63), яка ґрунтується на референц-еліпсоїді Красовського. Завдання переведення державної координатної основи з еліпсоїдальної системи Красовського в загальноземну прийнято називати трансформуванням систем координат.

Аналіз останніх досліджень. Просто констатація запровадження нової референцної системи координат практично мало що значить. Важливим є відпрацювання механізму її практичного втілення. На даному етапі в Україні вирішується завдання вибору оптимального шляху перебудови національної системи відліку. На це спрямовані зусилля широкого кола дослідників як наукового, так і виробничого потенціалу держави. Складність вирішення поставленого завдання обумовлюється такими факторами:

– з однієї сторони, необхідне оперативне впровадження в геодезичне ви-

робництво нової системи відліку, яка забезпечить ефективне використання супутникових радіонавігаційних систем у мережі активних референцних станцій. Однозначне ефективне ріщення завдання впровадження нової національної системи координат можна було б досягнути лише за умови створення цілісної мережі перманентних супутникових станцій та її адаптації до вимог стандарту ITRF в рамках європейської системи ETRF;

– з другої сторони, внаслідок очевидних матеріальних утруднень та фінансової неспроможності створення мережі перманентних станцій, в новій структурі системи відліку повинна бути максимально врахована можливість використання існуючої Державної геодезичної мережі. Остання була складовою частиною неіснуючої нині геодезичної мережі СРСР і залишається на сьогоднішній день основою загальнодержавного картографування території України. Тож необхідна модернізація існуючої мережі з метою її трансформування у референцну систему ITRF [6].

Побудові системи ITRF передувало створення геодезичної референцної системи GRS80, яка заснована на теорії еквіпотенціального еліпсоїду обертання з встановленими параметрами. У 1979р. Генеральною асамблеєю міжнародного геодезичного та геофізичного союзу IUGG та відповідною резолюцією Міжнародної асоціації геодезії IAG система рекомендована як офіційна референцна система для геодезичних робіт. По мірі накопичення вихідних даних та підвищення їх точності згодом у практику геодезичних робіт було запроваджено вдосконалену геоцентричну еліпсоїдальну систему WGS84, яка стала основою системи ITRS. Її реалізації ITRFXX побудовані у вигляді мережі великого числа наземних пунктів, положення яких враховує дані моніторингу параметрів обертання Землі, припливних ефектів, тектонічних рухів тощо на епоху XX. З цієї причини система ITRFXX регулярно оновлюється та доповнюється даними, які використані у формуванні різних її версій [2]. Остання офіційна версія відноситься до епохи ITRS08. Тому посилання виключно на реалізацію ITRS89, як основу створення національної системи координат і проведення GPS-вимірів, без узгодження змін параметрів системи між епохами XX є морально застарілим.

Еліпсоїдальні системи GRS80, WGS84 та ITRF мають свої особливості та розбіжності констант, які їх ідентифікують. З точки зору геометричних параметрів цих систем, то їх розбіжності мають порядок величин, які не виражаються точністю картографічних та топографічних робіт. Тому в подальшому для рішення поставленої тут задачі вважаємо, що параметри національної системи УСК2000 відповідають основним геометричним параметрам базової еліпсоїдальної системи GRS80. У таблиці 1 вказано основні параметри, за якими буде здійснено рішення поставленої задачі трансформування систем координат.

Таблиця 1

Основні геометричні параметри еліпсоїдальних систем

Назва та позначення параметру	Назва еліпсоїду	
	референц-еліпсоїд Красовського	загальний земний еліпсоїд GRS80
велика піввісь *a*	6 378 245 *м*	6 378 137 *м*
мала піввісь *b*	6 356 863,019 *м*	6 356 752,314 *м*
полярне стиснення α	1/298,3	1/298,257222101
перший ексцентриситет e^2	0,00669342	0,00669438
другий ексцентриситет e'^2	0,00673853	0,00673950

Постановка завдання і методика досліджень. Безперечно, оптимальне з точки зору чисельних критеріїв точності рішення завдання трансформування систем координат може бути досягнуте виключно шляхом організації та проведення комплексу геодезичних, гравіметричних, геофізичних натурних спостережень та космічного моніторингу і відповідного опрацювання одержаних результатів із залученням фундаментальних методів теорії фігури Землі. Представлені у даній роботі дослідження спрямовані на розробку практичних рекомендацій щодо використання існуючої Державної геодезичної мережі та її трансформування у нову міжнародну систему з точністю геодезичного обґрунтування топографічних знімань. Результати досліджень мають певну вагу не стільки в забезпеченні наступного картографування територій, як з метою збереження і трансформування у нову систему існуючих картографічних матеріалів.

Для апробації виробленого методичного підходу та інтерпретації результатів обрано територію, окреслену адміністративними межами Хмельницької області. Вона є показовою з огляду поставленого завдання. Територія області розташована в межах знімальної трапеції масштабу 1:1000000 з номенклатурою М-34 і поділена навпіл осьовим меридіаном п’ятої зони конформної проекції Гаусса-Крюгера. Вихідними даними використано геодезичні координати вершин знімальних трапецій масштабу 1:100000, які покривають територію області. Схема розташування трапецій показана на рисунку.

Суцільне картографування території здійснюється за усталеними правилами відповідно поділу поверхні еліпсоїду на знімальні трапеції заданої номенклатури. Зміна параметрів еліпсоїду має наслідком лише переформатування зображуваної на листі карти частини фізичної поверхні Землі, а геодезичні координати вершин відповідної знімальної трапеції залишаються незмінними. Це дає підстави розрахувати величини спотворень зображуваної поверхні у межах окремої знімальної трапеції, яка відноситься до різних еліпсоїдальних систем.

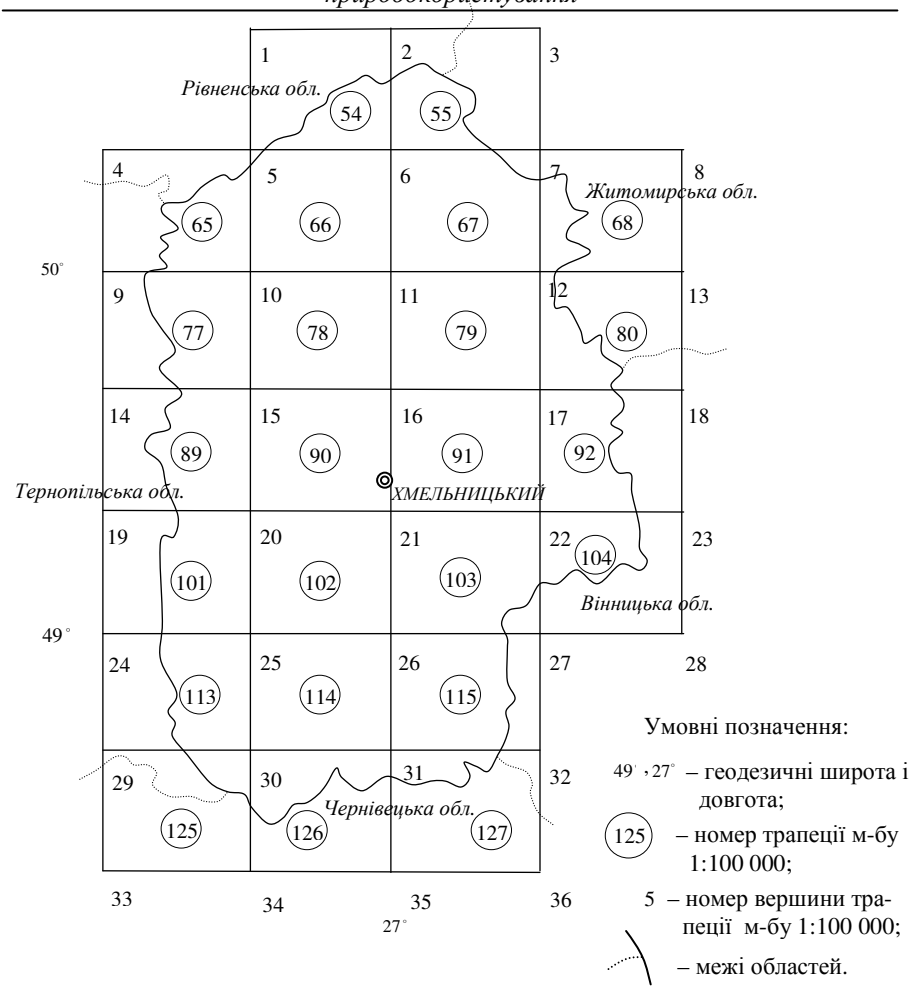

Рисунок. Схема розташування знімальних трапецій масштабу 1:100000 у межах території Хмельницької області

Результати досліджень. Насамперед здійснено перетворення геодезичних координат B, L вершин знімальних трапецій, зображених на рисунку, у систему прямокутних координат x, y проекції Гаусса–Крюгера, віднесених до еліпсоїдальних систем Красовського та GRS80, з врахуванням параметрів таблиці 1. Розрахунок здійснено за формулами, які відповідають точності положення пунктів 1 класу опорних геодезичних мереж:

$$x = X + \frac{\ell^2}{2\rho^2} N \sin B \cos B \ (1 + \frac{\ell^2 \cos^2 B}{12\rho^2}(5 - tg^2 B + 9e'^2 \cos^2 B + 4e'^4 \cos^4 B)); \quad (1)$$

$$y = \frac{\ell}{\rho} N \cos B \ (1 + \frac{\ell^2 \cos^2 B}{6\rho^2}(1 - tg^2 B + e'^2 \cos^2 B)), \quad (2)$$

де $\ell = L - L_0$ – довгота вершини у зоні відносно осьового меридіану L_0 =27°;

$N = a\sqrt{\frac{1+e'^2}{1+e'^2 \cos^2 B}}$ – радіус кривизни перерізу першого вертикалу;

$$X = a(1-e^2)(\alpha \frac{B}{\rho} - \frac{\beta}{2}\sin 2B + \frac{\gamma}{4}\sin 4B - \frac{\delta}{6}\sin 6B); \quad (3)$$

X – довжина дуги осьового меридіану від екватору до паралелі з широтою B; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – сталі коефіцієнти прийнятого еліпсоїду [3].

У таблиці 2 наведено абсолютні $\Delta x = x_{CK42} - x_{GRS80}$, $\Delta y = y_{CK42} - y_{GRS80}$ і відносні $\left|\frac{\Delta x}{x_{CK}}\right| = \frac{1}{N_x}$, $\left|\frac{\Delta y}{y_{CK}}\right| = \frac{1}{N_y}$ показники розбіжностей прямокутних координат вершин трапецій в обох еліпсоїдальних системах. Вони характеризують спотворення планового положення вершин в проекції на площину, а у відношенні окремої виділеної трапеції виражають спотворення відповідної зображуваної поверхні при її трансформуванні з системи СК42 у загальноземну систему. Як і очікувалось, найменші спотворення ординат мають місце поблизу осьового меридіану (на осьовому меридіані спотворення відсутні), а по мірі віддалення від нього спотворення зростають. Такий результат слідує з властивостей проекції Гаусса–Крюгера. Розбіжності абсцис вершин зростають пропорційно збільшенню їх абсолютних значень і геодезичної широти; відповідні відносні показники при цьому зменшуються.

За одержаними результатами здійснено оцінку точності трансформування прямокутних координат вершин виділених трапецій. Для всієї окресленої території середнє значення відносних помилок спотворення абсцис складає 1/56855,1, ординат – 1/60046,2. Якщо зважити, що координати x_{CK}, y_{CK} виступали раніше основою тих чи інших картографічних матеріалів, то їх можна вважати істинними величинами. Тоді різниці $\Delta x, \Delta y$ є складовими вздовж осей абсцис та ординат істинних помилок трансформування систем координат у окремій точці. Середні квадратичні помилки трансформування прямокутних координат, обчислені за формулою Гаусса, складають:

$$m_x = \sqrt{\frac{[\Delta x^2]}{n}} = 96.474(м); \qquad m_y = \sqrt{\frac{[\Delta y^2]}{n}} = 0.805(м) \cdot \quad (4)$$

$$m = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} = 96.477(м), \quad (5)$$

m виражає точність трансформування у межах окресленої території.

Таблиця 2

Результати розрахунку спотворень прямокутних координат вершин знімальних трапецій масштабу 1:100 000

№	Δx (*м*)	Δy (*м*)	$\frac{1}{N_x}$	$\frac{1}{N_y}$	№	Δx (*м*)	Δy (*м*)	$\frac{1}{N_x}$	$\frac{1}{N_y}$
1	98,694	-0,588	1/56895	1/60119	19	96,170	-1,210	1/56850	1/60069
2	98,692	0,000	1/56895	0	20	96,164	-0,605	1/56850	1/60069
3	98,694	0,588	1/56895	1/60119	21	96,162	0,000	1/56850	0
4	98,068	-1,186	1/56884	1/60033	22	96,164	0,605	1/56850	1/60069
5	98,062	-0,592	1/56884	1/60135	23	96,170	1,210	1/56850	1/60069
6	98,060	0,000	1/56884	0	24	95,538	-1,219	1/56838	1/60027
7	98,062	0,592	1/56884	1/60135	25	95,532	-0,609	1/56838	1/60076
8	98,068	1,186	1/56884	1/60033	26	95,529	0,000	1/56838	0
9	97,435	-1,194	1/56873	1/60047	27	95,532	0,609	1/56838	1/60076
10	97,430	-0,597	1/56872	1/60048	28	95,538	1,219	1/56838	1/60027
11	97,428	0,000	1/56872	0	29	94,904	-1,228	1/56827	1/59983
12	97,430	0,597	1/56872	1/60048	30	94,898	-0,614	1/56827	1/59984
13	97,435	1,194	1/56873	1/60047	31	94,896	0,000	1/56827	0
14	96,804	-1,203	1/56861	1/60009	32	94,898	0,614	1/56827	1/59984
15	96,798	-0,601	1/56861	1/60059	33	94,271	-1,236	1/56816	1/59987
16	96,795	0,000	1/56861	0	34	94,265	-0,618	1/56815	1/59987
17	96,798	0,601	1/56861	1/60059	35	94,263	0,000	1/56815	0
18	96,804	1,203	1/56861	1/60009	36	94,265	0,618	1/56815	1/59987

Одним з пріоритетних напрямів директив [4] є створення національної системи відліку, яка б забезпечила збереження репрезентативності існуючого картографічного матеріалу при переході від системи СК42 до нової системи. Репрезентативність цього матеріалу можна вважати дійсною, якщо спотворення планової геодезичної основи не перевищать визначених нормативних помилок. Зокрема, для листів карти масштабу 1:10 000 – 3 *м*; 1:25 000 – 7,5 *м*; 1:50 000 – 15 *м*. Порівняння одержаних абсолютних помилок спотворення координат з нормативними підтверджує наступне: використовувати існуючі картографічні матеріали, створені у системі СК42, сумісно з новостворюваними матеріалами у еліпсоїдальній системі GRS80 неприпустимо.

Разом з тим, зіставлення одержаних помилок з нормативними вимогами [5] посвідчило, що відносні помилки спотворення координат задовольняють допустимій відносній лінійній помилці для планових мереж 3 та 4 класів і мереж згущення. Це дає підстави використати величини спотворень координат для трансформування геодезичних мереж означеної точності. З цією метою за величинами відносних помилок спотворення прямокутних координат здійснено розрахунок очікуваних координат вершин знімальних трапецій у еліпсоїдальній системі GRS80, задаючись їх координатами у системі СК42:

$$x_{GRS80} = x_{CK42}\left(1 - \frac{1}{N_x}\right); \quad y_{GRS80} = y_{CK42}\left(1 - \frac{1}{N_y}\right). \qquad (6)$$

У таблиці 3 розміщено значення різниць Δ_x та Δ_y обчислених раніше та очікуваних координат вершин у системі еліпсоїду GRS80. За ними тепер можна розрахувати середні квадратичні помилки

$$M_x = \sqrt{\frac{[\Delta_x^2]}{n}} = 0.042(м); \qquad M_y = \sqrt{\frac{[\Delta_y^2]}{n}} = 0.001(м). \qquad (7)$$

Помилки M_x та M_y виражають точність обчислення абсцис і ординат вершин трапецій у системі еліпсоїду GRS80 за їх значеннями у системі СК42 без залучення розрахункових формул (1)–(3), геодезичних координат вершин та параметрів еліпсоїду GRS80 (у межах окресленого регіону).

Таблиця 3

Результати розрахунку різниць обчислених та очікуваних прямокутних координат вершин знімальних трапецій в системі еліпсоїду GRS80

№	Різниці координат (*м*)		№	Різниці координат (*м*)		№	Різниці координат (*м*)	
	Δ_x	Δ_y		Δ_x	Δ_y		Δ_x	Δ_y
1	-0,070	0,001	13	-0,031	0,000	25	0,029	0,000
2	-0,070	0,000	14	-0,010	-0,001	26	0,028	0,000
3	-0,070	-0,001	15	-0,009	0,000	27	0,029	0,000
4	-0,050	0,000	16	-0,010	0,000	28	0,028	0,000
5	-0,050	0,001	17	-0,009	0,000	29	0,046	-0,001
6	-0,049	0,000	18	-0,010	0,001	30	0,047	-0,001
7	-0,050	-0,001	19	0,008	0,000	31	0,047	0,000
8	-0,050	0,000	20	0,009	0,000	32	0,047	0,001
9	-0,031	0,000	21	0,009	0,000	33	0,065	-0,001
10	-0,029	0,000	22	0,009	0,000	34	0,066	-0,001
11	-0,029	0,000	23	0,008	0,000	35	0,066	0,000
12	-0,029	0,000	24	0,028	0,000	36	0,066	0,001

Висновки. Середні квадратичні помилки M_x та M_y, визначені за різницями їх обчислених та очікуваних значень, задовольняють вимогам нормативної точності визначення взаємного положення пунктів у мережах 3 і 4 класів та мереж згущення, яка дорівнює 0,05 *м* [5]. Це дозволяє стверджувати, що розкритий тут алгоритм можна використовувати для обчислення координат існуючих пунктів 3 та 4 класу і мереж згущення в системі еліпсоїду GRS80 за їх координатами в системі СК42. Крім того, такий підхід має очевидні перспективи у напрямі використання і трансформування у загальноземну референцну систему “старих” картографічних матеріалів. Останнє можна досягнути

шляхом перерахунку прямокутних координат вершин листів існуючих карт, зведення рамок відповідних трапецій та їх трансформування на поверхню еліпсоїду GRS80. Тим більше, якщо перевести існуючі картографічні матеріали у цифровий формат, то рішення задачі значно споститься і цим самим відпаде необхідність проведення нових польових топографічних робіт.

Потрібно зазначити наступне: 1) такий алгоритм діє тільки у межах території, для якої встановлені відносні помилки спотворення координат внаслідок трансформування систем; 2) чисельні значення помилок M_x та M_y залежать від площі та географічного розташування території. По мірі зменшення площі території, наближення до осьового меридіану, а також зменшення її середньої широти порядок помилок спадатиме. У підсумку це забезпечить підвищення ефективності рішення поставленого завдання.

У 60-і роки минулого століття систему СК42 було штучно спотворено і на її основі створено закриту для вільного доступу систему прямокутних координат СК63. Остання стала основою Державної геодезичної мережі СРСР, на якій ґрунтувались усі топографо-геодезичні та картографічні роботи. Наслідки режимних обмежень радянського періоду проявляються дотепер, тому алгоритм “спотворення” і переходу від однієї системи до іншої зберігає статус “таємно”. Загальновідомо також, що процес згущення державної геодезичної мережі в системі СК63 відбувався з технологічними порушеннями, які оправдовувались забезпеченням секретності координатної основи. Такі порушення в наслідку спричинили значні деформації геодезичної мережі. Їх дослідження та врахування є предметом окремих досліджень. Тож констатовані факти унеможливлюють у даній роботі повною мірою проілюструвати запропоноване рішення задачі трансформування.

1. Деякі питання застосування геодезичної системи координат: постанова Кабінету Міністрів України № 1259 від 22.09.2004 р. – К., 2004. **2**. Дослідження гравітаційного поля, топографії океану та рухів земної кори в регіоні Антарктики: монографія / О. М. Марченко, К. Р. Третяк, А. Я. Кульчицький, Ю. І. Голубінка, Д. О. Марченко, Н. П. Третяк; за заг. ред. О. М. Марченка та К. Р. Третяка. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 308 с. **3**. Закатов П. С. Курс высшей геодезии / П. С. Закатов. – М. : Недра, 1964. – 504 с. **4**. Про затвердження державної науково-технічної програми розвитку топографо-геодезичної діяльності та національного картографування на 2003-2010 роки: Постанова Кабінету Міністрів України №37 від 16.01.2003 р. – К., 2003. **5**. Про затвердження основних положень створення Державної геодезичної мережі України: Постанова Кабінету Міністрів України №844 від 8.06.1998р. – К., 1998. **6**. Савчук С. Г. Оцінка сучасного стану використання референцних систем координат в Україні // Зб. наук. пр. “Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва”. – Львів: Вид-во НУ “Львівська політехніка”. – 2008. – Вип.1 (15). – С.61-69.

Рецензент: д.т.н., професор Черняга П. Г. (НУВГП)