

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КРУГА ЛАЗЕРНИХ ТРЕКЕРІВ

**О. Самойленко**

ДП “Державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту справ споживачів” (ДП “Укрметртестстандарт”)

**Б. Монюк**

Київський національний університет будівництва і архітектури

**Ключові слова:** лазерний трекер, метрологічні характеристики, середня квадратична похибка (СКП) вимірювання горизонтальних кутів, координатний трековий метод.

### Постановка проблеми

Однією з основних метрологічних характеристик, яку необхідно визначати в ході державної метрологічної атестації лазерних трекерів або контролювати під час перевірки, є середня квадратична похибка (СКП) вимірювання горизонтальних кутів.

Враховуючи постійне зростання вимог до точності виготовлення деталей у промисловості й безперервне підвищення точності лазерних трекерів, необхідно розробити такі методики дослідження СКП вимірювання горизонтальних кутів трекерами, точність яких відповідає б сучасним вимогам. Методи і засоби метрологічних досліджень лазерних трекерів, що пропонують різні закордонні організації та дослідницькі лабораторії, не завжди відповідають реаліям метрологічного забезпечення, що склалися в Україні, що актуалізує завдання розроблення нових методів.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

Методи контролю метрологічних характеристик лазерних трекерів фірми-виробники визначають для забезпечення випуску їх з виробництва. В основному вони ґрунтуються на дорогому устаткуванні, розробленому саме для таких цілей. Означені в нормативно-методичних документах [1–3] методи і засоби досліджень реалізують на практиці за допомогою еталонних кінцевих мір довжини, які орієнтовані більше на загальне оцінювання СКП вимірювання горизонтальних кутів трекерами у вузькому діапазоні. Недоліком таких методів є те, що неможливо розділити похибку кутових та лінійних вимірювань.

В описаному в [4] методі використано еталонну міру площинного кута (призму), автоколіматор та поворотний стіл. Вимірювання виконувались трекером на плоске дзеркало, а не на сферичний відбивач. Дзеркало використано замість сферичного відбивача для усунення впливу ексцентриситету між осями обертання. Аналогічно поворотний стіл використано у European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) [5] для вимірювання на сферичний відбивач. Однак у цих випадках на похибку вимірювань трекером може

впливати неплоскість дзеркала та ексцентриситет між осями обертання поворотного стола та трекера.

### Постановка завдання

Розробити методику дослідження СКП вимірювання горизонтальних кутів лазерним трекером прямим порівнянням з кутами еталонної міри площинного кута (призми) та без призми.

### Основний зміст роботи

Методика цього дослідження ґрунтується на використанні поворотного стола, автоколіматора АК-02У та 24-гранної призми – робочих еталонів 1-го розряду, за ДСТУ 7212 [6] (рис. 1). Перед початком дослідження поворотний стіл необхідно привести в горизонтальне положення за допомогою циліндричного рівня. Зверху на поворотний стіл встановлюється 24-гранна еталонна призма, дійсні значення кутів між гранями якої відомі в границях допустимої абсолютної похибки  $\pm 0,3''$ . На призму наводиться автоколіматор АК-02У (границі допустимої абсолютної похибки вимірювання вертикальних та горизонтальних кутів  $\pm 0,2''$ ).

Лазерний трекер встановлюють над призмою фронтально до сферичного відбивача за допомогою спеціально виготовленого кріплення і приводять в робоче положення. Відбивач встановлюється на підставці приблизно на висоті голови трекера, на відстані 4 м. Суть методу полягає у тому, що лазерним трекером виконують вимірювання на нерухомий сферичний відбивач, через кожні  $15^\circ$  повороту поворотного стола спочатку за, а потім проти ходу годинникової стрілки до кінця діапазону вимірювання горизонтальних кутів лазерного трекера. Трекери, які розміщені на території України, а саме Faro X та Faro ION, мають обмежений діапазон вимірювання горизонтальних кутів (рис. 2). Тому потрібно виконувати дослідження СКП вимірювання горизонтального кута лазерним трекером спочатку за ходом (від  $0^\circ$  до  $270^\circ$ ), а потім проти ходу годинникової стрілки (від  $0^\circ$  до  $270^\circ$ ). Під час кожного вимірювання оператор знімає відлік, наводячи автоколіматор на грань призми. Після закінчення вимірювань за ходом годинникової стрілки трекер повертають у початкову позицію на відлік  $0^\circ$  на поворотному столі й виконують аналогічні вимірювання проти ходу годинникової стрілки (від  $0^\circ$  до  $-270^\circ$ ).

Схема вимірювань під час дослідження СКП вимірювань горизонтального кута лазерним трекером зображена на рис. 3.

Методика відпрацьовувалась під час дослідження лазерного трекара Faro ION, СКП вимірювання горизонтальних кутів яким становить  $10+2,5 \cdot L(\text{м})$  мкм [7]. СКП, виражена в лінійній мірі, являє собою похибку в напрямку, перпендикулярному до напрямку візування. Так її легше порівнювати з похибкою вимірювання віддалі. З формули, за якою нормована СКП вимірювань кута, видно, що якщо СКП перевести у кутову міру, то вона зменшується зі збільшенням віддалі до відбивача до  $0,5''$ .



Рис. 1. Дослідження лазерного трекара на поворотному столі

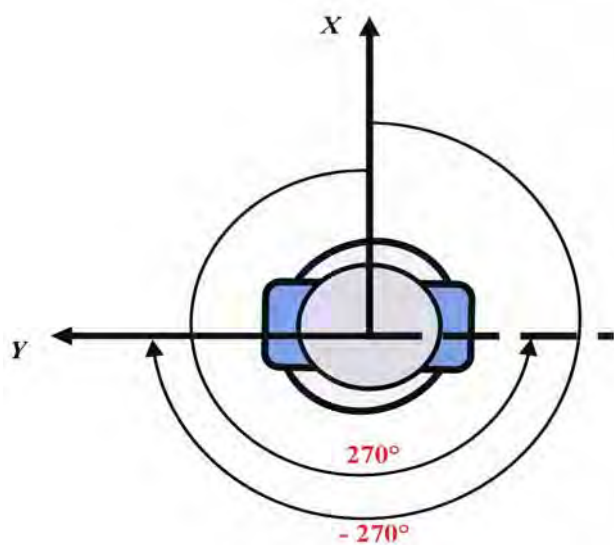


Рис. 2. Діапазон вимірювання горизонтальних кутів лазерним трекером FARO X та ION

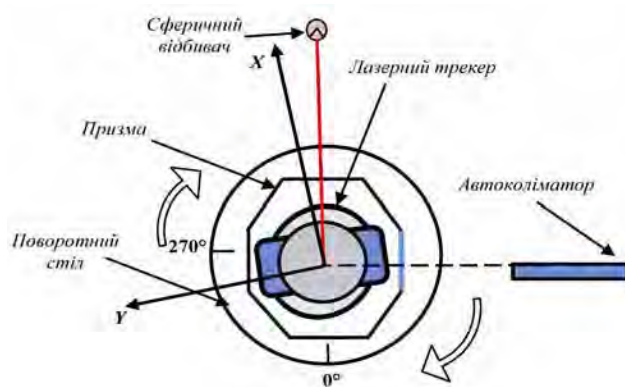


Рис. 3. Схема дослідження СКП вимірювання горизонтальних кутів лазерним трекером

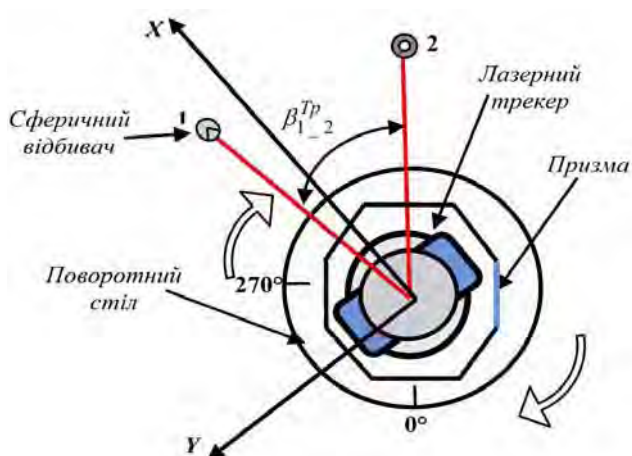


Рис. 4. Схема дослідження СКП вимірювання горизонтальних кутів лазерним трекером

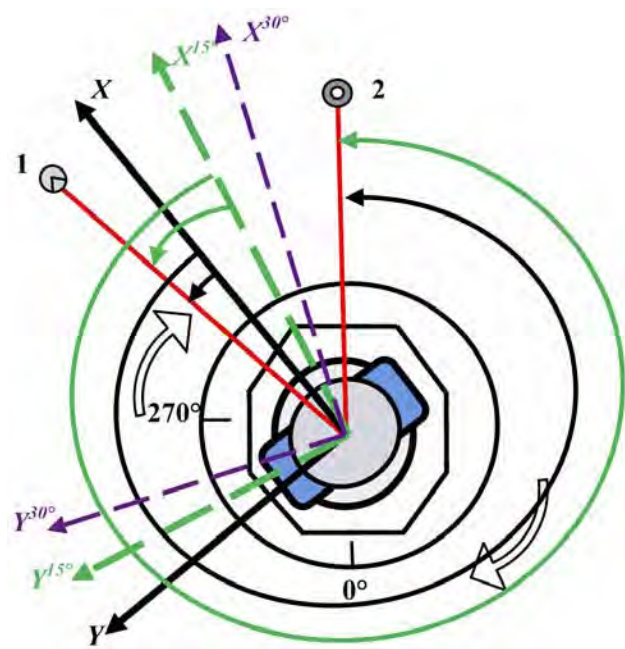


Рис. 5. Схема зміни системи координат трекара в разі повороту столом за ходом годинникової стрілки

СКП вимірювання горизонтальних кутів методом прямого порівняння вимірних трекером кутів з еталонними кутами призми становила 2,6", що перевищує нормоване значення для цієї відстані у 1,1". Абсолютні похибки кута при цьому мали синусоїдальний характер, що свідчить про наявність систематичних похибок або лазерного трекера, або методу дослідження. Щоб виключити систематичні похибки методу досліджень, застосовано розроблений О.М. Самойленко **координатний трековий метод**. Суть дослідження полягає у тому, що лазерним трекером виконують аналогічні вимірювання не на одну ціль, а на дві, де встановлювався відбивач (рис. 4, 5).

Оскільки трекер видає результати вимірювань у вигляді координат у своїй системі координат, дирекційний кут  $i$ -го напрямку обчислюємо за формулою:

$$\alpha_i^{Tp} = \arctg\left(\frac{Y_i}{X_i}\right), \quad (1)$$

де  $X_i, Y_i$  – координати сферичного відбивача для  $i$ -го напрямку.

Горизонтальний кут  $\beta_{1-2}^{Tp}$ , вимірний лазерним трекером, обчислюємо за формулою:

$$\beta_{1-2}^{Tp} = \alpha_1^{Tp} - \alpha_2^{Tp}, \quad (2)$$

де  $\alpha_1^{Tp}$  – дирекційний кут для 1-го напрямку, вимірюного лазерним трекером;  $\alpha_2^{Tp}$  – дирекційний кут для 2-го напрямку, вимірюного трекером.

Відстань з центра системи координат до  $i$ -го напрямку сферичного відбивача  $D_i$  та  $z_i$  – зенітну відстань (вертикальний кут)  $i$ -го напрямку сферичного відбивача обчислюють за формулами:

$$D_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2}, \quad (3)$$

$$z_i = \arccos\left(\frac{Z_i}{D_i}\right), \quad (4)$$

де  $X_i, Y_i, Z_i$  – координати сферичного відбивача для  $i$ -го напрямку. Результати розрахунку горизонтального кута  $\beta_{1-2}^{Tp}$  наведено в табл. 1

З табл. 1 видно, що той самий кут, вимірюваний лазерним трекером, змінюється за різних положень стола, що свідчить про наявність ексцентриситету (вісь обертання трекера не збігається з віссю обертання стола). Але тут ексцентриситет проявляється повною мірою, а не так, як для попереднього експерименту.

**Координатний трековий метод** дає змогу повністю виявити і виключити цей ексцентриситет з результатів оцінки точності вимірювань горизонтальних кутів.

Ефективність **координатного трекового методу** показано на декількох об'єктах, зокрема при визначенні просторового положення азимутальної та кутомісної осей радіотелескопів РТ-22 на Кримському геодинамічному полігоні "Сімеїз-Кацівелі" та РТ-70 Центра далекого космічного зв'язку України, а також декількох станцій лазерної локації супутників.

**Трек точки** (у випадку досліджень трекера, рис. 5) – це коло, яке утворює вісь обертання трекера в разі її обертання на поворотному столі. Координати центра кола, вписаного в координати точок трека, є координатами осі обертання стола в заданій умовній системі координат, утвореній, наприклад, під час першого вимірювання трекером.

Таблиця 1

**Результати обчислення горизонтального кута, вимірюного лазерним трекером при повороті поворотного стола за і проти ходу годинникової стрілки**

Кут повороту трекера столом, °	$i$	$\beta_{1-2}^{Tp}$			Кут повороту трекера столом, °	$i$	$\beta_{1-2}^{Tp}$		
		°	'	"			°	'	"
0	1	39	38	0,9	0	1	39	38	2,7
15	2	39	38	2,3	-15	2	39	38	2,3
30	3	39	37	59,8	-30	3	39	37	59,5
45	4	39	37	55,6	-45	4	39	37	57,7
60	5	39	37	51,0	-60	5	39	37	53,3
75	6	39	37	47,0	-75	6	39	37	48,8
90	7	39	37	41,3	-90	7	39	37	43,6
105	8	39	37	36,0	-105	8	39	37	39,4
120	9	39	37	32,2	-120	9	39	37	32,9
135	10	39	37	28,1	-135	10	39	37	30,0
150	11	39	37	24,2	-150	11	39	37	27,4
165	12	39	37	22,3	-165	12	39	37	24,8
180	13	39	37	22,5	-180	13	39	37	22,8
195	14	39	37	24,9	-195	14	39	37	22,6
210	15	39	37	26,6	-210	15	39	37	24,6
225	16	39	37	29,0	-225	16	39	37	26,8
240	17	39	37	33,5					
255	18	39	37	38,9					

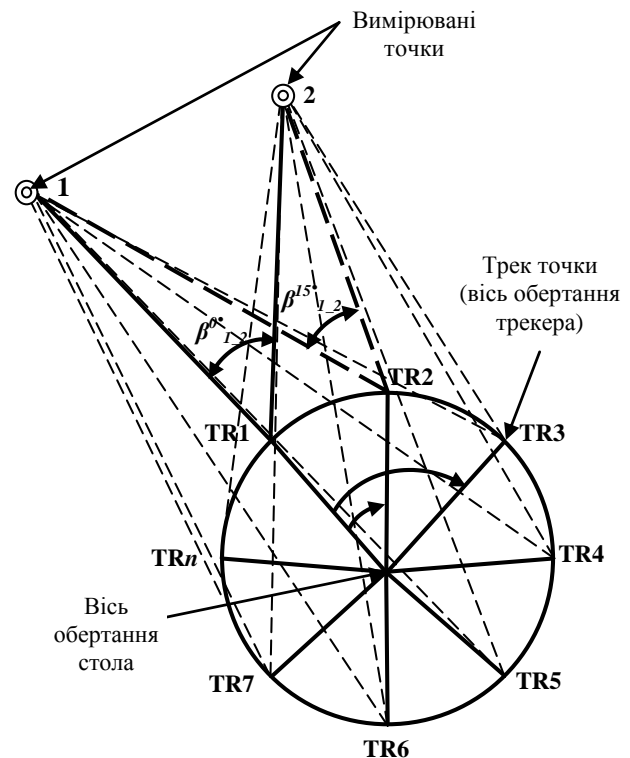


Рис. 6. Схема трека точки при дослідженні лазерного трекера FARO ION на поворотному столі

Щоб одержати координати центра кола, необхідно виконати апроксимацію координат точок трека колом за методом найменших квадратів.

Запропоновано апроксимацію виконувати разом з вирівнюванням геодезичної мережі пакетом прикладних програм АРМИГ [8]. Це дає змогу виконати дослідження похибки вимірювань віддалі у вузькому діапазоні вимірювань довжини в межах подвоєної величини ексцентриситету 0,6 мм.

При цьому в першому наближенні необхідно:

- прийняти і ввести в програму вирівнювання горизонтальних геодезичних мереж координати точок трека, одержані з полярної засічки з першої точки трека як вихідні;

- прийняти координати центра кола як визначувані величини за результатами вирівнювання;

- взяти наближене значення радіуса кола і прийняти як вимірну величину (хоча її і не вимірювали);

- ввести в програму наближене значення радіуса, начебто виміряного між кожною точкою трека і центром кола і виконати вирівнювання.

У другому наближенні необхідно:

- обчислити середнє з поправок до наближеного значення радіуса;

- обчислити виправлене значення радіуса, додавши зі своїм знаком це середнє значення поправки до наближеного значення радіуса;

- ввести в програму виправлене значення радіуса замість наближеного, начебто виміряного як відстань між кожною точкою трека і центром кола, і виконати вирівнювання.

Якщо середнє з поправок до радіуса в черговому наближенні достатньо близьке до нуля (наприклад, не

перевищує 0,1 мкм), то обчислення припиняються, якщо ні, то обчислюється виправлене значення радіуса у третьому наближенні, вводиться в програму і вирівнювання повторюється.

Середню квадратичну похибку (СКП) вимірювання горизонтальних кутів і віддалі обчислювали за формулою:

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n - k}}, \quad (5)$$

$v_i$  – поправка до виміряного значення кута або відстані (табл. 2), одержана з вирівнювання;  $n$  – кількість вимірюваних кутів або відстаней трекером (вісімнадцять);  $k$  – кількість невідомих, які визначають під час вирівнювання (три).

Оброблення здійснено в трьох варіантах, коли:

- координати осі обертання трекера визначалися зі зворотної лінійної кутової засічки, де умовно вимірними прийнято кути призми та радіус кола, який є лінійним значенням ексцентриситету трекера до стола;

- координати осі обертання трекера визначено зі зворотної лінійної засічки, а координати центра кутового енкодера (лімба) трекера з кутової;

- координати осі обертання трекера визначалися тільки зі зворотної лінійної засічки.

Результати визначення СКП вимірювання горизонтальних кутів і віддалей при вимірюванні окремого кута лазерним трекером наведено в табл. 2.

Таблиця 2

**Результати вирівнювання даних, виміряних лазерним трекером, у програмі АРМИГ під час повороту поворотного столу за ходом годинникової стрілки**

Кут повороту трекера столом, °	Ім'я точок трека	Поправки у віддалі 1-го напрямку, мкм	Поправки у віддалі 2-го напрямку, мкм	Поправки у віддалі 1-го напрямку, мкм	Поправки у віддалі 2-го напрямку, мкм	Поправки у кут $\beta_{1-2}^{Tp}$ , ..."	Поправки у кут $\beta_{1-2}^{Tp}$ , ..."
1	2	3	4	5	6	7	8
0	TR1	2,6	5,2	-1,3	3,4	1,9	1,9
15	TR2	2,6	-2,2	1,2	-2,4	-0,6	-0,6
30	TR3	2,0	-3,9	2,1	-3,1	-0,5	-0,6
45	TR4	1,0	-7,9	3,9	-4,1	0,1	-0,1
60	TR5	2,1	-4,0	2,3	-1,7	0,4	0,2
75	TR6	3,0	-6,9	2,8	-3,2	-0,6	-1,0
90	TR7	3,6	-5,2	2,2	-1,9	-0,2	-0,5
105	TR8	0	-3,2	-2,5	-0,2	-0,1	-0,5
120	TR9	0	-3,6	-2,2	-2,8	-1,0	-1,2
135	TR10	-0,8	-1,2	-1,1	-2,8	-0,8	-0,7
150	TR11	-2,3	1,7	-0,7	-0,7	0,2	0,4
165	TR12	-4,0	1,0	-0,1	-0,8	0,3	0,6
180	TR13	-3,8	3,7	-1,5	3,4	0,1	0,2
195	TR14	-2,2	1,2	-1,7	1,9	-1,1	-1,2
210	TR15	-1,8	3,1	-3,0	3,1	-0,5	-0,6
225	TR16	0,6	6,4	-3,0	3,8	0,5	0,6
240	TR17	1,0	2,8	-1,1	0,7	0,3	0,4
255	TR18	-0,8	6,3	-2,5	2,0	-0,1	0,2
<b>m =</b>		<b>2,47</b>	<b>4,77</b>	<b>2,37</b>	<b>2,84</b>	<b>0,75</b>	<b>0,85</b>

Перший варіант відхилено через наявність значної систематичної похибки, викликані ексцентриситетом осі обертання трекера до центра кутового енкадера. Другий варіант (стовпці 3, 4 та 7) дав змогу одержати значення цього ексцентриситету за різницею координат названих вище точок. Третій варіант (стовпці 5, 6 та 8) наведено для підтвердження правильності результатів, одержаних у другому варіанті. СКП вимірювань горизонтальних кутів у другому та третьому варіанті добре збігаються ( $0,75''$  та  $0,85''$ ).

#### Висновки

1. Координатний трековий метод придатний для дослідження не тільки СКП вимірювання горизонтальних кутів лазерним трекером в усьому робочому діапазоні вимірювань, а і для виявлення (на відміну від інших методів) ексцентриситету осі обертання трекера до центра кутового енкадера, який для наведених вище досліджень становить 1 мкм.

2. СКП вимірювань горизонтальних кутів лазерним трекером за відстані до відбивача від 2 до 4 м становить  $0,8''$ , при нормованій похибці на ці відстані  $1,1''$ .

3. СКП вимірювання віддалі лазерним трекером у вузькому діапазоні 0,6 мм (подвоєний ексцентриситет осі обертання трекера до осі обертання стола) дорівнює приблизно 2,5 мкм.

#### Перспективи подальших досліджень

Виявити причину виникнення невиключеної систематичної похибки, виявленої під час дослідження СКП вимірювань віддалей координатним трековим методом.

#### Література

1. ASME B89.4.19-2006 Standard – Performance Evaluation of Laser-Based Spherical Coordinate Measurement Systems.
2. ISO Working Draft: 10360-10 Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) – Part 10: Laser Trackers for measuring point-to-point distances.
3. Draft VDI/VDE 2617 part 10, Accuracy of coordinate measuring machines – Characteristics and their checking – Acceptance and reverification tests of laser trackers.
4. Gassner. G. and Ruland. R. Laser Tracker Test Facility at SLAC – Progress Report. In: The 10th

International Workshop on Accelerator Alignment. February 11–15 (2008)

5. Martin D. Instrument Calibration at the ESRF // FIG Congress 2010 Facing the Challenges – Building the Capacity Sydney, Australia, April, 2010.
6. ДСТУ 7212:2011 Державна повірочна схема для засобів вимірювань площинного кута.
7. FARO Technologies Inc. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www.faro.com](http://www.faro.com).
8. Беляев В.А. Пакет прикладних програм. Автоматизированное рабочее место инженера-геодезиста (АРМИГ) / В.А. Беляев // Инструкция по эксплуатации. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www.armig.org](http://www.armig.org)

#### Дослідження метрологічних характеристик горизонтального круга лазерних трекерів

О. Самойленко, Б. Монюк

Запропоновано й обґрунтовано застосування координатного трекового методу для визначення СКП вимірювання горизонтальних кутів і віддалей лазерними трекерами за результатами вимірювань на поворотному столі із застосуванням еталонних призми та автоколіматора.

#### Исследование метрологических характеристик горизонтального круга лазерных трекеров

А. Самойленко, Б. Монюк

Предложено и обосновано применение координатного трекового метода для определения СКП измерения горизонтальных углов и расстояний лазерными трекерами по результатам измерений на поворотном столе с применением эталонных призмы и автоколиматора.

#### Research of metrological characteristics horizontal circle of laser trackers

A. Samoylenko, B. Monyuk

Proposed and justified the use of coordinate tracking method for determining the mean square error measuring horizontal angles and distances laser tracker on the results of measurements on the rotary table with the use of standard prism and autocollimator.

Чергова 19-та Міжнародна науково-технічна конференція



## «ГЕОФОРУМ-2014»

присвячена професійному святу працівників  
геології, геодезії і картографії України

відбудеться у Львові та його околицях

23-25 квітня 2014 р.