



великої складності для сучасних комп'ютерів. З практичної точки зору для коректного усереднення координат точок на осі може бути використаний як перший, так і другий або третій випадки чи їх комбінація.

Висновки та перспективи досліджень. 1. Запропоновано найбільш загальний варіант визначення просторового положення та просторового орієнтування осі обертання динамічного об'єкта координатним площинним та координатним трековим методами, які дозволяють сумісно обробляти за МНК результати спостережень будь-якої кількості точок при будь-якій кількості положень об'єкта.

2. Рівняння поправок (18), в якому треки точок апроксимуються вкладеними циліндрами та площинами, має перевагу над рівнянням поправок (4), де треки точок апроксимуються сферами та площинами, тому що рівняння (4) пов'язане тільки з вимірними величинами, якими умовно є координати точок, а рівняння (18) ще й з проєкціями нахилу осі обертання на вертикальні координатні площини.

У перспективі необхідно дослідити залежність точності визначення просторового положення та орієнтування координатним площинним методом від кількості точок у треку, кількості самих треків та від їх розподілу вздовж осі обертання.

Література

1. *Самойленко, А.Н.* Определение взаимного положения двух астрономических приборов геодезическими методами [Текст] / А.Н. Самойленко, П.А. Чуланов // Инж. геод. – К.: Будівельник, 1989. – Вып. 32. – С. 83-86.
2. *Самойленко, А.Н.* Локальная геодезическая сеть на Симеизском геодинамическом полигоне [Текст] / А.Н. Самойленко. – К., 1996. – 36 с. (Препр. ГАО-96-1Р / ГАО НАН Украины).
3. *Самойленко, А.Н.* Определение геометрических параметров радиотелескопа РТ-70 геодезическими методами [Текст] / А.Н. Самойленко, В.В. Заец // Инж. геод. – К.: Будівельник, 2005. – Вып. 51. – С. 244-253.
4. *Самойленко, О.М.* Методика виконання геодезичних вимірювань при визначенні просторового положення

азимутальної та кутомісної осей обертання радіотелескопу РТ-22 [Текст] / О.М. Самойленко // Инж. геод. – 2006. – Вып. 52. – С. 176-185.

5. *Самойленко, О.М.* Геодезична прив'язка радіотелескопів та станцій лазерної локації супутників до GPS-маркерів [Текст] / О.М. Самойленко // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук. пр. – Л.: Ліга-Прес, 2006. – Вып. 1. – С. 46-52.

6. *Самойленко, О.М.* Результаты геодезичної прив'язки радіотелескопа та станцій лазерної локації супутників до GPS-маркерів на Кримському геодинамічному полігоні "Сімеїз – Кацівелі" [Текст] / О.М. Самойленко, О.О. Хода, В.В. Заец // Кинематика і фізика небесних тел. – 2007. – Т. 23. – № 1. – С. 3-10.

7. *Самойленко, А.Н.* Определение геометрических параметров динамического объекта – радиотелескопа РТ-22 КраО по результатам геодезических измерений в 1994, 2004 и 2008 годах [Текст] / А.Н. Самойленко // Инж. геод. – 2011. – Вып. 56. – С. 198-208.

8. *Самойленко, О.М.* Апроксимація поверхонь динамічних об'єктів сумісно з вирівнюванням результатів геодезичних вимірювань з урахуванням їх похибок та похибок вихідних даних [Текст] / О.М. Самойленко // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Л.: Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2011. – Вып. 1. – С. 34-40.

9. *Самойленко, О.М.* Визначення просторової орієнтації осі обертання динамічного об'єкта геодезичним автоколімаційним методом [Текст] / О.М. Самойленко // Вісн. геод. та картогр. – 2011. – № 1. – С. 26-29.

10. *Sarti, P.* Surveying co-located space-geodetic instruments for ITRF computation [Text] / P. Sarti, P. Sillard, L. Vittuari // Journal of Geodesy. – 2004. – Vol. 78. – P. 210-222.

11. *Vittuari, L.* Siveying the GPS-VLBI Eccentriciti at Medicina: Methodological Aspects and Practicalities [Text] / L. Vittuari, P. Sarti, P. Sillard [at all.] // Proceedings of the IERS Workshop on site colocation. IERS Technical Note. – Paris, 2005. – No. 33. – P. 38-48.

12. *Dawson, J.* The determination of telescope and antenna invariant point (IVP) [Text] / J. Dawson, G. Johnston, B. Twilley // Proceedings of the IERS Workshop on site colocation. IERS Technical Note. – Paris, 2005. – No. 33. – P. 128-133.

Надійшла 16.10.12

* * *

УДК 528.48

П. І. Баран

ЕЛЕКТРОННИЙ РІВНЕВО-МАЯТНИКОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ КРЕНІВ СПОРУД

Описывается методика организации наблюдений и обработки данных об измерении кренов сооружений, полученных с помощью электронных датчиков (уровенных или маятниковых), размещенных на разных ярусах. Для одновременного определения коэффициентов параболы аппроксимации общих изменений крена и его азимута используется метод наименьших квадратов, масштабы которых позволяют отслеживать динамику деформационного процесса.

It is described the methodology of organization of observation and processing of data on changes of buildings careens obtained with electronic pickups (level or pendulum ones) placed on different floors. For simultaneous determination of parabola coefficients of approximation of general change of the careen and its azimuth it is used least squares method that allows monitoring the dynamics of the deformation process.

Тенденція до зростання висотності споруд спонукає геодезистів до належної організації цикліч-

них спостережень за їх вертикальністю як у процесі будівництва, так і під час експлуатації. На практиці крени визначають координатним і диференціальним методами [1]. У першому варіанті

© П. І. Баран, 2012



визначають координати нижньої і верхньої точок споруди. Для цього використовують переважно дистанційні способи полярних координат (за допомогою безрефлекторного електронного тахеометра) або прямої кутової засічки. Другий метод ґрунтується на вимірюванні різниці горизонтальних кутів між напрямом на верхню та нижню точки споруди не менше ніж з двох пунктів (за своєю суттю цей метод є аналогом методу прямої кутової засічки). Його особливість полягає в тому, що при цьому не використовуються координати вихідних пунктів, а для обчислення крену та його азимута вимірюють наближені довжини напрямів засічки та їх азимуту.

Обидва методи забезпечують вимірювання абсолютних значень крену та встановлення його напрямку. Їх доцільно використовувати тільки для періодичних (контрольних) спостережень. Для організації та виконання **перманентних (неперервних) спостережень** за змінами крену в інтервалі між періодичними вимірюваннями ефективніші електронні датчики (рівневі або маятникові), які кріпляться до конструкції споруди на різних ярусах (див. малюнок).

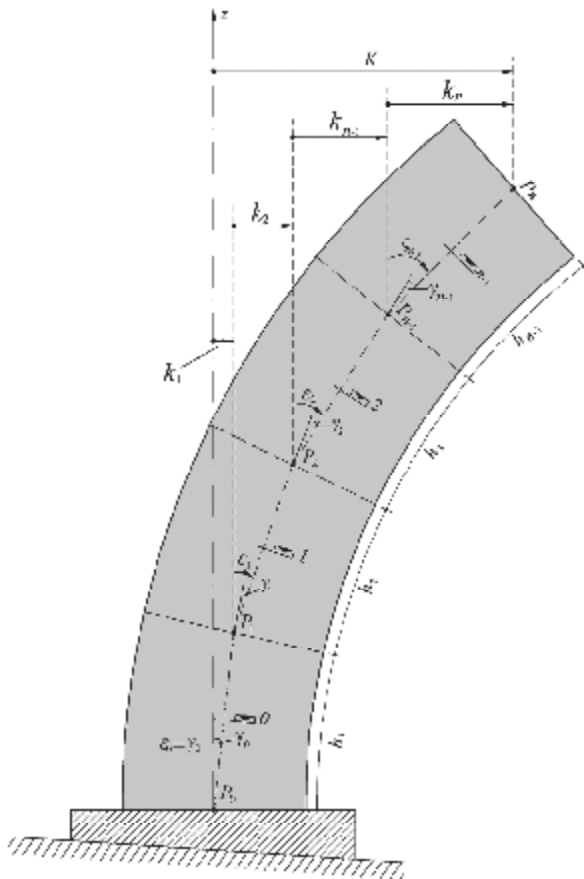


Схема визначення крену поярусними електронними рівнями

Якщо датчики встановити на початковій стадії експлуатації споруди (при відсутності крену), то за даними вимірювань можна визначити абсолютне значення крену та його азимут.

Датчики встановлюють на середині ярусу в точках 1, 2, ..., n-1, а вимірювання проводять по ярусних

хордах. Для контролю і врахування крену фундаменту в ньому закладають один або декілька приладів. Якщо датчиком виміряти поярусні кути відхилень $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ хорд від вертикалі відповідно на середині висот h_1, h_2, \dots, h_n ярусів, то сумарний крен K_{x_i} і K_{x_n} і-ї P_i та верхньої P_n точок відносно нижньої P_0 в одній вертикальній площині по осі абсцис визначається як сума поярусних змін крену за формулами

$$K_{x_i} = \sum_1^i k_i = h_1 \sin \varepsilon_1 + h_2 \sin \varepsilon_2 + \dots + h_i \sin \varepsilon_i;$$

$$K_{x_n} = \sum_1^n k_i = h_1 \sin \varepsilon_1 + h_2 \sin \varepsilon_2 + \dots + h_i \sin \varepsilon_i + \dots + h_n \sin \varepsilon_n.$$

Аналогічні вимірювання відхилень від вертикалі виконують і в другій (перпендикулярній до першої) ординатній площині з обчисленням другої складової крену K_y . Сумарну зміну крену та його азимут для i-ї точки обчислюють за відомими формулами

$$K_i = \sqrt{K_{x_i}^2 + K_{y_i}^2}; \quad \alpha_i = \arctg \frac{K_{y_i}}{K_{x_i}}.$$

Похибка вимірювання крену в цьому випадку становитиме:

$$m_{K_i} = \frac{m_\varepsilon}{\rho} \sqrt{2(h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_i^2)},$$

де m_ε – похибка вимірювання кутів крену.

При однакових висотах ярусів ця похибка буде такою:

$$m_{K_i} = \frac{hm_\varepsilon}{\rho} \sqrt{2i} = \frac{hm_\varepsilon}{\rho} \sqrt{2H_i/h},$$

де $H_i = h_1 + h_2 + \dots + h_i$ – позначка верхньої точки ярусу від вершу фундаменту.

Отже, похибка визначення зміни суттєво зростає в міру збільшення висоти H споруди. Якщо $H=120$ м і $h=15$ м ($n=8$), то при $m_\varepsilon=3''$ загальна похибка вимірювання крену становитиме 0,87 мм, а гранична (при ймовірності $P=0,98$) – 2,2 мм. З урахуванням впливу вітрової і температурної складових деформації похибка реально може сягнути 10 мм. Таке значення похибки практично відповідає вимогам до точності вимірювання кренів прецизійних і звичайних споруд.

Конструкції електронних датчиків описано у працях [3,5]. Основоположниками рівневого методу в Україні були М. Г. Відуєв і В. П. Гржибовський, які розробили мікрокренометр з трьома циліндричними рівнями з мікрометричними головками, розташованими на плоскій платформі з консолю [4]. Два робочі рівні цього приладу взаємно перпендикулярні, а третій (контрольний) розташовується на бісектрисі прямого кута. У 60-х роках минулого століття такий прилад було використано для спостережень за нахилами фундаменту ядерного реактора в м. Дубно, що поблизу Москви.

Аналог цього рівня – маятниковий датчик вертикалі ДВ-1 [2] – розроблено у ДНВП "Пошук"



(м. Вінниця) і застосовано в ДНВП "Укрінжгеодезія" у Києві на 16-поверховому будинку з креном 0,40 м (відносна величина 1/120). Дослідження засвідчило високу (до 2") точність датчика, що дало змогу оперативно вимірювати зміну кута відхилення споруди від вертикалі у двох напрямках, орієнтованих уздовж і поперек його осей. Датчик працював у пасивному режимі, тому для знімання інформації про положення маятника підключався зовнішній блок живлення.

В оновленій моделі цього датчика ДВ-2 було впроваджено автоматичну реєстрацію інформації та дистанційну її передачу в базу даних ПК, що важливо для оперативного моніторингу техногенно та екологічно небезпечних об'єктів: гребель, шлюзів, підпірних стін гідротехнічних споруд, висотних будинків, телевеж, мостових опор та пілонів, димарів, фундаментів турбоагрегатів, баштових кранів, корпусів і конструкцій АЕС, ТЕС, ТЕЦ тощо.

Для врахування коливань конструкцій фірма "Leica" випускає прецизійні оптоелектронні датчики нахилу Nivel 210 і Nivel 220, які дозволяють визначати кути нахилу по двох осях у режимі реального часу. Одночасно з кутами нахилу датчики фіксують зміни температури конструкції. Точність визначення кутів нахилу становить 0,2". Реєстрація даних виконується з частотою 0,3 с.

Наведена інформація наводить на думку, що сучасна інженерно-геодезична практика потребує нового техніко-економічного обґрунтування методів вимірювання кренів (горизонтальних зміщень) споруд, раціонального поєднання періодичних і перманентних методів спостережень. Якщо традиційна методика періодичних спостережень за кренами та опрацювання їх результатів розроблена, то методи опрацювання даних перманентних спостережень ще потребують спеціальних досліджень.

Пропонуємо простий і ефективний метод опрацювання даних спостережень з отриманням рівняння регресії для апроксимації крену в конкретний період часу. Він ґрунтується на досвіді спостережень за кренами точкових висотних споруд, особливо циліндричної і конічної форм. А цей досвід переконує, що для опрацювання даних вимірювань K_{x_i} та K_{y_i} ($i=1,2,\dots,n$) доцільно використовувати рівняння параболи:

$$K_i = \sqrt{K_{x_i}^2 + K_{y_i}^2} = aH_i + bH_i^2. \quad (1)$$

Для визначення коефіцієнтів a і b рівняння параболи та азимута α_K вертикальної площини розташування апроксимованого крену оберемо теоретичну величину проєкцій загального крену на осі координат:

$$K_x^0 = (aH_i + bH_i^2)\cos\alpha_K; \quad K_y^0 = (aH_i + bH_i^2)\sin\alpha_K. \quad (2)$$

Далі за вимірними значеннями K_{x_i} і K_{y_i} запишемо рівняння поправок для кожної ярусної точки:

$$\begin{aligned} H_i A_c + H_i^2 B_c - K_{x_i} &= v_{x_i}; \\ H_i A_s + H_i^2 B_s - K_{y_i} &= v_{y_i}; \quad (i=1,2,\dots,n); \\ A_c &= a \cos\alpha_K; \quad B_c = b \cos\alpha_K; \quad A_s = a \sin\alpha_K; \quad B_s = b \sin\alpha_K, \end{aligned} \quad (3)$$

де A, B – допоміжні коефіцієнти.

Склавши і розв'язавши окремо дві системи нормальних рівнянь (для осі абсцис і ординат)

$$\begin{aligned} [H^2]A_c + [H^3]B_c - [HK_x] &= 0; \\ [H^3]A_c + [H^4]B_c - [H^2K_x] &= 0; \\ [H^2]A_s + [H^3]B_s - [HK_y] &= 0; \\ [H^3]A_s + [H^4]B_s - [H^2K_y] &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

отримаємо допоміжні коефіцієнти, а за ними – коефіцієнти параболи й азимут площини апроксимації:

$$a = \sqrt{A_c^2 + A_s^2}; \quad b = \sqrt{B_c^2 + B_s^2}; \quad \alpha_K = \arctg \frac{B_s}{B_c}. \quad (5)$$

Зауважимо, що азимут α_K можна обчислити і за відношенням A_s/A_c , яке, проте, менше враховує квадратичний параметр апроксимації крену. Значення його поярусних змін знаходимо за формулою (1).

При розташуванні датчиків на ярусах з однаковим інтервалом обчислення коефіцієнтів нормальних рівнянь спрощується:

$$\begin{aligned} [H^2] &= \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} h^2; \quad [H^3] = \frac{n^2(n+1)^2}{4} h^3; \\ [H^4] &= \frac{n(n+1)(2n+1)(3n^2+3n-1)}{30} h^4. \end{aligned} \quad (6)$$

Для оцінювання коефіцієнтів параболи підставляємо їх у рівняння (3), щоб визначити похибку одиниці ваги (при $p=1$):

$$\begin{aligned} \mu_x &= \sqrt{\frac{[v_x^2]}{n-2}}; \quad \mu_y = \sqrt{\frac{[v_y^2]}{n-2}}; \quad m_{A_c} = \mu_x \sqrt{Q_{11}}; \\ m_{B_c} &= \mu_x \sqrt{Q_{22}}, \end{aligned} \quad (7)$$

де Q_{11}, Q_{22} – вагові коефіцієнти, за якими визначають і похибки m_{A_s} та m_{B_s} з використанням μ_x і μ_y .

Похибку апроксимованого значення крену знаходимо з виразу

$$m_{K_i} = \sqrt{(H_i m_a)^2 + (H_i^2 m_b)^2}, \quad (8)$$

а похибку апроксимованого азимута – за відхиленнями $v_{\alpha_i} = \alpha_K - \alpha_i$ згідно з формулою

$$m_{\alpha_K} = \sqrt{\frac{[v_{\alpha} v_{\alpha}]}{n}}. \quad (9)$$

Ця формула дозволяє визначити ступінь довіри до азимута апроксимованого крену і вивчати вплив різних факторів (вітру, бокового сонячного нагрівання) на зміну напрямку крену.

Для прикладу в таблиці наведено результати опрацювання даних вимірювань крену споруди заввишки 108 м з датчиками, розташованими на шести ярусах з однаковим інтервалом у 18 м.

Нормальні рівняння для кренів по осях абсцис і ординат мають вигляд:

$$\begin{aligned} 29484A_c + 2571912B_c + 41,346 &= 0; \\ 2571912A_c + 238820400B_c + 3825,468 &= 0; \\ 29484A_s + 2571912B_s - 33,012 &= 0; \\ 2571912A_s + 238820400B_s - 3070,872 &= 0. \end{aligned}$$



Приклад опрацювання даних вимірювання змін крену

Номер ярусу	Висота ярусу, м	K_x , м	K_y , м	K , м	α , градуси	$K_{\text{апр}}$, м	v_x , м	v_y , м
6	108	-0,182	0,149	0,235	141	0,243	-0,003	0,002
5	90	-0,136	0,110	0,175	141	0,170	0,006	-0,006
4	72	-0,080	0,063	0,102	142	0,110	-0,004	0,004
3	54	-0,053	0,030	0,061	150	0,064	0,005	0,006
2	36	-0,026	0,019	0,032	144	0,029	0,004	-0,003
1	18	0,006	0,010	0,012	59	0,008	-0,011	-0,005
0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сума	-	-	-	-	-	-	-0,003	-0,002
Сума квадратів	-	-	-	-	-	-	0,000223	0,000126

Із розв'язку цих рівнянь отримано такі значення допоміжних коефіцієнтів: $A_c = -0,0000832$; $B_c = -0,0000151$ 1/м і $A_s = -0,0000330$; $B_s = -0,0000132$ 1/м, а також вагові коефіцієнти: $Q_{11} = 0,000560$; $Q_{22} = 0,00000069$. Далі було обчислено коефіцієнти апроксимаційного рівняння параболи $a = 0,0000895$; $b = 0,0000200$ 1/м, поярусні апроксимаційні значення загального крену споруди (див. таблицю) та апроксимаційний азимут $\alpha_K = 138^\circ 50'$ площини їх розташування. За допоміжними коефіцієнтами з рівнянь поправок (3) обчислено відхилення v_x і v_y вимірних проєкцій крену від апроксимованих, які наведено в таблиці. Потім за сумами квадратів цих відхилень визначено похибки одиниць ваги $\mu_x = 0,0075$ і $\mu_y = 0,0056$ м, похибки додаткових коефіцієнтів (0,000177 і 0,000002 1/м та 0,000132 і 0,0000015 1/м) відповідно на осях абсцис і ординат. Похибки коефіцієнтів апроксимації становлять: $m_a = 0,000236$; $m_b = 0,0000026$ 1/м. За відхиленнями v_{α} азимута вимірюного крену від апроксимованого визначено середню похибку збіжності цих азимутів, яка становить $\pm 33''$ (її велике значення викликано зміною напрямку крену по осі абсцис на 1-му ярусі з висотою 18 м).

Для визначення кількості датчиків при їх рівномірному розміщенні на об'єкті взято формулу (1), за якою на величину крену мав би більше впливати другий (квадратичний) член формули, навіть при $a > b$. Але поглиблений аналіз показав, що теоретично цей вплив майже однаковий. Тому кількість датчиків n доцільніше визначати з формули (8), склавши функцію різниці впливу похибок на вимірювання крену на окремих ярусах заввишки $h = H/n$ і на всій висоті споруди H , тобто

$$F = (m_a^2 \frac{H^2}{n^2} + m_b^2 \frac{H^4}{n^4})n - (m_a^2 H^2 + m_b^2 H^4).$$

Із похідної цієї функції

$$\frac{dF}{dn} = -\frac{H^2}{n^2} \left(m_a^2 + 3m_b^2 \frac{H^2}{n^2} \right) = 0$$

$$\text{отримано: } n \geq \frac{m_b H}{m_a} \sqrt{3}.$$

Отже, кількість ярусних датчиків залежить від висоти споруди і співвідношення коефіцієнтів похибок параметрів параболи (m_b/m_a), яке практично може змінюватися від 0,01 до 0,03. За даними оцінюван-

ня параметрів параболи апроксимації крену в наведеному прикладі

$$m_b/m_a = 0,11 \text{ 1/м і } n \approx 2.$$

На завершення зауважимо, що описаний метод опрацювання результатів вимірювань суттєво відрізняється від поширених у практиці методів апроксимації крену без визначення його апроксимованого азимута, хоча такий параметр необхідний для характеристики ступеня стабільності на-

пряму площини апроксимації крену між окремими циклами спостережень. Метод можна використати і в ускладненому варіанті для апроксимації кренів та горизонтальних зміщень кубічною параолою і навіть поліномом. Якщо тренд горизонтальних зміщень l_j з їх азимутами α_j наближається до прямої, то сумарне горизонтальне зміщення L_j та його азимут визначаються за формулами

$$L_j = \sqrt{[l \cos \alpha]^2 + [l \sin \alpha]^2}; \alpha_{L_j} = \arctg([l \sin \alpha]/[l \cos \alpha]).$$

Перевага електронних датчиків у тому, що їх покази про кути і напрям відхилення споруди від вертикалі можна неперервно (із заданим інтервалом) відстежувати і дистанційно передавати на комп'ютер у центр служби експлуатації об'єкта, де здійснюється аналіз відхилень, їх оцінювання і навіть визначення критичного значення крену, про яке система спеціальним сигналом може сповіщати виконавця.

Крім фіксації відхилення конструкцій від вертикалі та горизонталі, для розширення рамок контролю такі датчики доцільно доповнювати пристроями для визначення змін у взаємному розташуванні окремих вузлів будівельних конструкцій, тобто для вимірювання горизонтальних та вертикальних зміщень, кручень. Це можна було б успішно реалізувати за допомогою економічних гіроскопічних датчиків як систем збереження референтного (первинного) положення горизонтальної та вертикальної площини, напрямку тощо.

Література

1. Баран, П.И. Геодезические работы при монтаже и эксплуатации оборудования [Текст] / П.И. Баран. – М.: Недра, 1990. – 233 с.
2. Баран, П.И. Датчик вертикали ДВ-1 [Текст] / П.И. Баран, В.Г. Сушко, В.Я. Чорнокін, В.О. Гречановський // Инж. геод. – 2000. – Вип. 43. – С. 25-36.
3. Боровий, В.О. Автоматизация геодезических измерений [Текст] / В.О. Боровий, Л.В. Борисюк, В.Г. Бурачек; за заг. ред. д. т. н., проф. В.О. Борового. – Чернігів: Вид-во "Чернігівські обереги", 2004. – 368 с.
4. Видуев, Н.Г. Геодезические работы при крупнопанельном строительстве [Текст] / Н.Г. Видуев, В.П. Гржибовский, В.В. Подрезан. – К.: Госстройиздат, 1963. – 195 с.
5. Чжао-Сян, Гэ. Высоочувствительный электронный уровень и его применение [Текст] / Гэ Чжао-Сян, Чжэн Гань, Чжэн Бин [и др.] // Геод. и картогр. – 1992. – № 1. – С. 51-52.

Надійшла 12.11.12