

ОСОБЛИВОСТІ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЛАНОВИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ ГЕОДИНАМІЧНИХ ПОЛІГОНІВ

Геодинамічні полігони створюють з метою моніторингових комплексних геодезичних, геофізичних і геолого-геоморфологічних досліджень сучасних ендегенних процесів, до яких входить вивчення розподілу енергії глибинних процесів, аналіз фізичних і механічних властивостей, деформацій і напружень земної кори, а також вплив антропогенної діяльності на зміну геодинамічної ситуації. Особливий інтерес в цих дослідженнях викликає вивчення сучасних рухів і деформацій земної поверхні, які несуть вагомую інформацію про перебіг геодинамічних процесів. Центральне місце в цих дослідженнях займають геодезичні методи, які є основним джерелом інформації про сучасні рухи земної поверхні. Однією з складових частин досліджень горизонтальних рухів і деформацій земної поверхні є методичні питання проектування і побудови планових геодезичних мереж.

Під час проектування цих мереж на геополігонах необхідно враховувати такі чинники: вплив поверхневих процесів на стійкість пунктів у запланованих місцях закладки; довговічність абереження пунктів; вплив фізичних умов місцевості на реалізацію геодезичних побудов; залежність геодезичних побудов від цільового призначення полігона.

Планові геодезичні мережі на техногенних геодинамічних полігонах і полігонах ГЕС охоплюють такі самі площі і мають таку саму густоту розміщення пунктів, як і інженерні мережі. Одночасно процес проектування цих мереж має більшу кількість "сту-

пенів свободи" порівняно з інженерними мережами. У мережах геополігонів вибір місцезнаходження пунктів обмежений тільки певними територіальними зонами, зумовленими фізичними і геолого-тектонічними чинниками, а в інженерних мережах місцезнаходження пунктів локалізовано геометричною конфігурацією запланованої споруди чи об'єкта.

Критерієм побудови геодезичних мереж на геополігонах є їх точнісні характеристики, від яких залежить точність визначення компонент деформацій земної поверхні. Оскільки апріорне прогнозування розвитку досліджувальних процесів є, переважно, ненадійне, то вимоги до точності визначення різних компонент деформацій повинні бути рівноцінні і якомога жорсткі. Врахування економічних чинників побудови цих мереж і оптимізація програм вимірювань не завжди є доцільним через складність вивчення агаданих процесів. Однак вони можуть мати сенс після детального аналізу інформативності вимірювань у мережі.

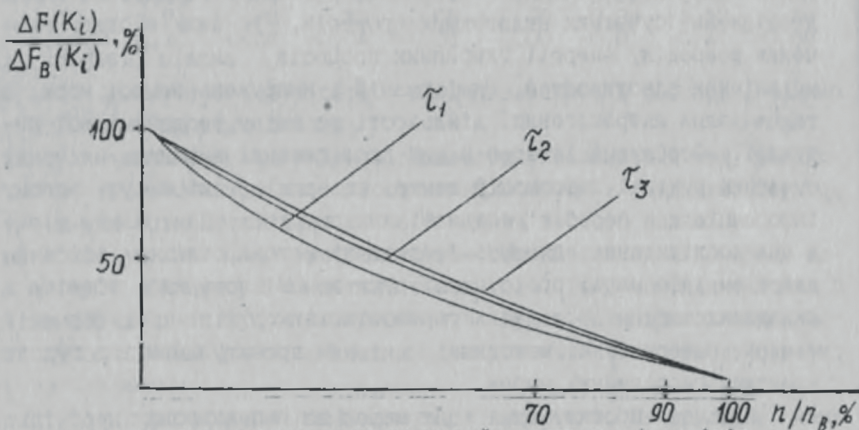


Рис.1. Залежність відносної інформативності вимірів від жорсткості мережі.

Незаперечним є той факт, що інформативність кожного виміру $\Delta F = F(K_{n+1}) - F(K_n)$ збільшується у міру виключення вимірів із сукупності всіх можливих вимірів, де $F(K_{n+1})$, $F(K_n)$ - значення точнісного функціонала до і після вилучення тестованого виміру з мережі. Ілюстрація виконаного нами аналізу інформативності вимірювань у мережах із різноманітним ступенем жорсткості τ (число Тодда кореляційної матриці відповідуючій програмі всіх можливих вимірів) демонструється на рис.1. На ньому показані

залежності між процентним співвідношенням кількості запланованих вимірювань n а кількістю всіх можливих вимірювань $n_{\text{в}}$ і процентним співвідношенням відповідної інформативності конкретного вимірювання $\Delta F(K_i)$ а його ж інформативністю в програмі необхідних вимірювань $\Delta F_{\text{max}}(K_i)$. Три криві на рис.1 відповідають різній жорсткості мереж τ_1, τ_2, τ_3 . Мережі а жорсткістю τ_3 відповідають максімальній геометричній спотвореності і рідко зустрічаються в реальній практиці. З наведених графіків видно, що для мереж а мінімальною величиною τ_1 (максимальна жорсткість) приблизно 30 % вимірювань практично не впливає на аміну величини $\Delta F(K_i)/\Delta F_{\text{max}}(K_i)$. Для мереж іа максімальною величиною τ_3 (мінімальна жорсткість) кількість таких вимірювань досягає 10 %. Ці вимірювання можна вважати практично даремними, і на стадії проектування їх аналіз і вилучення дають змогу досягти значної економії трудовитрат при несуттєвих втратах точісної інформації.

Отже, оптимальне проектування планових геодезичних мереж на геополігонах потрібно виконувати в два етапи [6]: оптимізація геометрії мереж іа схемою всіх можливих вимірювань; аналіз і виключення а програми всіх можливих вимірювань малоінформативних вимірів.

В ідеальному випадку оптимізацію геометрії мережі треба виконувати на цифровій моделі місцевості одним а градієнтних методів. При необхідності задачу можна сумістити а оптимізацією висот знаків. Однак іа досвіду проектування геодезичних мереж на геополігонах [4,5] насамперед найбільш аручно використовувати евристичний проект, а аа тим у межах заданих асн, виділених тектонічними і геолого-геоморфологічними міркуваннями, а також умовами проектного середовища, виконати оптимізацію геометрії мережі. Цільова функція оптимізації буде утворена а апріорних точісних параметрів визначення компонент деформацій. Компоненти деформацій визначають для кожного елементарного трикутника, утвореного а трьох сусідніх пунктів, і відносяться до його центра притягання. Отже, вся територія, охоплена плановою мережею, розбивається на отиковані трикутники, які складають цілісну мозаїчну картину розподілу компонент деформацій. До основних компонент деформацій належать [3] відносні асузи γ_x, γ_y во відповідних координатних осях, загальний асуз γ , дилатація Δ (відносне площадне стиснення або розтяг), відносне обертання ω , максімальний E_{max} і мінімальний E_{min} розтяг або отиск. Всі компоненти деформацій а функціями векторів аміцень і координат

пунктів відповідного трикутника. Похибки визначення компонент деформацій знаходять із співвідношення

$$m_x = f^T \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} f, \quad (1)$$

де f - вагові функції компонент деформацій; K_1 і K_2 - коваріаційні матриці вимірів двох епох (априорно, якщо непередбачена зміна схеми вимірів $K_1 - K_2$); 0 - нульова матриця.

Поставлена задача оптимізації геометрії мережі зводиться до мінімізації цільової функції, визначеної узагальненим критерієм оптимізації таким виразом:

$$m \\ \sum_{i=1}^m \ln m_i = \min, \quad (2)$$

при заданих обмеженнях на місцезнаходження пунктів. Зони обмеження місцезнаходження пунктів можуть мати складну геометричну форму, і відповідно виникає питання про їх формалізацію у вигляді обмежень. Однак будь-яку замкнуту площадну фігуру з заданим ступенем точності можна представити у вигляді системи обмежень

$$\begin{aligned} a_1x + b_1 + y &\geq 0, \\ a_2x + b_2 + y &\geq 0, \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ a_nx + b_n + y &\geq 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Кожна лінійна нерівність обмежує простір по одній зі сторін прямої, рівняння якої визначають коефіцієнти a і b . Відповідно контури довільної замкненої фігури (рис.2) можна з заданим ступенем точності замінити прямими лініями, визначеними системою обмежень (3).

У процесі проектування невиконання нерівностей (3) можна врахувати в цільовій функції (2) за допомогою штрафних функцій. Для цього введено параметр z , що дорівнює сумі від'ємних значень лівих частин нерівностей (тобто нерівностей, які не виконуються). Тоді загальна цільова функція матиме вигляд

$$R = \sum_{i=1}^m \ln m_i + d \cdot z, \quad (4)$$

де d - постійний коефіцієнт, необхідний для співвимірності до-

данків виразу (4). При невдалому виборі d процес оптимізації може бути нескінченним.

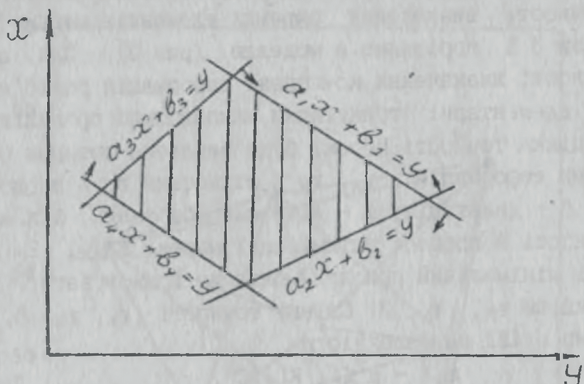


Рис.2. Довільна зона замкнута прямими лініями, визначеними системою обмежень (3).

Мінімізацію (4) можна виконати за допомогою будь-якого градієнтного методу. Для цього знаходимо вектор часткових похідних, або градієнтів цільової функції по координатах визначальних пунктів ($\partial R/\partial x_1, \partial R/\partial x_2, \dots, \partial R/\partial x_n, \partial R/\partial y_1, \partial R/\partial y_2, \dots, \partial R/\partial y_n$), який визначає напрям найшвидшого спуску, за яким знаходимо мінімум. Ітераційна процедура алгоритму дає змогу знайти мінімум функції (4) і відповідно оптимальні координати визначальних пунктів.

Наступний етап оптимізації мережі полягає в дослідженні інформативності кожного окремого виміру [7]. Малоінформативні виміри зі сукупності всіх можливих вимірів виділяють на основі аналізу інформативності вимірів з урахуванням цільового призначення геополігона, критеріїв надійності мереж і кваліфікації виконавців.

Останній етап оптимізації мереж геодинамічних полігонів проілюструємо на конкретному прикладі проектування вимірів еталонної геодезичної мережі Карпатського геодинамічного полігона. Еталонна геодезична мережа була створена з метою вивчення впливу атмосферної рефракції на геодезичні виміри, а також для дослідження рухів земної кори в зоні Закарпатського глибинного розлому [1]. Схема вимірюваних ліній в еталонній мережі зображена на рис.3. З метою зниження собівартості повторного циклу вимірів вирішено оптимізувати схему вимірів. Задача зводиться

до анаходження моделі з мінімальною кількістю вимірів за умови, що втрати точності в мережі будуть несуттєвими. Приймаємо, що втрати точності визначення окремих елементів мережі не мають перевищувати 5 % порівняно з моделлю (рис.3). Для апріорної оцінки точності визначення компонент деформацій розіб'ємо площу мережі на елементарні трикутники максимально правильної форми (рис.4). Оцінка точності мережі буде виражена чотирма основними компонентами деформацій: γ_x, γ_y - відносний зсув по координатних осях; Δ - дилатація; ω - відносне обертання. Для апріорної оцінки точності в процесі оптимізації мережі E_{\max}, E_{\min} - максимальний і мінімальний розтяги можна не враховувати, оскільки вони є функцією $\gamma_x, \gamma_y, \Delta$. Оцінку точності $\gamma_x, \gamma_y, \Delta$ виконуємо згідно з [2] за залежністю

$$m_i^2 = \mu^2 [f_i^T K f_i] C^2, \quad (5)$$

де μ - похибка одиниці ваги вимірів; f_i - вагові функції відповідних компонент деформацій; K - кореляційна матриця вимірів, $C = [(x_j - x_i)(y_k - y_i) - (x_k - x_i)(y_j - y_i)]^{-1}$; $x_i, x_j, x_k, y_i, y_j, y_k$ - координати пунктів елементарного трикутника. Вагові функції компонент деформацій мають такий вигляд:

$$f_{\gamma_x} = \begin{pmatrix} y_j - y_k \\ x_j - x_k \\ y_k - y_i \\ x_k - x_i \\ y_i - y_j \\ x_i - x_j \end{pmatrix}, \quad f_{\gamma_y} = \begin{pmatrix} y_k - y_j \\ y_j - y_k \\ x_i - x_k \\ y_k - y_i \\ x_j - x_i \\ y_i - y_j \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$f_{\Delta} = \begin{pmatrix} y_j - y_k \\ x_k - x_j \\ y_k - y_i \\ x_i - x_k \\ y_i - y_j \\ x_j - x_i \end{pmatrix}, \quad f_{\omega} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} x_k - x_j \\ y_k - y_j \\ x_i - x_k \\ y_i - y_k \\ x_k - x_i \\ y_k - y_i \end{pmatrix}.$$

Оскільки територія мережі розбита на шість елементарних трикутників, і для кожного трикутника виконується оцінка точності чотирьох компонент деформацій, то цільова функція узагальненого критерію оптимізації (2) буде вміщати 24 доданки. Для визначення інформативності кожного виміру необхідно виконати розрахунок точності моделі (рис.2), а також розрахунок точності мережі відповідно вилученими вимірами. Інформативність кожного виміру оцінимо за залежністю

$$\Delta F_j = \sum_{i=1}^m \ln(m_{i,j} - m_{i,0}), \quad (7)$$

$\Delta \sigma_{10}, \Delta \sigma_{12}$ - точнісні параметри компонент деформацій до і після виділення тестованого виміру.

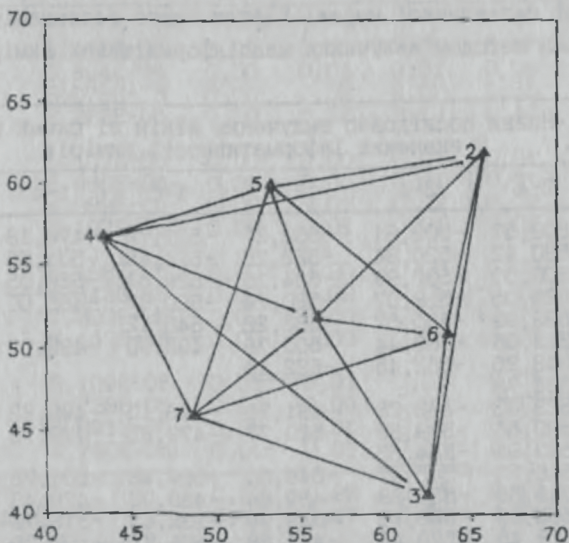


Рис.3. Схема етандонної геодезичної мережі Карпатського геодинамічного полігона.

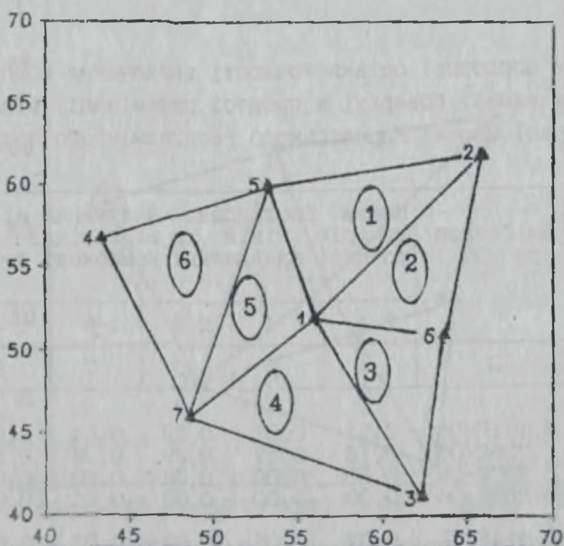


Рис.4. Схема елементарних трикутників для визначення компонент деформацій земної поверхні території геополігона.

Таблиця 1

Значення інформативності вимірів у процесі оптимізації еталонної геодезичної мережі Карпатського геодинамічного полігона методом видлучення малоінформативних вимірів

N	Назва ліній	Назви послідовно видлучених ліній зі схеми рис.3 і значення інформативності вимірів					
		2-4	3-4	2-3	1-6	1-4	5-6
1	1-2	-503,57	-502,81	-502,27	-501,75	-474,18	-503,24
2	1-3	-530,42	-526,84	-522,26	-524,45	-501,65	-510,64
3	1-4	-530,60	-532,99	-534,11	-529,61	-526,05	
4	1-5	-520,05	-518,97	-520,74	-520,07	-485,00	-468,96
5	1-6	-533,99	-531,57	-532,22	-543,12		
6	1-7	-512,08	-508,44	-500,78	-498,90	-495,03	-486,97
7	2-3	-548,26	-552,45	-522,16			
8	2-4	-565,78					
9	2-5	-523,43	-492,28	-491,79	-493,10	-492,83	-492,99
10	2-6	-530,56	-529,85	-529,77	-479,95	-479,76	-470,23
11	3-4	-553,95	-554,55				
12	3-6	-546,52	-545,57	-546,50	-524,48	-501,75	-509,47
13	3-7	-528,50	-531,88	-489,84	-486,92	-478,43	-481,10
14	4-5	-533,28	-523,73	-529,99	-532,45	-513,70	-413,80
15	4-7	-528,48	-523,43	-494,58	-501,72	-495,96	-371,37
16	5-6	-541,31	-541,94	-541,83	-541,03	-517,46	-522,05
17	5-7	-507,66	-509,53	-512,84	-511,74	-499,31	-474,31
18	6-7	-512,45	-510,68	-509,63	-506,74	-502,71	-507,61

Таблиця 2

Результати апріорної оцінки точності визначення компонент деформацій земної поверхні в процесі оптимізації еталонної геодезичної мережі Карпатського геодинамічного полігона

N трикутників деформаций	Компоненти деформаций	За схемою рис.3	Назва послідовно видлучених зі схеми вимірів ліній та відповідні втрати точності визначення компонент деформацій, %					
			2-4	3-4	2-3	1-6	1-4	5-6
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	γ _x	6.111E-06	0,01	0,01	0,03	0,04	0,09	0,12
	γ _y	1.726E-06	0,16	0,17	0,29	0,38	0,38	0,40
	Δ	6.597E-06	0,00	0,00	0,02	0,03	0,04	0,05
	ω	6.263E-06	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03
2	γ _x	6.114E-06	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
	γ _y	1.296E-06	0,13	0,13	0,33	1,65	2,02	4,90
	Δ	4.915E-06	0,01	0,01	0,02	0,10	0,10	0,39
	ω	4.931E-06	0,00	0,00	0,02	0,02	0,09	0,17

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	γ_x	6.113E-06	0,00	0,01	0,01	0,07	0,07	0,37
	γ_y	6.894E-06	0,00	0,01	0,01	0,08	0,09	0,32
	Δ	5.078E-06	0,00	0,02	0,02	0,03	0,03	0,10
	ω	2.222E-06	0,00	0,02	0,13	0,40	0,63	1,03
4	γ_x	6.107E-06	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,03
	γ_y	5.966E-06	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
	Δ	4.399E-06	0,00	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04
	ω	4.197E-06	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,06
5	γ_x	6.108E-06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
	γ_y	1.843E-06	0,00	0,00	0,01	0,15	0,26	0,26
	Δ	7.303E-06	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03
	ω	6.153E-06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,07
6	γ_x	6.103E-06	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
	γ_y	1.738E-06	0,04	0,09	0,09	0,10	0,22	0,22
	Δ	6.891E-06	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
	ω	4.780E-06	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,07
середнє			0,02	0,02	0,05	0,13	0,18	0,37
максимальне			0,16	0,17	0,33	1,65	2,02	4,90

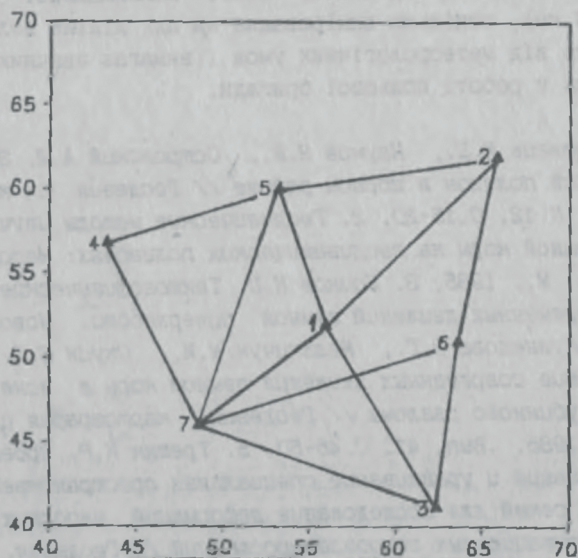


Рис.5. Оптимальна схема лінійних вимірів
еталонної геодезичної мережі.

Виміри в еталонній мережі планується виконувати методом трилатерації за допомогою світловіддалеміра СТ-3. Відповідно для розрахунків необхідно враховувати точність вимірювання ліній цим далекоміром $m_z = 4 \text{ мм} + 1 \text{ мм/км}$. Результати обчислень інформативності вимірів у процесі оптимізації мережі наведені в табл.1. Підкреслені значення відповідають лініям з мінімальною інформативністю. Ці лінії підлягають вилученню. У табл.2 подані результати апіорної оцінки точності компонент деформацій у процесі оптимізації мережі. У процентах виражено втрати точності визначення всіх компонент після вилучення з моделі (рис.3) відповідних ліній. Тут також наведені усереднені і максимальні значення втрат точності визначення компонент. Внаслідок оптимізації, в мережі можна вилучити шість ліній 2-4, 3-4, 2-3, 1-6, 1-4, 5-6, при цьому максимальні втрати точності у визначенні окремих компонент не перевищать 4,9 %, а в середньому в мережі втрата точності буде в межах 0,4 %. Вилучення наступних ліній призводить до втрат точності понад 10 %. Оптимальна модель еталонної мережі зображена на рис.5. Процес оптимізації мережі дав можливість досягти 30 % економії у вимірах ліній. Особливо важливо, що вилученню підлягають лінії максимальної довжини (близько 20 км), оскільки вимірювання на цих лініях великою мірою залежить від метеорологічних умов і вимагає значних додаткових зусиль у роботі польової бригади.

1. Вировець Ю.Б., Наумов Я.В., Островский А.Л. Эталонный геодезический полигон в горном районе // Геодезия и картография. 1971. N 12. С.15-20. 2. Геодезические методы изучения деформаций земной коры на геодинамических полигонах: Методическое руководство. М., 1985. 3. Есиков Н.П. Тектонофизические аспекты анализа современных движений земной поверхности. Новосибирск, 1979. 4. Куанецова В.Г., Медьничук М.И., Скуин Б.Л., Третьяк К.Р. Изучение современных движений земной коры в зоне Закарпатского глубинного разлома // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1985. Вып. 41. С.46-50. 5. Третьяк К.Р. Проектирование, оптимизация и уравнивание специальных пространственных геодезических сетей для исследования деформаций напорных трубопроводов деривационных гидроэлектростанций // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. 1992. Вып.53. С.67-80. 6. Третьяк К.Р., Ходоров С.Н. О проектировании оптимальных плановых геодезических сетей на геодинамических полигонах // Тез. докл. симпозиума

КАПГ по изучению современных движений земной коры. Воронеж, 1988 г. С.240-241. 7. Третьяк К.Р., Ходоров С.Н. Критерии оптимизации информативности геодезических измерений на геодинамических полигонах // Тез. докл. международного симпозиума "Геодезия - Сейсмология: деформация и прогноз". Ереван, 1989 г. М., 1989. С.179-181.