

П. В. ПАВЛИВ, Т. В. РАДЬО

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ НИВЕЛИРНЫХ ЗНАКОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

При изучении движений земной коры устойчивость нивелирных знаков приобретает важное значение, ибо нарушение ее под действием различных экзогенных, техногенных и других процессов вносит погрешности в величины скоростей, которые определяются по результатам повторного нивелирования высокой точности.

Анализ материалов нивелирования I и II классов, используемых при изучении вертикальных движений земной коры, на территории западной половины Европейской части СССР [6] показал, что нивелирные знаки заложены, как правило (98,2%), в типах инженерных сооружений, указанных в табл. 1. Изучение вертикальных движений земной коры геодезическим методом ведется преимущественно (табл. 1) вдоль активных железных дорог.

Из анализа работ [4] и др., в которых исследуются деформации грунтов, вызванные собственным весом земляных полотен и поездной нагрузкой, а также вибрацией от движения железнодорожного транспорта, следует, что инженерные сооружения, расположенные вдоль железных дорог могут иметь как осадочные явления, так и явления пучения, то есть погрешности в высотах таких нивелирных знаков могут быть с плюсом и минусом, при этом они беспрерывно накапливаются с течением времени, что способствует возникновению составляющих скоростей, которые имеют нетектонический характер.

Из работ [3, 5, 6] видно, что применяемые в настоящее время методы исследования устойчивости нивелирных знаков не могут дать достаточно полного ответа на вопросы: каких величин достигают составляющие скоростей вертикальных движений земной коры, возникающие вследствие действия факторов нетектонического характера; отображают ли средние значения скоростей V_s' вертикальные тектонические движения земной коры; какие инженерные сооружения имеют минимальные и максимальные вертикальные перемещения?

Исследования устойчивости нивелирных знаков в работе [3], как и в других работах, выполняли по превышениям.

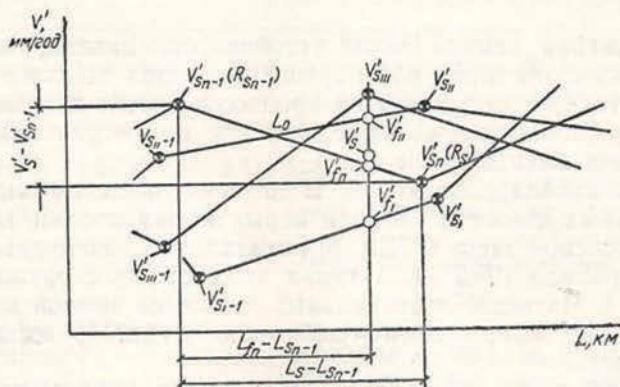
Учитывая, что в настоящее время определены уравненные значения скоростей вертикальных движений земной коры для многочисленных нивелирных знаков, с целью решения поставленной задачи целесообразнее использовать указанные скорости, обработав их методами математической статистики. Статистическая обработка используется прежде всего с целью получения общих характеристик результатов, позволяющих выявить качественные особенности устойчивости исследуемых инженерных сооружений с высотными знаками и дать общую оценку точности скоростей, определяемых по результатам повторного нивелирования.

Итак, по каждой исследуемой линии нивелирования выбираем уравненные значения скоростей для соответствующих типов инженер-

ных сооружений с высотными знаками, расположенными на фиксированных расстояниях от начала этих линий. В результате получаем ряды уравненных значений скоростей (по каждой линии нивелирования) для исследуемых типов инженерных сооружений.

Для каждой точки с уравненными значениями скоростей (соответствующих типов инженерных сооружений) вычисляем промежуточные скорости V'_{f_n} остальных типов инженерных сооружений. Из рисунка видно, что для любой точки с известной скоростью V'_{s_n} промежуточные скорости V'_{f_n} вычисляются по формуле

$$V'_{f_n} = V'_{s_n} + (V'_{s_n} - V'_{s_{n-1}}) \frac{L_{f_n} - L_{s_{n-1}}}{L_{s_n} - L_{s_{n-1}}}, \quad (1)$$



Из формулы (1) следует, что вычисления промежуточных скоростей могут производиться с точностью $m_{V'_{f_n}} = \pm 0,06$ мм/год, а средних скоростей — $m_{\bar{V}'_s} = \pm 0,03$ мм/год, так как скорости V'_{s_n} и расстояния L_{s_n} соответственно даны до $\pm 0,1$ мм/год и $\pm 0,1$ км, а максимальная величина V'_{s_n} не превышает ± 10 мм/год, при средних расстояниях между смежными реперами $L_0 = 5-10$ км.

Систематизировав известные скорости V'_{s_n} со средними значениями \bar{V}'_s , определяем их флуктуации δ , то есть

$$\delta_{s_n} = V'_{s_n} - \bar{V}'_{s_n}. \quad (3)$$

В геодезической практике все результаты измерений, полученные с погрешностью большей (по абсолютной величине) $3\Delta t$, бракуются [1].

Применяя это условие для конкретного случая, то есть флюктуации δ (по абсолютной величине) должны удовлетворять условию

$$|\delta_{s_n}| < 3\Delta V_n, \quad (4)$$

где $\Delta V'_n$ — эмпирические дисперсии, определяемые по формуле (6).

В инженерных сооружениях с высотными знаками имеют место осадочные явления $-\delta$ и явления пучения $+\delta$. Количество инженерных сооружений с $+\delta$ и $-\delta$ будет отображать общий характер влияния факторов нетектонического характера на устойчивость исследуемых нивелирных знаков.

Вычисляя девиаты [1]

$$Q_n = \sum_1^{s_n} \delta_{s_n}^2, \quad (5)$$

получаем рассеивание под влиянием факторов нетектонического характера для каждого типа исследуемых инженерных сооружений с высотными знаками.

Тогда эмпирические дисперсии, определяемые [1] по формуле

$$\Delta V'_n = \frac{Q_n}{s_n - 1}, \quad (6)$$

будут характеризовать составляющие скоростей вертикальных движений земной коры $\Delta V'_n$, которые возникают вследствие действия факторов нетектонического характера.

Величины $\Delta V'_n$ объединяют в себе как случайные $\Delta V'_{\eta_n}$, так и систематические $\Delta V'_{\sigma_n}$ составляющие скоростей.

Систематические составляющие [1] имеют вид

$$\Delta V'_{\sigma_n} = \frac{[\delta_{s_n}]}{S_n}. \quad (7)$$

Знаки (плюс и минус) характеризуют направление преобладающих вертикальных перемещений инженерных сооружений соответствующих типов.

Для определения случайных составляющих скоростей $\Delta V'_{\eta_n}$ необходимо из флюктуаций δ_{s_n} исключить систематические составляющие скоростей $\Delta V'_{\sigma_n}$, то есть

$$\delta'_{s_n} = \delta_{s_n} - \Delta V'_{\sigma_n}. \quad (8)$$

Вычисляя нормальные девиаты [1] по формуле

$$Q'_n = \sum_1^{s_n} \delta'^2_{s_n}, \quad (9)$$

получаем рассеивание под действием факторов нетектонического характера для каждого типа инженерных сооружений, в котором исключено влияние систематических погрешностей.

Случайные составляющие скоростей [1]

$$\Delta V_{\eta_n}^{*2} = \frac{Q'_n}{S_n - 1}. \quad (10)$$

Тогда можно определить степень преобладания случайных составляющих скоростей над систематическими

$$P_n = \frac{\Delta V_{\eta_n}^{*2}}{\Delta V_{\sigma_n}^{*2}}. \quad (11)$$

Среднее значение составляющих скоростей $\Delta V'$ на всей исследуемой территории

$$\Delta V'^2 = \frac{\Delta V_1^{*2} \cdot S_1 + \dots + \Delta V_n^{*2} \cdot S_n}{S_1 + \dots + S_n}. \quad (12)$$

Критерием влияния факторов нетектонического характера на скорости вертикальных движений земной коры может служить оценка или статистика F_n , которую будем вычислять так:

$$F_n = \frac{\Delta V_n^{*2}}{\Delta V'^2}. \quad (13)$$

В связи с тем, что погрешности нивелирования также входят в составляющие скоростей вертикальных движений земной коры, возникает необходимость в их определении. Проанализировав формулу, по которой вычисляются скорости вертикальных движений земной коры [6], получаем

$$m_{V'} = \frac{1}{t} \sqrt{m_{h_1}^2 + m_{h_k}^2}, \quad (14)$$

где t — интервал времени между датами повторных измерений; m_{h_1} , m_{h_k} , $m_{V'}$ — средние квадратические погрешности превышений и скорости.

Тогда при $m_{h_1} = m_{h_k} = m_h$ и среднем расстоянии между смежными реперами $R_{s_{n-1}}$ и R_{s_n} , L_0 (см. рисунок) существующую составляющую скоростей ΔV_r^0 в одной точке данной группы линий нивелирования будем определять таким образом:

$$\Delta V_r^0 = \frac{m_h}{t} \sqrt{2L_0}, \quad (15)$$

где

$$m_h^2 = \frac{M^2 + \dots + k M^2}{h}, \quad (16)$$

k — количество линий, объединенных в группу.

Следовательно, составляющие скоростей вертикальных движений земной коры, возникающие в результате вертикальных перемещений исследуемых инженерных сооружений с высотными знаками ΔV_n^* будут определяться так:

$$-\Delta V_n^* = \sqrt{\Delta V'^2 - \Delta V_r^{02}}. \quad (17)$$

Точность полученных значений ΔV_n^* можно вычислить, определяя их стандарты σ_n для 5%-ной доверительной вероятности, обычно принимаемой для научных исследований, согласно условиям [1]

$$z_{1n} \cdot \Delta V_n^* < \sigma_n < z_{2n} \cdot \Delta V_n^*, \quad (18)$$

где z_{1n} , z_{2n} — коэффициенты, которые выбирают из табл. 36, приведенной в работе [1].

Разработанная методика исследования устойчивости нивелирных знаков позволяет:

1) исключать грубые ошибки в значениях скоростей вертикальных движений земной коры, возникающие вследствие действия факторов нетектонического характера, условие (4);

2) вычислять величины составляющих скоростей вертикальных движений земной коры, возникающие вследствие действия факторов нетектонического характера в целом (6), погрешностей нивелирования (15) и подвижек реперов (17);

3) выявлять характер (случайные и систематические составляющие) вертикальных перемещений инженерных сооружений с высотными знаками отдельно для каждого типа, уравнения (7) и (10);

4) определять степень преобладания случайных погрешностей над систематическими, формула (11);

5) выявлять инженерные сооружения с минимальными и максимальными перемещениями, формула (13);

6) экономить средства и время, ибо эта методика сводит к минимуму инженерно-геологическое обследование нивелирных знаков и позволяет использовать ЭВМ.

По разработанной методике проведены экспериментальные исследования устойчивости нивелирных знаков с использованием ЭВМ «Минск-22», которые расположены в равнинных районах западной половины Европейской части СССР [6].

При обработке использовали 12 496,7 км нивелирных линий, 702 знаков. При этом исследовали восемь типов инженерных сооружений с высотными знаками (см. табл. 1).

В результате исследований на допустимость отклонений скоростей (согласно условию 4) из обработки исключено 11 нивелирных знаков.

Составляющие скоростей вертикальных движений земной коры (случайные и систематические) для всех исследуемых инженерных сооружений с высотными знаками (см. табл. 1) вызваны: а) факторами нетектонического характера ($\pm 0,27$ мм/год $<\Delta V'_n<\pm 0,81$ мм/год); б) погрешностями нивелирования ($\Delta V^0_r = \pm 0,26$ мм/год); в) подвижками реперов ($\pm 0,10$ мм/год $<\Delta V^*_n<\pm 0,75$ мм/год).

Средняя из составляющих на всей исследуемой территории (см. табл. 1) вызвана факторами нетектонического характера ($\Delta V \pm 0,49$ мм/год) и подвижками реперов ($\Delta V^* = \pm 0,42$ мм/год).

Средняя скорость подвижек реперов на той же территории, полученная в работе [3], равна $\pm 0,46$ мм/год.

Степень влияния факторов нетектонического характера на скорости вертикальных движений земной коры исследуемых типов инженерных сооружений с высотными знаками лежат в пределах $0,320 < F_n < 1,978$.

Для выявления существующих погрешностей в скоростях вертикальных движений земной коры, вызванных факторами нетектонического характера и подвижками реперов, вычислены величины ΔV_n , ΔV_n^* , $\Delta V'$, $\Delta V'_{n_n}$, P_n , F_n как до, так и после отбраковки нивелирных знаков.

По формуле (15) определены оптимальные промежутки времени между датами повторных измерений, при которых составляющие скоростей, возникающие вследствие влияния погрешностей нивелирования, не превышают $\pm 0,5 - \pm 1,5$ мм/год при $L_0 = 5$ км. Расчеты сведены в табл. 2.

Таблица 1
Результаты экспериментальных исследований устойчивости нивелирных знаков на территории западной половины Европейской части СССР

Название характеристики	Железнодорожные вокзалы		Железнодорожные казармы		Железнодорожные бульвары		Водоемные здания		Жилые дома		Репера с ломаной калькой осью		Устои железнодорожных мостов		Водопроводные трубы	
	$\Delta V_{n,c_p}^0$, мм/год	$\Delta V_{n,\sigma\tau\theta}^0$	$\Delta V_{c_p}^0$	$\Delta V_{\sigma\tau\theta}^0$	$\Delta V_{\sigma_{c_p}}^0$	$\Delta V_{\eta_{c_p}}^0$	$\Delta V_{\eta_{\sigma\tau\theta}}^0$	$\Delta P_{c_p}^0$	$\Delta P_{\sigma\tau\theta}^0$	F_{c_p}	$F_{\sigma\tau\theta}$	$\Delta V_{c_p}^*$, мм/год	$\Delta V_{\sigma\tau\theta}^*$	s_n		
$\Delta V_{n,c_p}^0$, мм/год	$\pm 0,44$	$\pm 0,56$	$\pm 0,50$	$\pm 0,45$	$\pm 0,49$	$\pm 0,44$	$+0,011$	$+0,056$	$+0,050$	$\pm 0,27$	$\pm 0,50$	$\pm 0,40$	$\pm 0,57$	$\pm 0,44$	$\pm 0,52$	$\pm 0,81$
$\Delta V_{n,\sigma\tau\theta}^0$	$\pm 0,38$	$\pm 0,50$	$\pm 0,45$	$\pm 0,49$	$\pm 0,44$	$+0,012$	$+0,028$	$+0,036$	$+0,082$	$\pm 0,25$	$\pm 0,50$	$\pm 0,40$	$\pm 0,44$	$\pm 0,44$	$\pm 0,52$	$\pm 0,52$
$\Delta V_{c_p}^0$				$-0,009$	$+0,004$	$+0,044$	$\pm 0,56$	$\pm 0,49$	$\pm 0,49$	$\pm 0,25$	$\pm 0,49$	$+0,081$	$+0,021$	$+0,025$	$-0,180$	$-0,180$
$\Delta V_{\sigma\tau\theta}^0$				$+0,004$	$+0,012$	$\pm 0,56$	$\pm 0,49$	$\pm 0,49$	$\pm 0,49$	$\pm 0,35$	$\pm 0,35$	$+0,021$	$-0,039$	$-0,039$	$-0,022$	$-0,022$
$\Delta V_{\sigma_{c_p}}^0$				$-0,009$	$+0,011$	$+0,056$	$+0,056$	$+0,056$	$+0,082$	$\pm 0,44$	$\pm 0,44$	$+0,020$	$-0,025$	$-0,025$	$-0,180$	$-0,180$
$\Delta V_{\eta_{c_p}}^0$				$+0,004$	$+0,012$	$+0,028$	$+0,028$	$+0,036$	$+0,082$	$\pm 0,44$	$\pm 0,44$	$+0,020$	$-0,025$	$-0,025$	$-0,180$	$-0,180$
$\Delta V_{\eta_{\sigma\tau\theta}}^0$				$+0,044$	$\pm 0,56$	$\pm 0,49$	$\pm 0,49$	$\pm 0,49$	$\pm 0,49$	$\pm 0,35$	$\pm 0,35$	$\pm 0,44$	$\pm 0,44$	$\pm 0,44$	$\pm 0,52$	$\pm 0,52$
$\Delta P_{c_p}^0$	$10373,3$	$5486,9$	$41,6$	$66,7$	$103,1$	$103,1$	$103,1$	$103,1$	$103,1$	$3,3$	$3,3$	$3,3$	$381664,0$	$19,2$		
$\Delta P_{\sigma\tau\theta}^0$	$457,8$	$1333,2$	$29,3$	$68,3$	$103,1$	$103,1$	$103,1$	$103,1$	$103,1$	$3,3$	$3,3$	$3,3$	$1175,1$	$558,1$		
F_{c_p}	$0,750$	$1,208$	$1,006$	$0,320$	$1,002$	$0,615$	$0,615$	$0,615$	$0,615$	$1,411$	$1,411$	$1,411$		$1,979$		
$F_{\sigma\tau\theta}$	$0,873$	$1,170$	$1,038$	$0,363$	$1,363$	$0,762$	$0,762$	$0,762$	$0,762$	$1,002$	$1,002$	$1,002$		$1,174$		
$\Delta V_{c_p}^*$, мм/год	$\pm 0,36 \pm 0,02$	$\pm 0,49 \pm 0,03$	$\pm 0,40 \pm 0,02$	$\pm 0,12 \pm 0,03$	$\pm 0,46 \pm 0,13$	$\pm 0,32 \pm 0,12$	$\pm 0,46 \pm 0,13$	$\pm 0,46 \pm 0,13$	$\pm 0,46 \pm 0,13$	$\pm 0,49 \pm 0,08$	$\pm 0,49 \pm 0,08$	$\pm 0,49 \pm 0,08$		$\pm 0,75 \pm 0,18$		
$\Delta V_{\sigma\tau\theta}^*$	$\pm 0,33 \pm 0,02$	$\pm 0,42 \pm 0,02$	$\pm 0,37 \pm 0,02$	$\pm 0,10 \pm 0,02$	$\pm 0,46 \pm 0,13$	$\pm 0,32 \pm 0,12$	$\pm 0,46 \pm 0,13$	$\pm 0,46 \pm 0,13$	$\pm 0,46 \pm 0,13$	$\pm 0,37 \pm 0,06$	$\pm 0,37 \pm 0,06$	$\pm 0,42 \pm 0,10$		$\pm 0,42 \pm 0,10$		
s_n		177	146	155	54	35	26	26	26	88	88	88			21	

Результаты исследований, приведенные в табл. 1 и 2, показывают, что все исследуемые нивелирные знаки подвержены вертикальным перемещениям: знаки, заложенные в разных типах инженерных сооружений, имеют различные скорости вертикальных перемещений; знаки, заложенные в инженерные сооружения, которые расположены вблизи железных дорог, имеют максимальные вертикальные перемещения; максимальные перемещения имеют водопропускные трубы, а минимальные — водоемные здания; погрешности нивелирования практически неощущимы в случае, если повторные измерения (для соответствующих классов нивелирования) будут производиться через интервалы времени, рассчитанные в табл. 2.

Таблица 2

Оптимальные промежутки времени между датами повторных нивелировок $L_0 = 5$ км

Классы нивелирования	Допустимые погрешности на 1 км хода, мм	t_1 , год (при $\Delta V_g^* = \pm 0,5$ мм/год)	t_2 , год (при $\Delta V_g^* = \pm 1$ мм/год)	t_3 , год (при $\Delta V_g^* = \pm 1,5$ мм/год)
I—I	$\pm 3 \pm 3$	>19	>8	>6
I—II	$\pm 3 \pm 5$	>26	>13	>8
I—III	$\pm 3 \pm 10$	>47	>24	>16
II—II	$\pm 5 \pm 5$	>31	>16	>10
II—III	$\pm 5 \pm 10$	>50	>25	>17
III—III	$\pm 10 \pm 10$	>64	>32	>21

Из сравнения среднего значения составляющих скоростей ($\Delta V^* = \pm 0,42$ мм/год), полученного в результате экспериментальных исследований (по описанной методике), со средними значениями скоростей подвижек реперов ($\Delta V^* = \pm 0,46$ мм/год) [3] и ($\Delta V^* = \pm 0,44$ мм/год) [5] для одной и той же территории следует, что среднее значение скоростей V_s в точках, которые определены по разным типам инженерных сооружений, достаточно объективно отображают вертикальные тектонические движения земной коры. Их целесообразно использовать при построении тектонических карт.

Что касается достоверности полученных скоростей на данной территории, то видно (см. табл. 1), что они содержат погрешности нетектонического характера, которые в среднем равны $\pm 0,3 \pm 0,8$ мм/год.

Для закладки нивелирных знаков целесообразно использовать инженерные сооружения и места, удаленные от оси железнодорожного пути, что значительно повысит стабильность отметок реперов и марок.

Так как на ближайшее десятилетие запланировано проложить 25 тыс. км ходов повторного нивелирования I класса и не меньше II класса [2], то исследование устойчивости нивелирных знаков по указанной методике позволит получить значительный экономический эффект.

ЛИТЕРАТУРА

1. Видуев Н. Г., Кондра Г. С. Дисперсионный анализ в теории и практике геодезических измерений. М., «Недра», 1968.
2. Кашир Л. А. О программе высокоточного нивелирования и его научно-техническом значении. — «Геодезия и картография», 1968, № 10.
3. Крюков Ю. А. Устойчивость реперов государственной высотной сети. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1972, № 5.
4. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь. М., Трансжелдориздат, 1961.
5. Шабаров С. Н. Об устойчивости реперов и марок ленинградской нивелирной сети. — «Геодезия и картография», 1971, № 2.
6. Современные вертикальные движения земной коры западной половины Европейской части СССР. — «Тр. ЦНИИГАиК», 1958, вып. 123.

Работа поступила в редакцию 29 мая 1973 года. Рекомендована кафедрой инженерной геодезии и лесной тахсации Львовского лесотехнического института.