УДК 528.28+551.46

І. С. СІДОРОВ[1], С. С. ПЕРІЙ[2*], В. Г. САРНАВСЬКИЙ[3]

[1, 2*]Кафедра геодезії, Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, ел. пошта periy_ss@ukr.net
[3]ВАТ "Дністровська ГАЕС", Новодністровськ, ел. пошта bms1vtv@ukr.net

ВИЗНАЧЕННЯ РУХІВ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ В РАЙОНІ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГАЕС СУПУТНИКОВИМИ ТА НАЗЕМНИМИ ГЕОДЕЗИЧНИМИ МЕТОДАМИ

Мета. Метою цього дослідження є визначення горизонтальних рухів земної поверхні в районі розташування основних гідротехнічних споруд Дністровської ГАЕС та прилеглої території, яка перебуває під впливом техногенного навантаження від циклічного режиму роботи ГАЕС, із застосуванням технологій супутникового моніторингу глобальними навігаційними супутниковими системами (ГНСС). За даними сумісних супутникових та лінійно-кутових вимірювань оцінити точність горизонтальних зміщень водоприймача ГАЕС на пунктах з обмеженим прийомом супутникового сигналу. На підставі трьохрічних циклів виконання тригонометричного нівелювання дослідити можливість заміни геометричного нівелювання II класу тригонометричним у місцевості з великими перепадами висот. **Методика.** Для визначення координат пунктів розроблена методика виконання вимірювань ГНСС, яка дає змогу забезпечити точність планових координат із середньою квадратичною похибкою ±2 мм для пунктів з примусовим центруванням антен приймачів. Застосована методика виконання прецизійних лінійно-кутових вимірювань з урахуванням атмосферної рефракції. **Результати**. Результатами цього дослідження є отримані вектори горизонтальних зміщень пунктів опорної геодезичної мережі Дністровської ГАЕС супутниковим методом. Визначені горизонтальні зміщення пунктів водовипуску двома незалежними методами та виконано їх порівняння. За даними лінійно-кутових вимірювань отримані перевищення між пунктами опорної мережі та пунктами водоприймача та їхньої зміни за період 2012–2014 рр. Точність отриманих перевищень методом тригонометричного нівелювання не перевищує допуски геометричного нівелювання II класу. **Наукова новизна**. За даними високоточних ГНСС-вимірювань виявлено рухи земної поверхні району, що зазнає техногенного навантаження від роботи Дністровської ГАЕС. Отримані зміщення водовипуску за результатами супутникових та наземних геодезичних вимірювань практично збігаються, що підтверджується даними трирічного періоду спостережень. **Практична значущість**. Використання розроблених методик спостережень за горизонтальними рухами земної поверхні в районах, які зазнають впливу техногенного навантаження, сприятиме підвищенню надійності та ефективній роботі гідроенергетичних об'єктів. Розроблена методика прецизійного тригонометричного нівелювання значно зменшує час на виконання робіт і забезпечує точність геометричного нівелювання II класу.

Ключові слова: горизонтальні зміщення; ГНСС; гідротехнічні споруди; тригонометричне нівелювання.

Вступ

Великі гідроенергетичні об'єкти, як правило, перебувають у зоні впливу аномальних структурно-тектонічних зон. На стадії завершення їх будівництва під час заповнення водоймищ відбувається зміна гідродинамічного навантаження на масиви порід. Так, під час заповнення водоймища на ділянці греблі Койона (Індія) в 1967 р. відбувся наведений землетрус у регіоні, який не належав до сейсмічно активних [Gupta H., 1976]. Магнітуда землетрусу досягала 6,5 балів. Встановлено кореляційний зв'язок між зміною рівня води та проявами сейсмічності [Kumar J., 2012]. Спорудження Асуанської греблі (Єгипет) і впровадження в експлуатацію штучного водосховища призвело до виникнення постійних землетрусів із максимальною силою 5,5 балів. Крім цього, геодезичні спостереження зафіксували значні зміщення земної поверхні в околиці водосховища [Vyskocil P., 1988]. Після початку експлуатації Квебецького водосховища (Канада) за результатами повторного нівелювання встановлено відносне підняття земної поверхні до 4 см [Lambert A., 1986].

Дослідження, виконані на водосховищі Асу в Бразилії [Telesca L., 2012], показують, що дифузія води в маси порід є додатковим фактором запуску ефекту наведених землетрусів, особливо в зонах тектонічної напруги. Не винятком є і найбільша в Європі Дністровська гідроакумулювальна електростанція (ГАЕС), яка розташована у передгір'ях Карпат у Чернівецькій області на правому березі р. Дністер між Дністровською ГЕС-1 та Дністровською ГЕС-2. Обидві ГЕС створюють руслове буферне водоймище. Верхнє водоймище розташовано на плато на 125 м вище від рівня руслового буферного водоймища і побудоване шляхом виїмки та насипу ґрунту в екран дна і дамб обгородження висотою до 20 м. Його об'єм становить близько 30 млн м^3. ГАЕС побудована в складних інженерно-геологічних умовах, що характеризуються великим перепадом висот та крутими схилами між русловим буферним та верхнім водоймищем, наявністю зсувних ділянок,

© І. С. Сідоров, С. С. Перій, В. Г. Сарнавський, 2015

небезпекою фільтрації води з верхнього водоймища в нижні горизонти. Циклічність роботи станції призводить до додаткового техногенного навантаження, відбуваються зміни гідродинамічного режиму. За даними досліджень [Сарнавський В., 2005; Сарнавський В., 2006] показано, що спорудження комплексу Дністровської ГАЕС збільшує техногенні навантаження на природні геодинамічні зони, що викликає зростання напружень у масиві порід. Розрядка та їх перерозподіл призводить масив порід у нестабільний стан. На гідроенергетичному об'єкті рівень природних напружень вищий від геостатичних за рахунок тектонічної складової, до того ж горизонтальна складова більша і перевищує в три рази вертикальну, що визначає горизонтальні зміщення в масиві, які можуть спричинити непередбачувані наслідки [Сарнавський В., 2006].

За період проведених моніторингових спостережень (з 2005 року) під час будівництва Дністровської ГАЕС відбулися досить серйозні техногенні втручання в сформовану природну структуру масиву, а також у процеси, що в ньому перебігають, зокрема сейсмічні. Безсумнівно, всі ці втручання не могли не позначитися на стані масиву і не спричинити низку змін, зокрема зрушення потужних горизонтів гірських порід.

До заповнення верхнього водоймища за даними сейсмічного моніторингу, який проводився в досліджуваному районі (період спостережень з 2005 до 2011 роки), реєструвалося на рік у середньому 5–7 місцевих землетрусів з магнітудою M+0.9-2.9. Після заповнення верхнього водоймища (перша черга), в кінці жовтня 2012 р., кількість реєстрованих землетрусів суттєво збільшилася і досягла 36. У кінці 2013 р. піднято рівень водосховища до проектних позначок (об'ємів), стався скачок сейсмічних подій і було зареєстровано уже 61 місцевий землетрус. Кількість місцевих землетрусів у 2014 р. зросла до 160. Зростання місцевої сейсмічної активності району Дністровських ГЕС-ГАЕС продовжується і надалі. У першому півріччі 2015 р. вже зареєстровано 91 місцевий землетрус (звіт на тему: "Дністровська ГАЕС. Натурні спостереження. Сейсмічний моніторинг. Проведення режимних сейсмічних спостережень по 1 тимчасовій станції у 2015 році". Київ–Львів, 2013, 19 с.).

У цьому разі очевидний зв'язок сейсмічності з режимом наповнення та роботою верхнього водоймища. Зростаюча частота сейсмічних подій свідчить про перерозподіл напружено-деформованої складової, яка супроводжується порушенням суцільності (міцності) порід. Оскільки роз'єднані частки мають більший об'єм і міцність, ніж щільний кристалічний матеріал, вони якби розпирають масив і призводять до горизонтальних рухів поверхні Землі, появи нових осередків землетрусів. Водночас велика кількість зафіксованих сейсмічних подій мають нульову глибину, що вказує на розрядку напруг та активізацію екзогенних процесів (зсуви, обвали, тощо). Подібні процеси є цілком закономірними і відображають реакцію масиву на техногенне втручання. Для забезпечення експлуатаційної безпеки необхідно проводити комплексний моніторинг. Без належного комплексного контролю небезпечні процеси можуть вкрай негативно відобразитися на стані гідротехнічних споруд.

До середини 90-х років минулого століття систематичний моніторинг за рухами земної поверхні в районі розміщення великих гідроенергетичних об'єктів вівся класичними наземними геодезичними методами. Ці методи мали суттєві недоліки та були обмежені в використанні. Вони потребували прямої видимості між пунктами, характеризувались малим ступенем автоматизації та були не застраховані від суб'єктивних помилок під час виконання спостережень. В останні два десятиліття почався бурхливий розвиток застосування ГНСС під час моніторингу геодинамічних процесів, визначення рухів земної поверхні та деформацій гідротехнічних об'єктів. Це має велику перевагу під час моніторингу на об'єктах великих розмірів та за довготривалих спостережень завдяки великому ступеню автоматизації. Крім того, зникає необхідність у будівництві дорогих зовнішніх геодезичних знаків.

Мета

Метою цієї роботи є визначення горизонтальних рухів земної поверхні в районі Дністровської ГАЕС із застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем. Виконати порівняння горизонтальних зміщень пунктів водоприймача, встановлених у місцях з обмеженим прийомом супутникового сигналу, за даними використання ГНСС та прецизійних наземних вимірювань. На підставі трирічних циклів виконання тригонометричного нівелювання дослідити можливість заміни геометричного нівелювання II класу тригонометричним у місцевості з великими перепадами висот.

Методика і результати роботи

Визначення рухів земної поверхні в районі Дністровської ГАЕС супутниковими геодезичними методами

Для супроводу будівництва та спостережень за деформаціями схилів у районі розташування основних гідроенергетичних споруд створено опорну геодезичну мережу Дністровської ГАЕС. Опорна геодезична мережа налічує 40 пунктів та умовно поділяється на каркасну та робочу мережі. Каркасна геодезична складається зі семи пунктів, які закладені у корінні породи на глибину до 10 м та мають примусове центрування антен приймачів супутникових сигналів.

Геометрична конфігурація пунктів каркасної геодезичної мережі Дністровської ГАЕС була прийнята з урахуванням геологічної будови території та відкритості горизонту під час застосування ГНСС. Цю мережу можна вважати локальним геодинамічним полігоном. На рис. 1 представлено схему розташування пунктів каркасної геодезичної мережі і основних споруд Дністровської ГАЕС.

Рис. 1. Схема розташування пунктів каркасної геодезичної мережі і основних споруд Дністровської ГАЕС:
1 – верхнє водоймище; 2 – буферне руслове водоймище; 3 – водоприймач; 4 – водовипуск
Fig. 1*. Scheme of location of point of carcass geodetic network and the main structures of Dniester HPPS:*
1 – upper reservoir; 2 – channel buffer reservoir; 3 – water inlet; 4 – water outlet

Як основні вимірювальні засоби за горизонтальними зміщеннями пунктів геодезичної мережі використовували високоточні геодезичні приймачі супутникових сигналів. На Дністровській ГАЕС ми реалізували математично обґрунтовану методику побудови схеми вимірів векторів та послідовності проведення ГНСС-спостережень із урахуванням мінімізації транспортних витрат на переїзд. Попередній розрахунок точності вимірювання векторів виконували за формулою [Третяк К., 2005]:

$$m_S = 2{,}5 + e^{(\frac{0{,}1413}{t} + 0{,}5675)\cdot\sqrt{L}}, \qquad (1)$$

де L – довжина вектора; t – час спостережень.

Формула застосовується за довжин векторів до 10 км і часі спостережень до 12 год.

Вимірювання на пунктах каркасної геодезичної мережі ГАЕС виконуються з 2004 року. Для зменшення систематичних помилок антен приймачів супутникових сигналів на кожному з пунктів каркасної геодезичної мережі проводяться три–чотири незалежні сесії ГНСС-спостережень по 6 годин кожна різними приймачами супутникових сигналів. Загальний час спостережень на кожному з пунктів становить від 18 до 24 годин. Довжини виміряних векторів знаходяться в діапазоні від 1,3 км до 4,2 км. Опрацювання виміряних векторів виконано програмним пакетом “Leica Geo Office Combined” (“LGO”), з обчисленням поправок за вплив іоносфери за даними спостережень та урахуванням тропосферної рефракції за моделлю Хопфілда. Результати спостережень опрацьовані методом вільного урівноваження мережі. У табл. 1 наведено середні квадратичні похибки визначення планових координат пунктів каркасної геодезичної мережі Дністровської ГАЕС за період 2005–2014 рр.

Таблиця 1
Table 1

Середні квадратичні похибки визначення планових координат пунктів каркасної мережі Дністровської ГАЕС за 2005–2014 рр.
The mean square errors of determining plane coordinates of points of basis network Dniester PSP for the period 2005–2014

Назва пункту	С.к.п. планових координат у мм	
	2005 р.	2014 р.
ГЗ-2	1,4	1,3
ГЗ-3	1,7	1,5
ГЗ-5	1,4	1,7
ОГЗ-1	1,7	1,6
ОГЗ-3	1,3	1,9
ОЗС 5а-1	1,7	1,4
ОГЗ2-1А*	1,3	1,4

* початок спостережень 2012 р.

Як видно з табл. 1, за результатами опрацювання даних ГНСС-спостережень точність визначення планових координат пунктів каркасної мережі не перевищує ±2 мм. Вектори зміщень пунктів каркасної мережі та їхні середні квадратичні похибки наведено в табл. 2. Величини векторів зміщень становлять 1–12 мм, що вказує на різну швидкість рухів земної поверхні території прилеглої до ГАЕС. С.к.п. визначення векторів горизонтальних зміщень є в межах 2 мм. Зміщення двох пунктів ОГЗ2-1А та ГЗ-5 не перевищує с.к.п. вектора зміщення. Горизонтальні зміщення решти пунктів перевищують точність їх визначення і становлять 5–12 мм, а швидкості горизонтальних рухів нерівномірні і відповідно знаходяться в межах 0,5–1,2 мм/рік.

Таблиця 2
Table 2

Вектори горизонтальних зміщень та їхні середні квадратичні похибки за період 2005–2014 рр.
Horizontal displacement vectors and their mean square errors for the period 2005–2014

Назва пункту	Азимут зміщення у градусах	Довжина вектора в мм	С.к.п. векторів зміщень у мм
ГЗ-2	270	12	2
ГЗ-3	291	6	2
ГЗ-5	287	1	2
ОГЗ-1	284	5	2
ОГЗ-3	280	10	2
ОЗС 5А-1	269	6	2
ОГЗ2-1А*	326	1	2

* початок спостережень 2012 р.

На рис. 2 показано схему векторів зміщень пунктів каркасної геодезичної мережі Дністровської ГАЕС за період 2005–2014 рр.

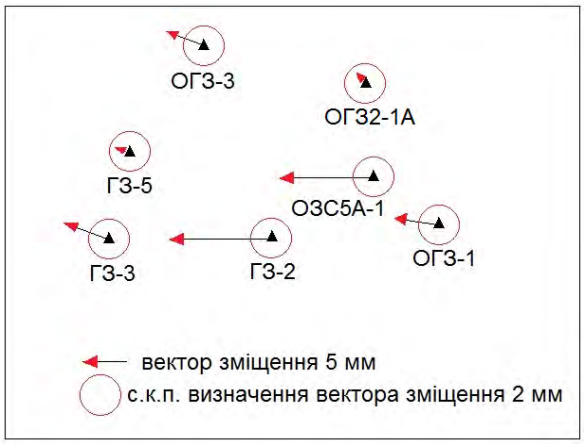

Рис. 2. Схема векторів горизонтальних зміщень пунктів каркасної геодезичної мережі Дністровської ГАЕС за період 2005–2014 рр.
***Fig. 2**. Scheme of horizontal displacement vectors of carcass geodetic network points of Dniester HPPS for the period 2005–2014*

Як видно з рис. 2 вектори зміщень пунктів каркасної геодезичної мережі Дністровської ГАЕС вказують на північно-західний напрямок руху. Логічно припустити, що на межі Українського щита і Волино-Подільської плити блоки фундаменту рухаються в північно-західному напрямку і, відповідно, такий напрямок мають вектори напружень гірських порід або тектонічний потік. Тектонічний потік – це різноманіття деформацій, переміщень і обертань гірських масивів літосфери в полі радіальних і латеральних тектонічних напруг. Тут тектонічні напруги повністю компенсуються тектонічними деформаціями. Очевидно, збіг епіцентрів землетрусів по трансформному розлому, причому вони найінтенсивніші на перетині з розломами північно-східного простягання, засвідчує сучасну активізацію тектонічних процесів [Максимчук В. Е., 2005].

Визначення зміщень пунктів водовипуску супутниковим та наземним геодезичним методом

За останні два десятиліття сфера застосування ГНСС під час моніторингу за деформаціями гребель та інших гідротехнічних споруд набуває все більшого застосування. Точність визначення горизонтальної компоненти ГНСС методом зрівнялась з класичними наземними геодезичними методами, а на великих відстанях значно їх перевищує. За дослідженнями деформацій земляної греблі Маврово (Болгарія) зі застосуванням ГНСС та високоточних лінійно-кутових вимірювань різниці координат, отриманих цими методами, розташованих в інтервалі 1–4 мм [Srbinoski Z., 2010]. Лінійно-кутові вимірювання виконанані прецизійним тахеометром з технічними характеристиками 0,5" по куту та 1 мм на 1 км лінії. ГНСС вимірювання виконувались на пунктах з максимально відкритою небесною сферою на пункті спостережень.

Водовипуск Дністровської ГАЕС є однією з головних гідротехнічних споруд, що потребує деформаційного моніторингу для забезпечення ефективної та надійної роботи станції. За період моніторингу за горизонтальними зміщеннями пунктів водовипуску з застосуванням ГНСС умови спостережень на них погіршуються (вводяться в експлуатацію нові будівельні конструкції та технологічне обладнання), що призводить до підвищеної кількості аномалій у фазових вимірюваннях, а також до високого рівня багатопроменевості.

Як зазначено вище, опорна мережа Дністровської ГАЕС складається зі сорока пунктів. За даними опрацювання опорної мережі ГАЕС с.к.п. планового положення пунктів зі задовільними умовами вимірювань не перевищує ±2 мм, що відповідає апріорній оцінці точності результатів вимірювань згідно з розробленою методикою. Проте ця методика розрахована для виконання вимірювань на пунктах мережі зі задовільним прийомом супутникових сигналів, чого не можна зазначити про пункти, встановлені на водовипуску Дністровської ГАЕС. Для контролю визначення координат пунктів водовипуску супутниковим методом ми додатково виконали лінійно-кутові вимірювання. Пункти, на яких виконувались вимірювання, утворюють мережу у вигляді трикутників, що пов'язують лівий і правий берег р. Дністер та пункти водовипуску ГАЕС. Схема лінійно-кутових вимірювань для визначення зміщень пунктів водовипуску Дністровської ГАЕС показана на рис. 3. Ця мережа є частиною опорної мережі Дністровської ГАЕС.

Її координати отримані за результатами опрацювання опорної мережі ГАЕС, яка складається зі сорока пунктів. Для визначення координат пунктів водовипуску наземним методом за вихідні пункти прийнято пункт каркасної мережі ОГ32-1А та пункт робочої мережі Створний. У табл. 3 наведені середні квадратичні похибки планового положення вихідних пунктів за період 2012–2014 рр. супутниковим методом.

Таблиця 3
Table 3

Середні квадратичні похибки визначення планових координат вихідних пунктів супутниковим методом за період 2012–2014 рр.
The mean square error of determining plane coordinates of initial points by satellite method for the period 2012–2014

Назва пункту	*Mxy* (мм)		
	2012 р.	2013 р.	2014 р.
Створний	0,7	0,8	1,0
ОГ32-1А	0,8	1,1	1,4

Із табл. 3 видно, що с.к.п. планового положення вихідних пунктів не перевищує апріорної оцінки точності ±2 мм.

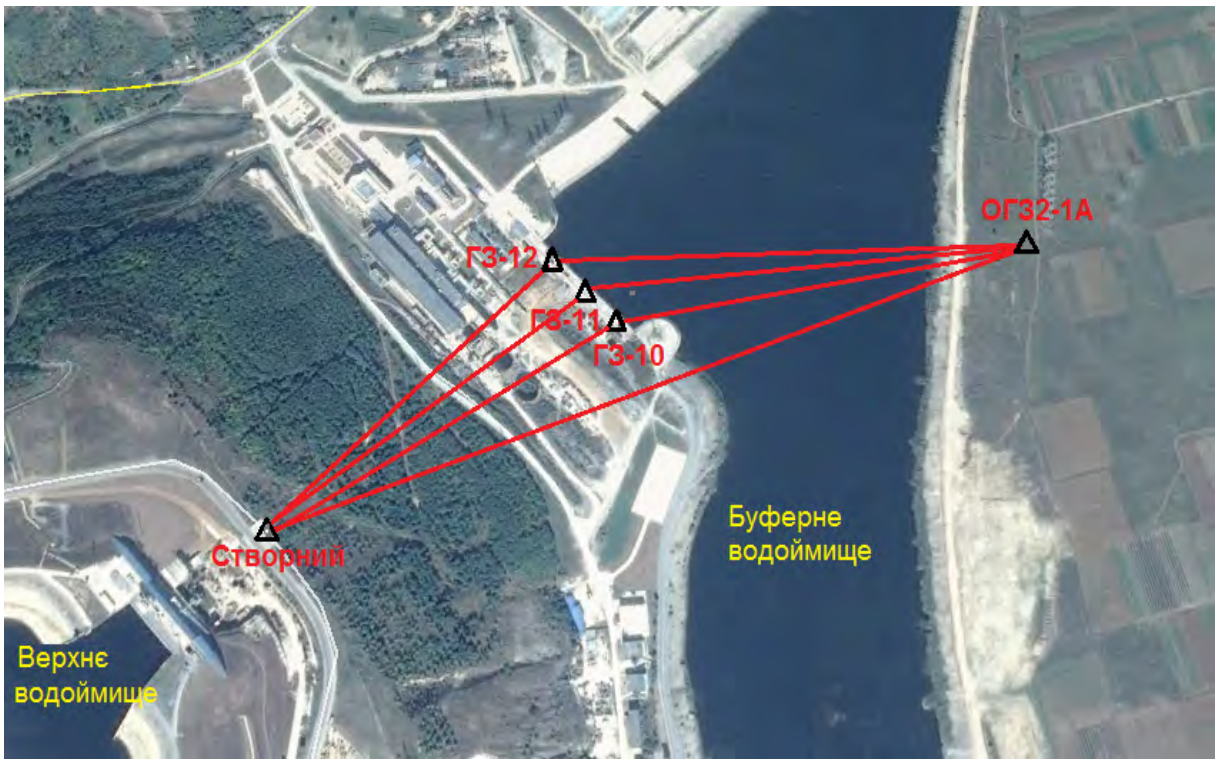

Рис. 3. Схема мережі лінійно-кутових вимірювань для визначення зміщень пунктів водовипуску Дністровської ГАЕС
Fig. 3. Scheme of network of linearly-angular measurements for determination of the displacement of water outlets points of Dniester HPPS

Виконання ГНСС-вимірювань на пунктах, встановлених на водовипуску станції, відбувається в несприятливих умовах: закритість горизонту будівельними та технологічними конструкціями та високий рівень багатопроміневості, що призводить до збільшення похибок координат пунктів. У табл. 4 наведено середні квадратичні похибки визначення планових координат пунктів водовипуску супутниковим методом за період 2012–2014 рр. За даними цієї таблиці с.к.п. планового положення пунктів водовипуску в 2013 р. та 2014 р. перевищують результати 2012 р. Причиною цього є менша кількість перешкод під час проходження супутникового сигналу до антен супутникових приймачів у 2012 р.

Таблиця 4
Table 4

Середні квадратичні похибки визначення планових координат пунктів водовипуску супутниковимм методом за період 2012–2014 рр.
The mean square error of determining plane coordinates of water outlets points by satellite method for the period 2012–2014

Назва пункту	*Mxy* (мм)		
	2012 р.	2013 р.	2014 р.
ГЗ-10	1,8	2,5	3,0
ГЗ-11	1,1	2,1	2,5
ГЗ-12	1,2	2,9	2,5

Потім поряд з пунктами побудовано стаціонарні споруди, що, своєю чергою, суттєво погіршило умови вимірювань і відповідно зменшило точність отриманих координат.

Під час визначення координат незалежним наземним методом застосовували електронний роботизований тахеометр (Total Station Positioning System TSPS) TCRP-1201 фірми Leica. С.к.п. вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів одним прийомом – 1", а ліній $\pm(1+1{,}5\cdot ppm)$ *мм* . Вимірювання електронним тахеометром проведено в прямому і зворотному напрямках вісьмома прийомами у двох положеннях вертикального круга тахеометра.

Для зменшення впливу центрування тахеометра та відбивачів нами застосовувались спеціально розроблені пристосування для примусового центрування, що складались із спеціальних гвинтів і гайок (див. рис. 4).

Під час виконання наземних вимірювань одним з основних чинників, що лімітує реалізацію високої приладової точності, є вертикальна рефракція. Одним із найефективніших методів зменшення її впливу є спосіб одночасних двосторонніх спостережень [Дементьев В., 2009]. Застосування цього методу у просторовій мережі із багатьох пунктів є неможливим. Ми запропонували використання неодночасних спостережень у певні періоди доби.

Рис. 4. Становий гвинт і гайка для примусового центрування інструментів і відбивачів на трубних знаках
Fig. 4*. Attachment screw and nut for forced centering of tools and reflectors totubular marks*

Для швидкого переміщення між пунктами спостереження застосовувався автотранспорт. Саме вимірювання просторової мережі (5 пунктів спостереження) із переїздами виконувався протягом чотирьох годин. Періоди лінійно-кутових спостережень старались вибирати за стійкої установленої атмосферної стратифікації (протягом денного періоду доби) без різких коливань температур і змін погодних умов.

У результаті виконання неодночасних двосторонніх спостережень із введенням поправок за метеорологічні умови (вимірювались температура, тиск і вологість повітря на пунктах спостереження) і висот встановлення візирних цілей та електронного тахеометра, виконані обчислення горизонтальних і вертикальних кутів та похилих відстаней з уведенням поправок за метеорологічні умови спостережень. Перевищення із двостороннього нівелювання отримували за запропонованою методикою опрацювання результатів двостороннього тригонометричного нівелювання із використанням флуктуацій зенітних відстаней для розрахунку поправок за вертикальну рефракцію [Перій С., 2001; Tretyak K., 2015]:

$$h_{AB}^{дв.тр.} \cong \frac{h_{AB}^{вим.} - h_{BA}^{вим.}}{2} - \left(\frac{m_{Z_{AB}} - m_{Z_{BA}}}{m_{Z_{AB}} + m_{Z_{BA}}}\right)\left(\frac{h_{AB}^{вим.} + h_{BA}^{вим.}}{2}\right), \quad (2)$$

де $h_{AB}^{вим.}$ і $h_{BA}^{вим.}$ – виміряні пряме і зворотне перевищення по лінії спостереження *AB* із урахуванням кривини Землі, висот інструмента та відбивачів; $m_{Z_{AB}}$ і $m_{Z_{BA}}$ – відповідні флуктуації зенітних напрямків, визначені за період спостережень із восьми прийомів.

За виправленими у разі вертикальної рефракції перевищеннями обчислені теоретичні зенітні відстані і виконані опрацювання планово-висотної мережі у програмному комплексі “МГ Сети”.

У табл. 5 наведено середні квадратичні похибки визначення планових координат пунктів водовипуску наземним методом за період 2012–2014 років. За даними табл. 5 с.к.п. планових координат пунктів водовипуску за період спостережень практично не змінюються і знаходяться в межах 2,5 мм. Під час порівняння с.к.п. планових координат пунктів водовипуску, отриманих супутниковим та наземним методом, видно, що 2012 р. супутниковий метод давав кращу точність, ніж наземний.

За результатами роздільного опрацювання ГНСС та лінійно-кутових вимірювань отримані планові координати пунктів водовипуску.

Горизонтальні зміщення пунктів водовипуску Дністровської ГАЕС за результатами супутникового та наземного методів та їх різниці за період 2012–2014 років показано в табл. 6.

Таблиця 5
Table 5

Середні квадратичні похибки визначення планових координат пунктів водовипуску наземним методом за період 2012–2014 рр.
The mean square error of determining plane coordinates of water outlets points by terrestrial method for the period 2012–2014

Назва пункту	*Mxy* (мм)		
	2012 р.	2013 р.	2014 р.
ГЗ-10	2,3	2,3	2,5
ГЗ-11	2,3	2,3	2,5
ГЗ-12	2,3	2,3	2,5

Таблиця 6
Table 6

Горизонтальні зміщення пунктів водовипуску Дністровської ГАЕС за результатами супутникового та наземного методів та їх різниці за період 2012-2014 рр.
Horizontal displacements of water outlets points of Dniester HPSP on the results of satellite and terrestrial methods and their differences for the period 2012–2014

Назва пункту	2012–2013 роки		2013–2014 роки		2012–2014 роки	
	Δ*X*(мм)	Δ*Y*(мм)	Δ*X*(мм)	Δ*Y*(мм)	Δ*X*(мм)	Δ*Y*(мм)
Горизонтальні зміщення за даними ГНСС вимірювань (мм)						
ГЗ-10	2,2	4,2	-1,7	-2,6	0,5	1,6
ГЗ-11	2,0	2,6	-1,2	1,0	0,8	3,6
ГЗ-12	2,2	2,9	-2,1	-2,2	0,1	0,7
Горизонтальні зміщення за даними наземного метода (мм)						
ГЗ-10	2,4	-0,3	1,8	-0,1	4,2	-0,4
ГЗ-11	2,4	0,1	-1,0	2,2	1,4	2,3
ГЗ-12	2,8	1,4	-3,1	1,5	-0,3	2,9
Різниці горизонтальних зміщень за даними ГНСС та наземного метода (мм)						
ГЗ-10	0,2	-4,5	3,5	2,5	3,7	-2,0
ГЗ-11	0,4	-2,5	0,2	1,2	0,6	-1,3
ГЗ-12	0,6	-1,5	-1,0	3,7	-0,4	2,2

З табл. 6 видно, що різниці горизонтальних зміщень пункту водовипуску ГЗ-10 за даними двох незалежних методів мають найбільші різниці: по осі *X* -4,5 мм, по осі *Y* +3,5 мм. Умови ГНСС-вимірювань на цьому пункті найгірші відносно решти пунктів водовипуску, що пов'язано з наявністю найбільшої кількості перешкод у районі його розташування. Так, с.к.п. планових координат пункту ГЗ-10 найбільша (див. табл. 4). Різниці горизонтальних зміщень пункту ГЗ-11 значно менші. Так, по осі *X* вони є в межах +0,2 – +0,6 мм, а по осі *Y* -2,5 – +1,2 мм. Для пункту ГЗ-12 різниці горизонтальних зміщень за даними двох незалежних методів становлять по осі *X* -1,0 – +0,6 м, по осі *Y* 1,5–3,7 мм. Узагальнюючи отримані результати, можна впевнено стверджувати, що кординати пунктів водовипуску, за даними ГНСС-вимірювань, визначені з високим ступенем надійності і точності, що підтверджується незалежним наземним методом спостережень.

Водовипуск Дністровської ГАЕС зазнає значних гідродинамічних навантажень, пов'язаних з циклічністю роботи станції і отримані результати мають бути достовірними. Застосування супутникових та наземних методів дають змогу отримувати горизонтальну компоненту в субміліметровому діапазоні, що забезпечує високу надійність отриманих результатів та підвищує техногенну безпеку такого важливого об'єкта, як Дністровська ГАЕС.

Опорна висотна мережа Дністровської ГАЕС складається з двох кущів фундаментальних реперів,

закладених у районі верхнього водоймища та біля будівлі машинного залу. Для визначення вертикальних зміщень гідротехнічних споруд ГАЕС виконуються систематичні спостереження методом геометричного нівелювання I класу. Зв'язок двох кущів фундаментальних реперів потребує виконання нівелювання на ділянці з перепадом висот порядка 100 м, що призводить до зменшення точності отриманого перевищення. Ми реалізували методику виконання двостороннього тригонометричного нівелювання за значних перепадів висот, яка забезпечує точність нівелювання II класу. У табл. 7 наведено перевищення та вертикальні зміщення пунктів лінійно-кутової мережі Дністровської ГАЕС за результатами двостороннього тригонометричного нівелювання (2012–2014 років).

Таблиця 7
Table 7

Перевищення та вертикальні зміщення пунктів лінійно-кутової мережі Дністровської ГАЕС за результатами двостороннього тригонометричного нівелювання (2012–2014 років)
Elevation and vertical displacement of linear-angular network points of Dniester HPSP on the results of bilateral trigonometric leveling for the period 2012–2014

Вихідний пункт	Пункти мережі	Виміряні віддалі, м	Перевищення, м			Різниці перевищень, мм		
			2012	2013	2014	13–12	14–13	14–12
ОГЗ	GZ-10	538	-11,4101	-11,4116	-11,4102	-1,5	1,4	-0,1
	GZ-11	586	-11,4197	-11,4207	-11,4213	-1,0	-0,6	-1,6
	GZ-12	638	-11,4120	-11,4101	-11,4148	1,9	-4,7	-2,8
	Створний	1009	117,3870	117,3867	117,3884	-0,3	1,7	1,4
Створний	GZ-10	524	-128,7971	-128,7983	-128,7986	-1,2	-0,3	-1,5
	GZ-11	520	-128,8067	-128,8074	-128,8097	-0,7	-2,3	-3,0
	GZ-12	524	-128,7990	-128,7978	-128,8002	1,2	-2,4	-1,2
	OGZ	1009	-117,3870	-117,3867	-117,3884	0,3	-1,7	-1,4
					с.к.п.	1,0	1,7	1,0

З табл. 7 видно, що точність визначення перевищень методом неодночасного двостороннього тригонометричного нівелювання відповідає точності геометричного нівелювання II класу. Реалізація теоретичних засад розробленої методики підтверджується практичними результатами вимірювань та їхньою стабільністю.

Висновки

- Розроблена та реалізована методика визначення планових координат пунктів опорної геодезичної мережі Дністровської ГАЕС з с.к.п. не більше ніж ±2 мм.
- За результатами високоточних ГНСС-вимірювань виявлено рухи земної поверхні району, що зазнає техногенного навантаження від роботи Дністровської ГАЕС.
- Виконано визначення координат водовипуску незалежним лінійно-кутовим методом прецизійним роботизованим електронним тахеометром з урахуванням поправок за рефракцію.
- Визначені координати пунктів за результатами ГНСС та прецизійних лінійно-кутових вимірювань практично збігаються, що підтверджує високу точність двох незалежних методів.
- Розроблена методика врахування вертикальної рефракції із використанням результатів неодночасних двосторонніх спостережень і флуктуацій зенітних відстаней.
- За даними трьохрічних циклів тригонометричного нівелювання отримано величини перевищень на лініях протяжністю 0,5–1 км з точністю, що відповідає геометричному II класу.

Література

Дементьев В. Е. Рефракция и миражи / В. Е. Дементьев. – М. : ООО "Галлея-Принт", 2009. – 391 с.

Максимчук В. Е. Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат / В. Е. Максимчук, В. Г. Кузнецова, Т. З. Вербицький та ін. – К. : Наук. думка, 2005. – 254 с.

Перій С. С. Використання двостороннього тригонометричного нівелювання у світловіддалемірній полігонометрії / С. С. Перій // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2001. – № 61. – С. 112–117.

Сарнавський В. Тектонічна структура і геодинамічний режим масивів порід у зоні взаємодії з гідротехнічними спорудами ГЕС і ГАЕС (на прикладі Дністровського комплексного гідровузла) / В. Сарнавський, М. Овсянніков // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2005. – С. 193–206.

Сарнавський В. Г. Структурні особливості і напружено-деформований стан масиву осадових порід у техногенно змінених умовах (на прикладі Дністровського комплесного гідровузла) / Сарнавський В. Г // Геологія і геохімія горючих копалин. – 2006. – № 1. – С. 77–94.

Третяк К. Оптимізація побудови геодезичної мережі Дністровської ГАЕС супутниковими радіонавігаційними технологіями / К. Третяк, І. Сідоров // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2005. – С. 207–219.

Gupta H. K., Rastogi B. K.: Dams and Earthquakes, Elsevier. – Amsterdam, 1976. – 229 pp.

Hudnut K. W. and Behr J. A., "Continuous GPS monitoring ofstructural deformation at Pacoima Dam, California," Seismol.Res. Lett., **69**(4), 299 – 308 (July – August, 1998).

Kumar J. P., Ramana D. V., Chadha R. K., C. Singh, and M. Shekar, "The relation between seismicity and water-levelchanges in the Koyna – Warna Region of India," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **12**, 813–817 (2012).

Lambert A., Liard J. O., Mainville A. Vertical movement and gravity change near the La Grande-2 reservoir, Quebec. "J. Geophys. Res". – 1986. – № 9. – P. 9150–9160.

Telesca L., do Nascimento A. F., Bezerra F. H. R., Ferreira J. M. "Analyzing the temporal fluctuations of the reservoir-triggered seismicity observed at Asu (Brazil)," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **12**, 805–811 (2012).

Srbinoski Z. and Bogdanovski Z., "Application of GNSS technologyin geodetic asculation of embankment dams," in:BALGEOS 2009, Vienna, Austria, 27–29 January 2010. http:__balgeos.cc.bas.bg_News_materials_Presentation__2010_11_Bogdanovski_Application_GNSS_technology.pdf.

Tretyak K. Complex High Accuracy Satellite and Field Measurements of Horizontal and Vertical Displacements of Control Geodetic Network on Dniester Hydroelectric Pumped Power Station (HPPS) / K. Tretyak, S. Periy, I. Sidorov, L. Babiy. // Geomatics and Environmental Engineering. – Vol. 9. – No. 1. – 2015. – P. 83–96. http://dx.doi.org/10.7494/geom.2015.9.1.83

Vyskocil P., Kebeasy R., Tealeb A., Mahmoud S. The present state of cruafal hovement studies at Kalabsha area, Aswan, Egypt // 6th Int. Symp. Geod. and Phys. Earth, Potsdam, 1988: Abstr. – Berlin. – C. 79.

И. С. СИДОРОВ[1], С. С. ПЕРИЙ[2], В. Г. САРНАВСКИЙ[3]

[1,2] Кафедра геодезии, Национальный университет "Львовская политехника", ул. С. Бандеры, 12, Украина, 79013, эл. почта periy_ss@ukr.net
[3] ВАТ "Днестровская ГАЭС", Новоднестровск, эл. почта bms1vtv@ukr.net

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В РАЙОНЕ ДНЕСТРОВСКОЙ ГАЭС СПУТНИКОВЫМИ И НАЗЕМНЫМИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Цель. Целью данного исследования является определение горизонтальных движений земной поверхности в районе расположения основных гидротехнических сооружений Днестровской ГАЭС и прилегающей территории, которая находится под влиянием техногенной нагрузки от циклического режима работы ГАЭС, с применением технологий спутникового мониторинга глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС). По данным совместных спутниковых и линейно-угловых измерений оценить точность горизонтальных смещений водоприемника ГАЭС на пунктах с ограниченным приемом спутникового сигнала. На основании трехлетних циклов выполнения тригонометрического нивелирования исследовать возможность замены геометрического нивелирования II-го класса тригонометрическим в местности с большими перепадами высот. **Методика.** Для определения координат пунктов разработана методика выполнения измерений ГНСС, которая позволяет обеспечить точность плановых координат со средней квадратичной погрешностью ± 2мм для пунктов с принудительным центрированием антенн приемников. Применена методика выполнения прецизионных линейно-угловых измерений с учетом атмосферной рефракции. **Результаты.** Результатами данного исследования являются: полученные векторы горизонтальных смещений пунктов опорной геодезической сети Днестровской ГАЭС спутниковым методом. Определены горизонтальные смещения пунктов водовыпуска двумя независимыми методами и выполнено их сравнение. По данным линейно-угловых измерений полученные превышения между пунктами опорной сети и пунктами водоприемника и их изменения за период 2012-2014рр. Точность полученных превышений методом тригонометрического нивелирования не превышает допуски геометрического нивелирования II-го класса. **Научная новизна**. По данным высокоточных ГНСС измерений обнаружены движения земной поверхности района, испытывающего техногенной нагрузки от работы Днестровской ГАЭС. Полученные смещения водовыпуска по результатам спутниковых и наземных геодезических измерений практически совпадают, что подтверждается данными трехлетнего периода наблюдений. **Практическая значимость.** Использование разработанных методик наблюдений за горизонтальными движениями земной поверхности в

районах, подвергающихся воздействию техногенной нагрузки будет способствовать повышению надежности и эффективной работе гидроэнергетических объектов. Разработанная методика прецизионного тригонометрического нивелирования значительно уменьшает время на выполнение работ и обеспечивает точность геометрического нивелирования II-го класса.

Ключевые слова: горизонтальные смещения; ГНСС; гидротехнические сооружения; тригонометрическое нивелирование.

I. S. SIDOROV[1], S. S. PERIJ[2], V. H. SARNAVSKYJ[3]

[1,2] Surveying Department, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, Ukraine, 79013, e-mail periy_ss@ukr.net
[3] VAT "Dniester PSP" Novodnistrovsk, e-mail bms1vtv@ukr.net

DETERMINATION OF THE EARTH SURFACE MOVEMENTS IN AREAS OF DNIESTER HPPS USING SATELLITE AND GROUND GEODETIC METHODS

Purpose. The purpose of this study is to determine the horizontal movements of the earth surface in the vicinity of the main waterworks Dniester HPPS and the surrounding area using technologies of satellite monitoring by global navigation satellite system (GNSS). The territory is under the influence of anthropogenic impact of HPPS cyclical operating mode. To assess the accuracy of horizontal displacements of HPPS water intake at points with limited reception of satellite signals using compliant data of satellite and linear-angular measurements. To explore the possibility of replacing geometrical leveling of second class with trigonometric levelling in areas with large elevation on the basis of three-year cycles of trigonometric leveling. **Methodology.** To determine the coordinates of points the technique of GNSS measurements implementation was elaborated, which allows to provide precision of plane coordinates with mean square error of ± 2mm for points with forced centering of receivers' antennas. Execution method of precision linear-angular measurements considering atmospheric refraction was applied. **Results**. The results of this study are: obtained vectors of horizontal displacements of control geodetic network points of the Dniester HPPS by satellite method. Horizontal displacements of water outlets points are determined by two independent methods and their comparison was made. According to linear-angular measurements there were obtained elevations between points of control network and water intake points and their change for the period 2012-2014. The accuracy of elevations obtained by trigonometric leveling method does not exceed the tolerances of geometric leveling of the second class. **Originality**. Using high-precision GNSS measurements there were detected movements of the earth's surface on area, which suffers from anthropogenic impact of the Dniester HPPS. The obtained displacement of water outlets on the results of satellite and terrestrial geodetic measurements are mostly coincided what is confirmed by the data of three-year observation period. **Practical significance.** The use of developed techniques of the observations for the horizontal movements of the earth surface in areas exposed to anthropogenic load will increase the reliability and efficient operation of hydropower facilities. The developed method of precision trigonometric leveling significantly reduces the time of work implementations and provides the precision of geometric leveling of second class.

Keywords: horizontal displacements; GNSS; hydraulic facilities; trigonometric leveling.

REFERENCES

Dement'ev V. E. *Refrakcija i mirazhi* [Refraction and mirages]. Moscow: OOO "*Galleja-Print*", 2009, 391 p.

Maksymchuk V. E., Kuznecova V. G. Verbyc'kyj T. Z. ta in. *Doslidzhennja suchasnoi' geodynamiky Ukrai'ns'kyh Karpat* [Research of modern geodynamics of Ukrainian Carpathians]. Kyiv: *Naukova dumka,* 2005, 254 p.

Perij S. S. Vykorystannja dvostoronn'ogo trygonometrychnogo niveljuvannja u svitloviddalemirnij poligonometrii' [The use of bilateral trigonometric leveling in light rangefinders polygonometry Geodesy, cartography and aerial photography]. *Geodezija, kartografija i aerofotoznimannja* [Geodesy, cartography and aerial photography]. 2001, no. 61, pp. 112–117.

Sarnavs'kyj V., Ovsjannikov M. *Tektonichna struktura i geodynamichnyj rezhym masyviv porid u zoni vzajemodii' z gidrotehnichnymy sporudamy GES i GAES (na prykladi Dnistrovs'kogo kompleksnogo gidrovuzla)* [Tectonic structure and geodynamic regime of rock massif in the zone of interaction with the hydrotechnical structures GES and GAES (for example of the Dniester hydroelectric complex)

Suchasni dosjagnennja geodezychnoi' nauky ta vyrobnyctva [Modern achievements in geodetic science and industry]. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2005, pp. 193–206.

Sarnavs'kyj V. G. *Strukturni osoblyvosti i napruzheno-deformovanyj stan masyvu osadovyh porid u tehnogenno zminenyh umovah (na prykladi Dnistrovs'kogo komplesnogo gidrovuzla* [Structural characteristics and mode of deformation of sedimentary rocks massif in technogenically changed conditions (for example of the

Dniester hydroelectric complex]. *Geologija i geohimija gorjuchyh kopalyn* [Geology and Geochemistry of Combustible Minerals]. 2006, no. 1, pp. 77–94.

Tretjak K., Sidorov I. *Optymizacija pobudovy geodezychnoi' merezhi Dnistrovs'koi' GAES suputnykovymy radionavigacijnymy tehnologijamy* [Optimization of building geodetic network of the Dniester HPPS satellite radio navigation technologies]. *Suchasni dosjagnennja geodezychnoi' nauky ta vyrobnyctva* [Modern achievements in geodetic science and industry]. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2005, pp. 207–219.

Gupta H. K., Rastogi B. K.: Dams and Earthquakes, Elsevier, Amsterdam, 1976, 229 p.

Hudnut K. W. and Behr J. A., "Continuous GPS monitoring ofstructural deformation at Pacoima Dam, California," Seismol.Res. Lett., no. 69(4), pp. 299–308 (July – August, 1998).

Kumar J. P., Ramana D. V., Chadha R. K., C. Singh, and M. Shekar, "The relation between seismicity and water-levelchanges in the Koyna – Warna Region of India," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2012, no. 12, pp. 813–817 .

Lambert A., Liard J. O., Mainville A. Vertical movement and gravity change near the La Grande-2 reservoir, Quebec. "J. Geophys. Res." 1986, no. 9, pp. 9150–9160.

Telesca L., do Nascimento A. F., Bezerra F. H. R., Ferreira J. M. "Analyzing the temporal fluctuations of the reservoir-triggered seismicity observed at Asu (Brazil)," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2012, no. 12, pp. 805–811 .

Srbinoski Z. and Bogdanovski Z., "Application of GNSS technologyin geodetic asculation of embankment dams," in:BALGEOS 2009, Vienna, Austria, 27 – 29 January 2010. http:__balgeos.cc.bas.bg_News_materials_Presentation__2010_11_Bogdanovski_Application_GNSS_technology.pdf.

Tretyak K., Periy S., Sidorov I., Babiy L. Complex High Accuracy Satellite and Field Measurements of Horizontal and Vertical Displacements of Control Geodetic Network on Dniester Hydroelectric Pumped Power Station (HPPS). Geomatics and Environmental Engineering. 2015, vol. 9, no. 1, pp. 83–96. http://dx.doi.org/10.7494/geom.2015.9.1.83

Vyskocil P., Kebeasy R., Tealeb A., Mahmoud S. The present state of cruafal hovement studies at Kalabsha area, Aswan, Egypt. 6th Int. Symp. Geod. and Phys. Earth, Potsdam, 1988: Abstr. – Berlin. P. 79.

Надійшла 20.10.2015 р.