

¹ Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна; ^{1a} <https://orcid.org/0000-0001-5231-3517>; ^{1b} <https://orcid.org/0000-0001-5434-4931>;

^{1c} <https://orcid.org/0000-0003-4107-2994>

² Кафедра інженерної геодезії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-3548-8785>

<https://doi.org/10.23939/jgd2021.02.016>

ВПЛИВ НЕПРИЦІЛИВНОГО АТМОСФЕРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ВЕЛИКІ ІНЖЕНЕРНІ СПОРУДИ

Проаналізовано висотний зсув ГНСС пунктів великого інженерного об'єкта, зумовлений непривпливним атмосферним навантаженням (NTAL). Об'єкти дослідження – Дністровська ГЕС-1 та її ГНСС мережа моніторингу. Вихідні дані: RINEX-файли 14 ГНСС станцій Дністровської ГЕС-1 і вісім перманентних ГНСС станцій у радіусі 100 км; модель NTAL, завантажена з репозиторію Німецького дослідницького центру геонаук GFZ за 2019–2021 рр., та матеріали щодо геологічної будови об'єкта. Методика передбачає порівняння та аналіз висотної складової часових рядів ГНСС із модельними значеннями NTAL та інтерпретацію їх геодинамічних зміщень, враховуючи аналіз їх геологічного розташування. У результаті встановлено, що пункти мережі Дністровської ГЕС-1 зазнають менших змін висоти, ніж перманентні ГНСС станції у радіусі 100 км. Це відповідає різниці потужностей та щільності гірських порід під відповідними пунктами, тому вони зазнають різних пружних деформацій під впливами однакового навантаження NTAL. Окрім цього, виявлено різну динаміку зміщень пунктів на греблі та на берегах річки, що призводить до тріщин та деформацій у зоні контакту гребля – берег. Під час аномального впливу NTAL висоти навіть близько розташованих пунктів можуть змінитися, якщо геологічна будова під ними різна. У роботі показано, що для великих інженерних об'єктів варто застосовувати спеціальні моделі та поправки для врахування NTAL у високоточні інженерно-геодезичні виміри.

Ключові слова: часові ГНСС ряди; вертикальні деформації; неприпливне атмосферне навантаження; Дністровська ГЕС-1.

Bcmyn

Метод ГНСС є одним із ключових як для визначення сучасних геодинамічних процесів у регіональному плані, так і для моніторингу великих інженерних споруд. Традиційно геодинамічні процеси виявляють на основі аналізу часових рядів зміни координат ГНСС станцій. Доволі часто під час аналізу коротких часових рядів (до 30 днів) можна спостерігати різкі зміни просторового положення ГНСС станції. Окрім цього, на сусідніх ГНСС станціях виявляють аналогічні синхронні зміщення, що свідчить про вплив на них певного фактора.

Це явище висотного зсуву постійних ГНСС станцій європейського регіону зафіксовано у кінці грудня 2019 р. тривалістю 4–10 днів [Brusak & Tretyak, 2020]. На низці постійних ГНСС станцій цей висотний зсув корелює з моделями неприпливних атмосферних навантажень у європейському регіоні. Проте у роботі [Brusak, & Tretyak, 2021] показано, що для регіональних мереж було б доцільним враховувати геологічні особливості територій. Так, на рис. 1 показано умовний поділ території заходу України за величиною висотного зсуву станцій. Лінія поділу на дві групи розділяє ГНСС станції зі зміщеннями до та понад 15 мм.

Висотний зсув, менший від 15 мм, не відповідає модельним значенням атмосферних навантажень.

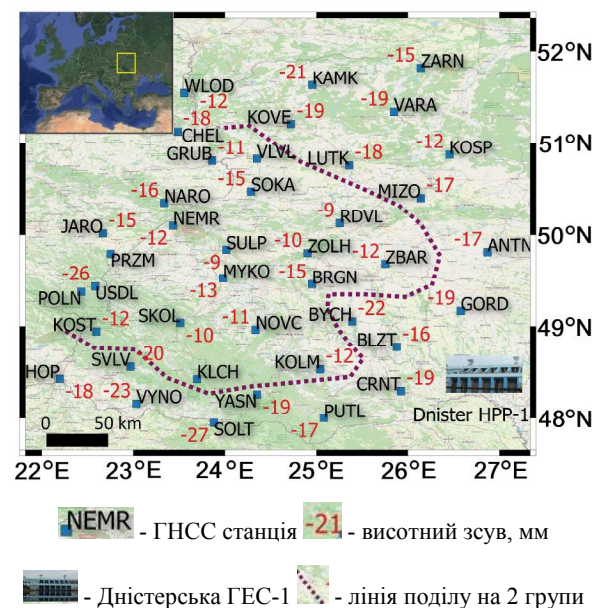


Рис. 1. Аналіз динаміки вертикального зсуву ГНСС станцій мережі “Геотераса” у грудні 2019 р. [Brusak & Tretyak, 2021]

Також помітно, що на великих інженерних об'єктах зміщення ГНСС станцій слабко корелюють із модельними значеннями неприпливних атмосферних навантажень і потребують додаткового дослідження [Третяк та ін., 2021; Tretiyak et al., 2021]. Мета цього дослідження – аналіз впливу неприпливного атмосферного навантаження на великі інженерні об'єкти.

Навантаження навколишнього середовища

Серед факторів впливу навколишнього середовища на часові серії ГНСС – як припливні, так і неприпливні навантаження. Припливні фактори доволі легко моделюються на тривалий час і залежать відповідно від припливних сил Місяця та Сонця. Сьогодні, відповідно до конвенцій IERS, існують рекомендації для врахування деформації моделей припливних факторів у часових ГНСС рядах, натомість щодо неприпливних моделей такі рекомендації відсутні.

Неприпливне навантаження (NTL) також деформує земну поверхню, додаючи змінності координатам геодезичних об'єктів. До NTL належать неприпливне атмосферне (NTAL), яке залежить від перерозподілу атмосферних мас, та неприпливне океанічне навантаження (NTOL), яке формується насамперед через перерозподіл мас на дні океану і відповідну зміну тиску та гідрологічні зміни у річковій сітці регіону. Відомо, що змінність вертикальних рухів суші зменшується в середньому на 20 % у разі корекції ГНСС ряду на неприпливне атмосферне та океанічне навантаження з використанням баротропних або бароклінічних моделей океану [Mémmin, et al., 2020]. Також досліджують вплив NTL на результати інших геодезичних мереж, зокрема спостережень станцій інтерферометрії з наддовгою базою (VLBI) [Petrov, & Boy, 2003; Glomsda et al., 2019].

Навантаження, спричинені атмосферним тиском

Земля пружно реагує на навантаження атмосферним тиском (англ. *Atmospheric pressure loading*, APL), спричинені перерозподілом атмосферних мас. Вилучивши з нього компоненти, які є припливними, наприклад, сонячні добові та напівдобові, які можна змодельовати заздалегідь, отримуємо такі пружні деформації земної поверхні, які залежать від розподілу атмосфери на різних територіях, і називаємо їх неприпливними атмосферними навантаженнями (англ. *Non-Tidal Atmospheric Loading*, NTAL).

Урахування впливу атмосферного навантаження на зміщення у висотних рядах ГНСС продовжують досліджувати [Tregoning, & van Dam, 2005; Rodrigues, 2007; Tregoning, & Watson, 2009; Dach, et al., 2011; Yue, et al., 2020; Калиников та ін., 2020]. З метою підвищення точності розв'язків ГНСС станцій Tregoning & Watson

[2009] рекомендують враховувати як припливне, так і неприпливне атмосферне навантаження, та ввести ці моделі у поточні пакети програмного забезпечення, що сьогодні вже реалізовано. Rodrigues [2007] оцінює вплив вертикальних зміщень земної кори від атмосферного навантаження за 45 ГНСС станціями у Європі та Азії і констатує, що для деяких континентальних станцій спостерігалася висока кореляція між вертикальним положенням ГНСС та атмосферним навантаженням. Для континентальної території Китаю обчислено деформації верхнього шару земної кори за даними ГНСС станцій і встановлено, що максимальні поправки для північного регіону Китаю за вплив атмосферного навантаження можуть досягати 24 мм [Yue et al., 2020].

Існує декілька центрів, які створюють моделі впливу зміни атмосферних явищ та надають дані у відкритий доступ. Моделі зміни навантаження APL можна завантажити із Міжнародного сервісу навантаження мас (International Mass Loading Service) [Petrov, L., 2015] та Віденських відкритих даних функцій для картування (Vienna Mapping Functions Open Access Data) [VMF]. Німецький дослідницький центр геонаук GFZ, Потсдам (Deutsches GeoForschungs Zentrum GFZ Potsdam) [ECMGFZ] подає дані неприпливного атмосферного навантаження (NTAL). Порівнюючи висотну складову часових рядів цих трьох моделей для території західної частини України, констатуємо, що вони практично ідентичні із відхиленнями в межах 1 мм і максимальними до 3 мм.

У цьому дослідженні використано моделі, завантажені із репозиторію ECMGFZ [<http://esmdata.gfz-potsdam.de>] для центра фігури Землі. Модель навантажень визначають на основі неприпливного атмосферного приземного тиску, що надається за тригодинними оперативними даними ECMWF $0,5 \times 0,5^\circ$. Припливні навантаження видалено у результаті гармонічного аналізу 12 основних припливних складових. Неприпливний атмосферний приземний тиск повторно відбирають на звичайній глобальній сітці $0,125 \times 0,125^\circ$. Для визначення NTAL аналізують часові серії приземного тиску за даними місії ERA-40 та ERA-Interim, з урахуванням топографії та змінної у часі структури щільності атмосфери [ECMGFZ].

Зрозуміло, що регіони, залежно від їхньої геологічної структури, по-різному пружно реагуюватимуть на однакові навантаження, зокрема й атмосферні, адже гірські породи мають різні фізичні властивості. Проте у роботі [Petrov, 2015] показано, що для моделювання впливу неприпливних навантажень використовують середню щільність Землі (ρ_0). На думку авторів, доцільно дослідити вплив атмосферного навантаження на територію із відомою геологічною будовою і порівняти пружні деформації для пунктів, під якими залягають породи різної щільності, потуж-

ності та віку. Також потрібно розглянути густу мережу ГНСС станцій. З цією метою розглянемо моніторингові мережі гідроелектростанцій, які забезпечені густою мережею ГНСС станцій для моніторингу зміщень і водночас мають досліджену геологічну будову. Відоме дослідження впливу APL на результати ГНСС вимірювань для гідрологічного техногенного об'єкта – Загорської гідроакumuлюючої електростанції № 2 [Калинников та ін., 2020]. Автори вказують на необхідність застосування моделей атмосферних навантажень для корекції супутникових вимірів методом PPP як ефективного інструменту для моніторингу складних інженерних споруд.

Стан споруд Дністровської ГЕС-1

Низка гідроелектростанцій в Україні експлуатуються уже близько півстоліття, їх греблі становлять найвищу гідродинамічну техногенну небезпеку [Третяк та ін., 2014, Tretyak, et al., 2015]. Побудова ГЕС та створення водосховищ – активне втручання у геологічні, геодинамічні та гідрологічні умови [Третяк та ін., 2017]. Унаслідок експлуатації впродовж півстоліття деякі геодинамічні явища можуть призвести до активізації деформаційних процесів інженерних споруд, до загибелі людей, аварій, руйнувань та матеріальних збитків.

У цьому дослідженні розглядаємо Дністровську ГЕС-1 (див. рис. 1), яка є складовою частиною Дністровського гідроенергетичного каскаду, побудована на р. Дністер і розташована за 60 км на північний захід від м. Могилів-Подільського Вінницької області ($48^{\circ}35'37''$ Пн. шир. $27^{\circ}27'8''$ Сх. довг.). На рис. 2 показано загальний вигляд споруд Дністровської ГЕС-1. Гідровузол призначений для виконання таких основних завдань: вироблення електроенергії, регуляції води у річці, зважаючи на весняну та дощову повінь, зрошування земель, водопостачання довколишніх населених пунктів. Будівля ГЕС руслова суміщена, водозливного типу, її довжина поперек потоку

153 м, ширина уздовж потоку 75 м.



Рис. 2. Загальний вигляд споруд Дністровської ГЕС-1

Під час дослідження об'єкта восени 2019 р. виявлено тріщини та просідання у тілі греблі, які потребують детального аналізу. На рис. 3 показано такі пошкодження та просідання.

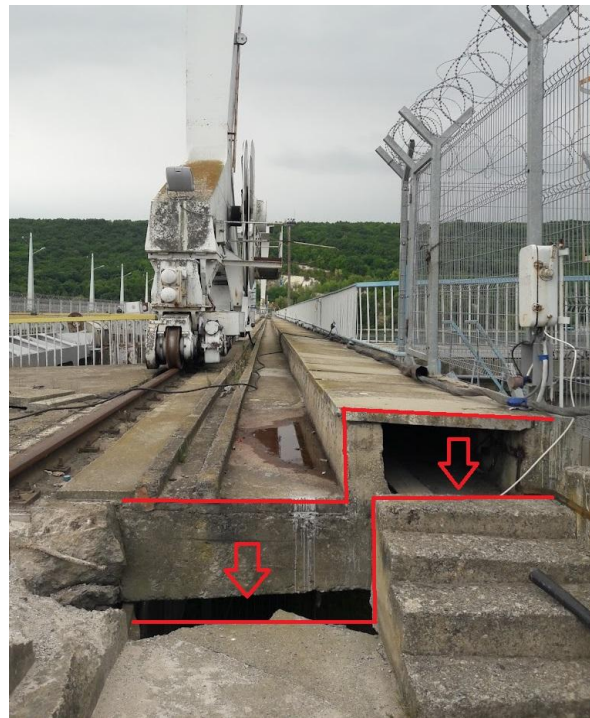


Рис. 3. Тріщини та деформації, що проявляються у тілі греблі Дністровської ГЕС-1 (осінь 2019 р.)

У світі активно здійснюють моніторинг аналогічних об'єктів гідроенергетики із різною структурою та формою дамб [Behr, et al., 1998; Dardanelli, et al., 2014; Yavaşoğlu, et al., 2018; Barzaghi, et al., 2018]. Одним із перших вдалих експериментів із забезпечення надійності моніторингу гребель дамб методом ГНСС є дослідження греблі Пакойма у Каліфорнії, США [Behr, et al., 1998]. Зміна рівня води у водосховищах, визначена згідно із оцінками поверхні води за даними дистанційного зондування, показує кореляційний взаємозв'язок зі зміщеннями греблі, яка його

утворює, за ГНСС даними [Dardanelli, et al., 2014]. Дослідження стійкості греблі та аналіз, виконаний за серіями ГНСС спостережень та за даними тахеометричного знімання греблі Ататюрк у Туреччині, дали змогу виділити ділянки, які зазнають найбільших деформацій [Yavaşoğlu et al., 2018]. Виконавши оцінку та порівняння деформації греблі в Італії з використанням класичних і ГНСС методів, Barzaghi, et al., [2018] доходять висновку, що ГНСС моніторинг є достатньо надійним методом моніторингу гідроспоруд.

ПАТ “Укргідроенерго” з метою підвищення безпеки греблі Дністровської ГЕС-1 впровадило автоматизовану систему контролю стану гідротехнічних споруд [Бисовецький та ін., 2011], складовою якої є “Стационарна система моніторингу просторових зміщень споруд” (ССМПЗС). ССМПЗС – сучасний складний програмно-апаратний комплекс, у який входять мультисистемні ГНСС приймачі, роботизовані електронні тахеометри, прецизійні інклінометри та телекомунікаційне обладнання [Третьак та ін., 2016]. Призначення цієї мережі – математичне опрацювання і визначення достовірних параметрів зміщень і деформацій бетонних та ґрунтових гребель у режимі реального часу. [Могильний та ін., 2010]. Для контролю, окрім визначення параметрів деформацій у реальному часі та з метою визначення поля швидкостей пунктів мережі, здійснюється додаткове постопрацювання даних. У цьому дослідженні ми зосередилися на розгляді й детальному аналізі впливу NTAL на ГНСС мережу ССМПЗС Дністровської ГЕС-1 для встановлення їх кінематики та реакції на атмосферні навантаження.

Об’єктом дослідження є Дністровська ГЕС-1, а предметом – її моніторинг за даними ГНСС мережі ССМПЗС Дністровської ГЕС-1 (рис. 4, 5). Для дослідження використано просторово-часові ряди 14 ГНСС станцій мережі. Кожен пункт обладнаний ГНСС приймачем Leica GMX902 GG з антеною AR10. Опорними пунктами ССМПЗС Дністровської ГЕС-1 є пункти DSR1 і DSR2, розташовані на правому березі й найвіддаленіші від бетонної греблі. Їх додатково обладнано роботизованим тахеометром TM30 та метеорологічним датчиком DTM для здійснення регулярного моніторингу методами тахеометрії.

Пункти, які розташовані безпосередньо на греблі, маркуються MP01-MP06. Дослідження [Третьак та ін., 2021, Tretyak et al., 2021] підтверджують спільну кінематику для пунктів MP02-MP05, натомість кінематика часової серії пункту MP01 відрізняється від них за результатами ГНСС аналізу. Пункти ACP1-ACP2 є точками активного контролю, а пункти WP1-WP4 доповнюють геометрію ГНСС мережі.



Рис. 4. Мережа геодезичних пунктів ССМПЗС Дністровської ГЕС-1



а



б



в

Рис. 5. Загальний вигляд ГНСС пунктів DSR1 і DSR2 (а), ACP1-ACP2 (б) та MP01-MP06 (в)

Геологічне положення Дністровської ГЕС-1

Дністровська ГЕС-1 в геологічному плані розташована на південно-західній окраїні Східноєвропейської платформи (СЄП). Коротко опишемо геологічну будову Дністровської ГЕС-1 за даними роботи [Геологічна карта, 2008]. Фундамент СЄП у районі Дністровської ГЕС-1 складений протеро-

зойськими гранітами бердичівського ультраметаморфічного комплексу (γmPR1bd), представленими біотитовими гранітами та мігматитами. Зі стратиграфічною та кутовою незгідністю ці інтрузивні утворення перекриваються вендськими утвореннями, що об'єднуються у декілька стратиграфічних підрозділів – світ – грушківську ($V1gr$), могиливіську ($V2mg$), яришівську ($V2jr$), нагорянську ($V2ng$) данилівську ($V2dn$). В літологічному аспекті ці стратиграфічні комплекси представлені пісковиками, алевролітами та аргілітами. Переважають алевроліти та аргіліти. Залягання цих комплексів близьке до горизонтального із незначним падінням на південний захід. Вендські відклади в досліджуваному районі перекриваються мезозойськими, що виділені у незвиську та пелипчанську світи нижньокрейдового крейдового періоду ($K1-2nz+pl$). Вони складені кварц-глауконітовими пісковиками, пісками, вапняками. Вік незвиської світи на підставі фауністичних решток визначений як сеноманський, озаринецька світа ($K2oz$) складена вапняками із прошарками глин та стяжіннями кремнію. Неогенові утворення утворені породами баденського ($N1pd$) та сарматського ($N1p+v$) віків. Порооди бадену складаються із пісків та пісковиків, у верхній частині – глинистих пісковиків. Сарматські відклади представлені різними генетичними типами – морськими, лагунними та континентальними, літологічно глинами, пісками та вапняками. Наймолодші утворення в досліджуваному регіоні – алювіальні відклади четвертинного віку.

Описані вище породи розбиті системою розривних порушень північно-західної та південно-східної орієнтації. Ці розломи головно належать до скидів. Також попередніми дослідженнями тут виявлено доволі густу сітку лінеamentів [Bubniak, et al., 2020].

Район належить до активних у тектонічному плані та потрапляє у перехідну зону між ізосейтами в 6 і 7 балів. Також потрібно зазначити, що наповнення водосховища зумовлює підвищення рівня тиску бортів долини Дністра і призводить до прогину ложа та збільшення нахилу схилів, спричиняючи корові землетруси [Сарнавський, & Овсянников, 2005]. Сучасне вивчення зміщень добових розв'язків за вимірами ГНСС та аналіз даних сейсмостанцій під час продовження будівництва, введення нових агрегатів та експлуатації Дністровської гідроакумулюючої станції також дають змогу простежити підвищення локальної сейсмічної активності в досліджуваному регіоні [Savchyn, & Pronyshyn, 2020].

Стратегія опрацювання ГНСС даних

Вихідними даними є добові RINEX-файли мережі ГНСС станцій ССМПЗС Дністровської ГЕС-1 з інтервалом запису даних 30 с. Для обчис-

лення добових координат ГНСС станцій використано автоматичний модуль Bernese Processing Engine та стратегію RNXTtoSNX у програмному забезпеченні Bernese GNSS Software версія 5.2 [Dach, et al., 2015]. Як референсні ГНСС станції вибрано станції мережі IGS довкола Дністровської ГЕС-1, які стабільно працювали у цей період. Результатом обчислень є мережеве рішення за стратегією подвійних різниць.

Під час опрацювання враховано моделі припливних навантажень, але поправки за вплив неприпливного океанічного та атмосферного навантаження за моделями окремо не вводили. Тому ці ряди ГНСС координат доречно порівнювати із моделями неприпливних навантажень. Оскільки ГНСС станції у дослідженні розташовані далеко від берегів океанів чи морів, то вплив неприпливного океанічного навантаження є слабким. Тому в цьому дослідженні ми ним нехтуємо.

Висотний зсув з 23 по 30 грудня 2019 р.

Аналіз впливів геодинамічного явища, яке проявилось у кінці грудня 2019 р., свідчить, що в межах Європейського континенту відбувся висотний зсув, який сягає просідань до 30 мм впродовж 5–10 днів [Brusak, & Tretiyak, 2020]. У дослідженні [Brusak, & Tretiyak, 2021] встановлено, що для ГНСС станцій на відстані менше ніж 100 км мережі Geoterrace, а саме CRNT (Чернівці), BLZT (Більче-Золоте) та GORD (Городок) такі просідання сягають 16–19 мм (див. рис. 1), що в межах похибок відповідає моделі NTAL. У 2019 р. перманентної ГНСС станції безпосередньо поблизу Дністровської ГЕС-1 ще не було встановлено. Розглянувши модельні значення NTAL для цього регіону, бачимо, що вони не збігаються із просіданням пунктів мережі ССМПЗС Дністровської ГЕС-1. На рис. 6 показано графіки висотних рядів ГНСС станцій DSR1, ACP1, ACP2 та MP03 із відповідним модельним значенням NTAL у цьому регіоні.

Відповідно для усіх пунктів мережі побудуємо карту висотного зсуву пунктів мережі за 23–30 грудня 2019 р. (357–364-й день року), оскільки цей період відповідає найбільшому зменшенню NTAL. Карту висотного зсуву пунктів ГНСС мережі за 23–30 грудня 2019 р. подано на рис. 7.

Аналізуючи рис. 7, бачимо, що пункти по-різному відреагували на пружні деформації, спричинені NTAL. Зокрема, найбільші просідання становлять 6–8 мм для пунктів DSR1, ACP1, WP04, ACP2. Проте пункти греблі MP02–MP04 просіли на 4 мм. Найменші просідання для пунктів WP01, WP03, DSR2 – 2–3 мм. Це можна частково пояснити геологічною будовою території

та інженерною конструкцією споруди. Зокрема, пунктам із більшим просіданням відповідають структури, що залягають на породах венду, у яких природне залягання із тріщинами і які відповідно піддатливіші до просідань, на відміну від бетонної греблі, яка стоїть на гранітах. Детальний аналіз геологічної будови з відповідними профілями наведемо далі.

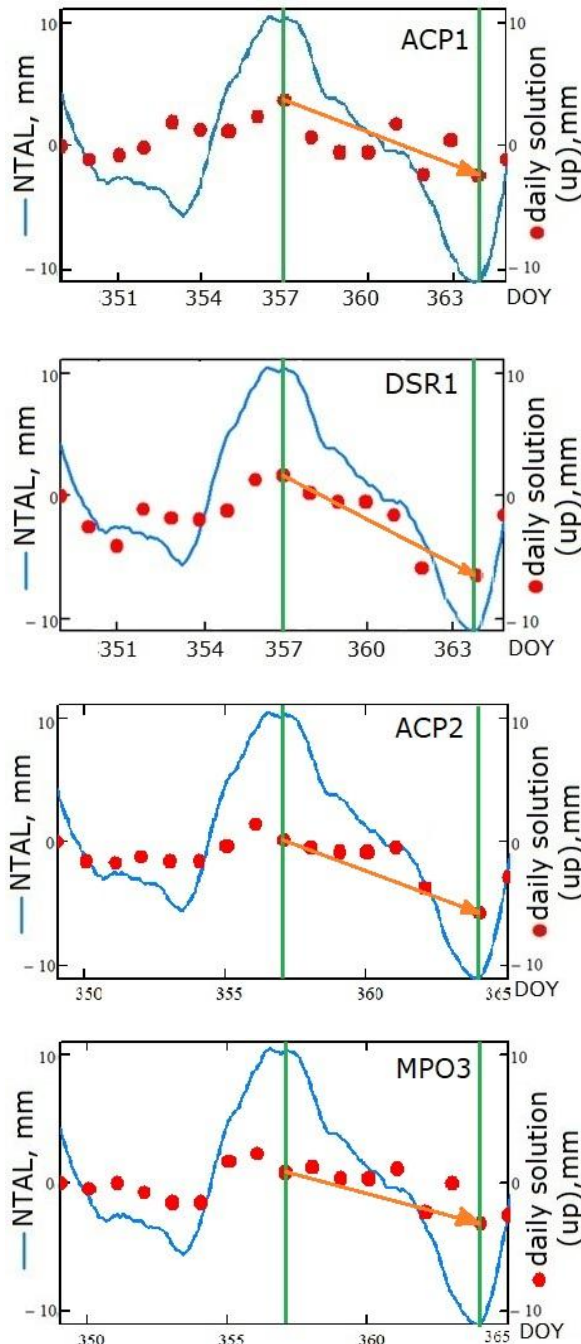
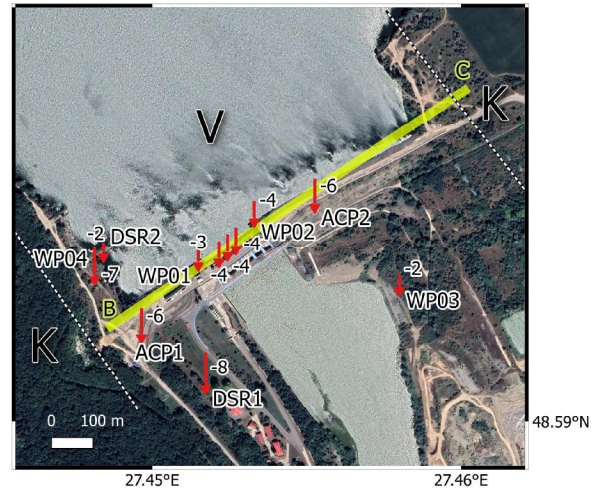


Рис. 6. Часовий висотний ряд ГНСС станцій DSR1, ACP1, ACP2, MPO3 Дністровської ГЕС-1 та неприпливного атмосферного навантаження (NTAL) за 15–31.12.2019 (349–365-й день року)



DSR1 - назва ГНСС станції, - величина висотного зсуву (просідання),



Інженерно-геологічний профіль (рис. 16)

Вік відкладів: V - венд K - крейда

Рис. 7. Карта висотного зсуву пунктів ГНСС мережі за 23–30 грудня 2019 р.

Висотний зсув за 9–18 лютого 2021 р.

У лютому 2021 р. відбувся висотний зсув, подібний до грудневого 2019 р., проте вдвічі слабший за амплітудою, що також підтверджується моделями NTAL [VMF, ESMGFZ]. У 2021 р. в досліджуваному регіоні вже було встановлено кілька нових станцій мережі Geoterrace, зокрема перманентна ГНСС станція NDST (Новодністровськ), безпосередньо поблизу (до 2 км) Дністровської ГЕС-1. Також розглянуто станції KLMN, GORD, VOVK мережі Geoterrace та станції TULC, EDIN, SORO, які опрацьовує мережа System Solutions. (<https://systemnet.com.ua/>). Розташування ГНСС станцій показано на рис. 8. RINEX-файли вимірів цих станцій за вказаний період також опрацьовано у Bernese GNSS Software.

На цих ГНСС станціях помітна кореляція між висотними зміщеннями станцій та впливом неприпливного атмосферного навантаження у період з 9 до 18 лютого 2021 р. (40–49-й день року).

Для прикладу на рис. 9 подано висотні часові ряди ГНСС станцій EDIN, KLMN, VOVK та TULC, зсув на яких збігається або близький до модельного значення NTAL за цей період.

На рис. 10 наведено часовий висотний ряд ГНСС станцій NDST, DSR1, ACP2, WP02 та неприпливного атмосферного навантаження (NTAL).

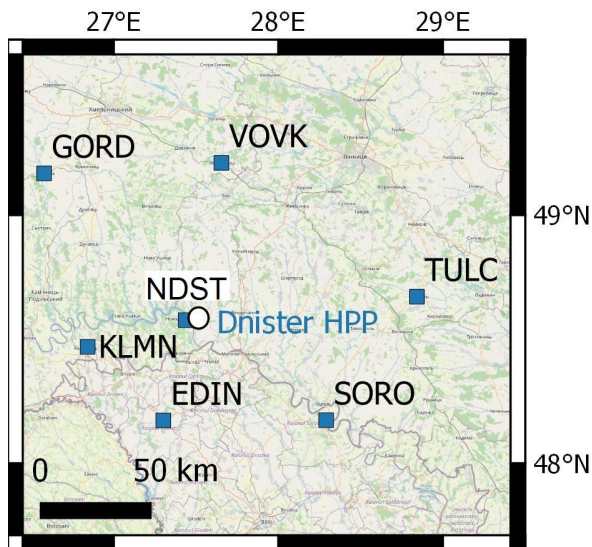


Рис. 8. Перманентні ГНСС станції довкола Дністровської ГЕС-1, у часових серіях яких зафіксовано висотний зсув, що корелює з NTAL

Порівнюючи висотний зсув між перманентною ГНСС станцією NDST та станціями KLMN і VOVK, помічаємо спільну кінематику їх реакції на деформації, спричинені NTAL. Натомість, аналізуючи висотний зсув станцій NDST та DSR1, ACP2, WP02, можна помітити,

що динаміка їх висотного зміщення різна: висота станції за 9–18 лютого 2021 р. (40–49-й день року) поступово зменшується, навіть незважаючи на те, що модельне значення NTAL свідчить про короточасне зменшення навантаження на земну поверхню, натомість станція DSR1 зазнає менших просідань. Така динаміка схожа для більшості ГНСС станцій на Дністровській ГЕС-1.

На рис. 11 подано карту висотного зсуву пунктів мережі за 9–18 лютого 2021 р. (40–49-й день року).

З метою підтвердження цих просідань альтернативним способом розглянуто зміщення пунктів CP01-CP18. Ці пункти обладнано відбивачами, які моніторить з пункту DSR1 роботизований тахеометр Leica TM30 із інтервалом 6 год. Розташування пунктів показано на рис. 12, пункти CP01-CP06 розташовані у тілі греблі з боку нижнього б'єфу, а пункти MP01-MP06 – на гребені греблі.

Загалом динаміка зміщень усіх пунктів CP01-CP18 схожа на динаміку просідань ГНСС станцій MP02-MP05. Для прикладу на рис. 13 показано пункти CP04 та MP04, які розташовані на одній секції греблі.

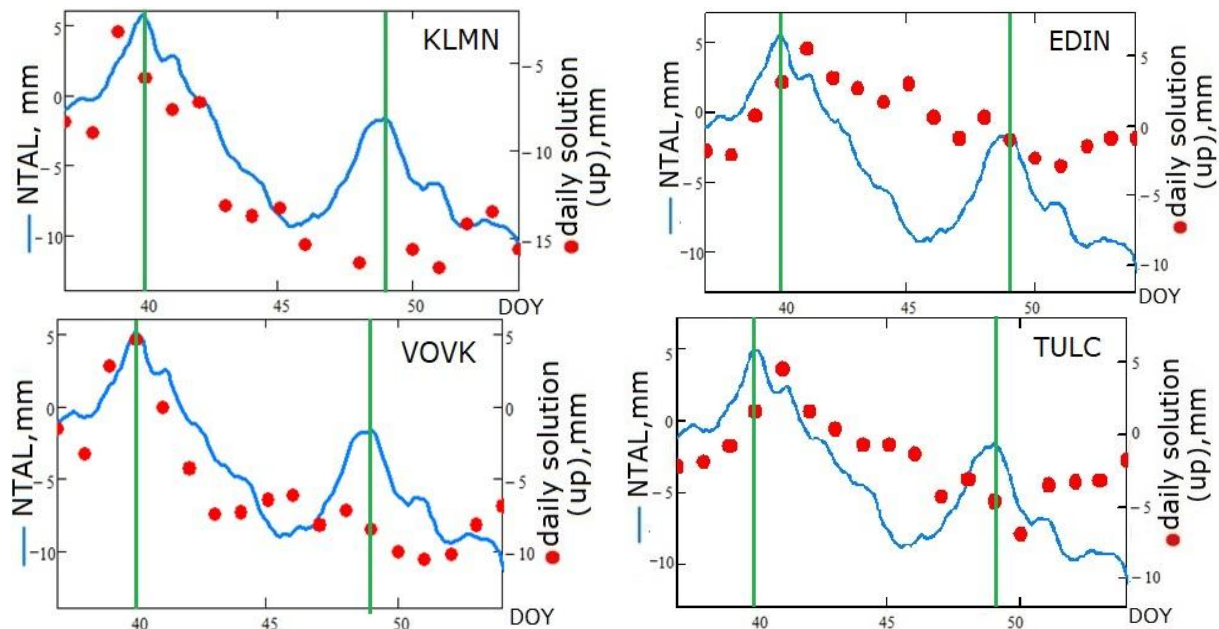


Рис. 9. Часовий висотний ряд ГНСС станцій EDIN, KLMN, VOVK, TULC та неприпливного атмосферного навантаження (NTAL) за 6–23.02.2021 (37–54-й день року)

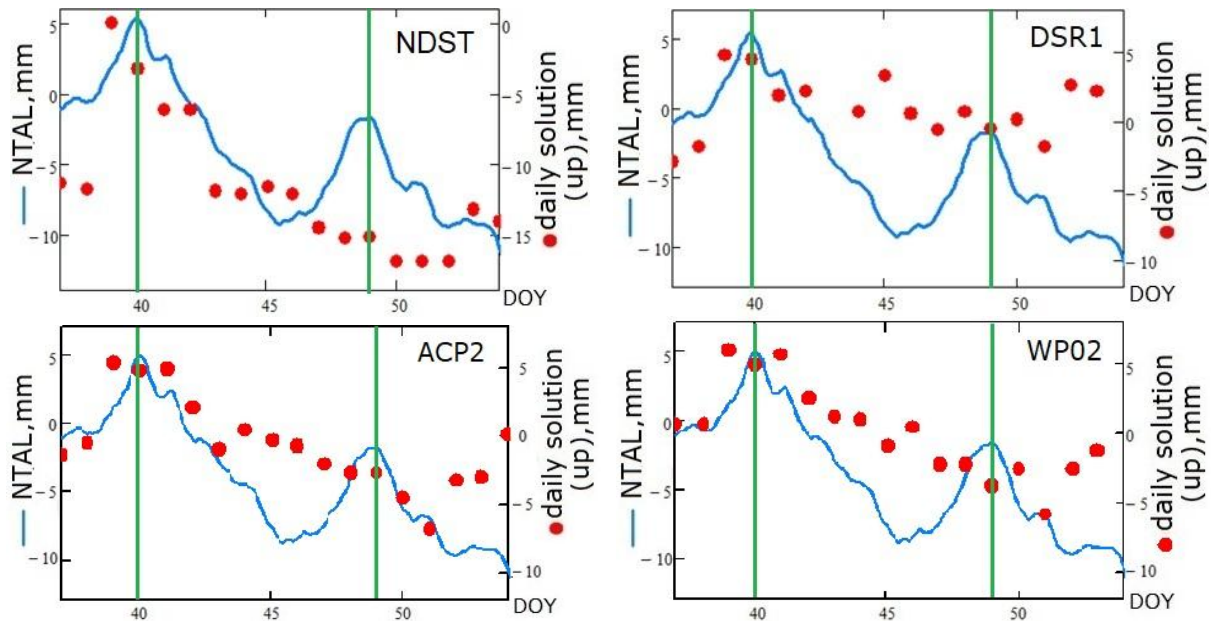
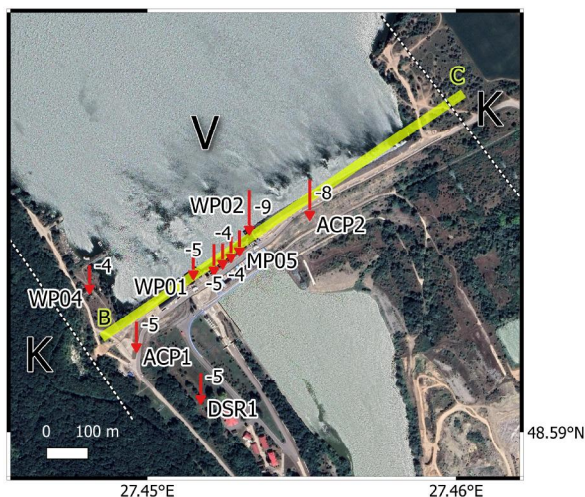


Рис. 10. Часовий висотний ряд ГНСС станцій NDST, DSR1, ACP2, WP02 та неприпливного атмосферного навантаження (NTAL) за 6–23.02.2021 (37–54-й день року)



DSR1 – назва ГНСС станції, **-8** – величина висотного зсуву (просідання),

 – Інженерно-геологічний профіль (рис. 16)

Вік відкладів: **V** – венд **K** – крейда

Рис. 11. Карта висотного зсуву пунктів мережі за 9–18 лютого 2021 р.

У таблиці наведено характеристики висотного зсуву пунктів ГНСС мережі Дністровської ГЕС-1. Виконано оцінку точності тренду висотного зсуву. Середні квадратичні похибки – 2–3 мм, що для більшості пунктів становить половину від величини зсуву.

Висотний зсув пунктів на лівому березі ACP2 та WP02 за 9–18 лютого 2021 р. (40–49-й день року) становив –8 та –9 мм, що вдвічі більше за висотний зсув пунктів греблі та правого берега.

Ці зміщення впливатимуть на результати та точність прецизійних інженерно-геодезичних робіт, які систематично ведуться на території ГЕС, особливо під час прояву NTAL, оскільки відстані між пунктами із різним висотним зсувом (3–5 мм) у межах 100–500 м. Різниця висотного зсуву сусідніх геодезичних пунктів у разі перевищують можливі похибки високоточного нівелювання I та II класів чи необхідної точності для деяких монтажних робіт зі встановлення спеціального обладнання. Тому для великих інженерних об'єктів варто застосовувати спеціальні моделі чи поправки для врахування NTAL, які потрібно вводити геологічну основу об'єкта спостережень. Висотний зсув геодезичних пунктів на берегах також вдвічі більший, ніж пунктів греблі, за 23–30 грудня 2019 р. Ця закономірність проілюстрована тим, що більша частина тріщин та просідань греблі (див. рис. 3) розташована головню у зонах контакту греблі та берега.

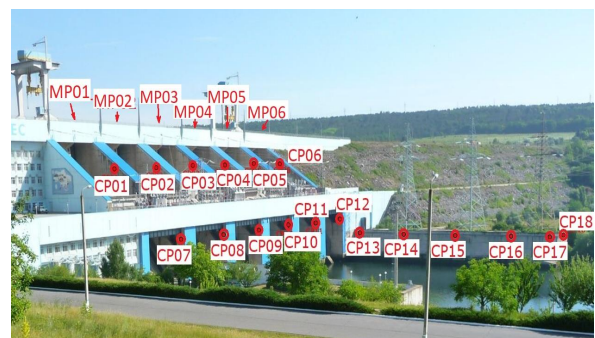


Рис. 12. Просторове розміщення пунктів CP01–CP18, координати яких визначаються лінійно-кутовими методами (вигляд із пункту DSR1)

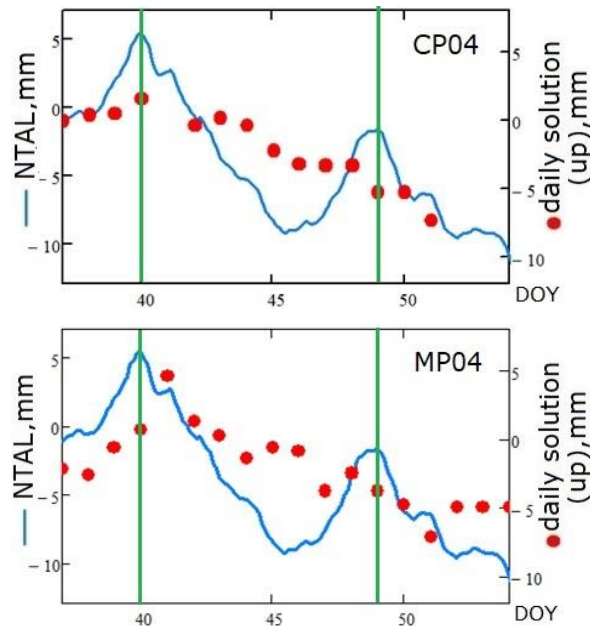


Рис. 13. Часовий висотний ряд ГНСС станції MP04 відбивача CP04 та неприпливного атмосферного навантаження (NTAL) за 6–23.02.2021 (37–54-й день року)

Висотний зсув пунктів ГНСС мережі Дністровської ГЕС-1

Назва ГНСС станції	Висотний зсув (23–30 грудня 2019), мм	Висотний зсув (9–18 лютого 2021), мм
ACP1	–6,1	–4,8
ACP2	–5,8	–7,5
DSR1	–8,1	–5
DSR2	–2,1	*
MP02	–3,8	–5,2
MP03	–4,1	–3,6
MP04	–4,1	–4,5
MP05	*	–3,6
WP01	–3,3	–4,6
WP02	–3,8	–8,7
WP03	–2,4	*
WP04	–7,1	–4,2

* Недостатньо даних за період спостережень через завади під час ремонтних та регламентних робіт, зокрема руху вузлового крана.

Також ми проаналізували зміни рівня води у верхньому водосховищі та динаміку вертикальних зміщень ГНСС станцій. На нашу думку, підвищення рівня води у верхньому водосховищі повинно чинити більший тиск на дамбу, і висота ГНСС станцій зменшуватиметься. Такі зміни рівня води сягають 5–7 м у річному циклі. Проте за 2019–2021 рр. не виявлено взаємозв'язку динаміки вертикальних зміщень пунктів на греблі та зміни рівня води.

Взаємозв'язок зміщень та геологічної будови території

З метою аналізу відмінності динаміки зміщень між перманентною ГНСС станцією NDST та пунктами мережі Дністровської ГЕС-1 ми побудували геологічний профіль за точками ABC на підставі даних геологічної карти регіону [Геологічна карта, 2008]. На рис. 14 наведено положення профілю на топокарті місцевості.

Довжина профілю ABC становить 3000 м, з яких частина АВ – 1800 м, ВС – 1200 м. Профіль простягається із Пд.-Зх на Пн.-Сх. Геологічний профіль по лінії ABC показано на рис. 15, а на рис. 16 – інженерно-геологічний профіль по лінії ВС.

З рис. 15 видно, що ГНСС станції NDST розташовані на відкладах (зверху донизу) неогену, крейди, венду, які залягають на фундаменті СЄП, представленому протерозойськими гранітами. Натомість станції ГНСС мережі Дністровської ГЕС-1 розміщені на вендських відкладах. З інженерно-геологічного профілю зрозуміло, що основа греблі (див. рис. 16, пункти MP01-06) розміщена на перешаруванні алевролітів, аргілітів та пісковиків.

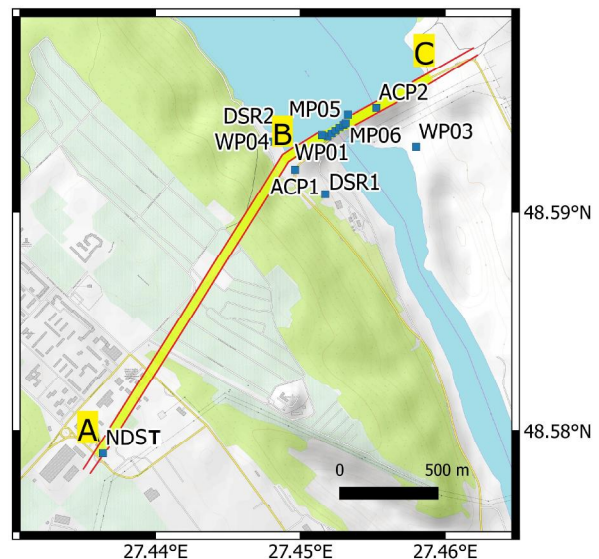


Рис. 14. Положення профілю ABC на карті місцевості

Є відмінність у значеннях висотних зміщень, зафіксованих під впливом NTAL для станції NDST та ГНСС станцій мережі Дністровської ГЕС-1. Необхідно з'ясувати, що є причиною цих відмінностей. За 9–18 лютого 2021 р. ГНСС станція NDST зазнала просідання близько 15 мм, а станції ГНСС мережі Дністровської ГЕС-1 – 4–8 мм. На нашу думку, це можна пояснити тим, що породи венду доволі щільні (алевроліти, аргіліти, частково пісковики). Вони залягають на гранітах. А породи неогену і крейди представлені вапняками, пісками, глинами, які мають істотно інші фізичні властивості щодо пружних деформацій (ущільнення).

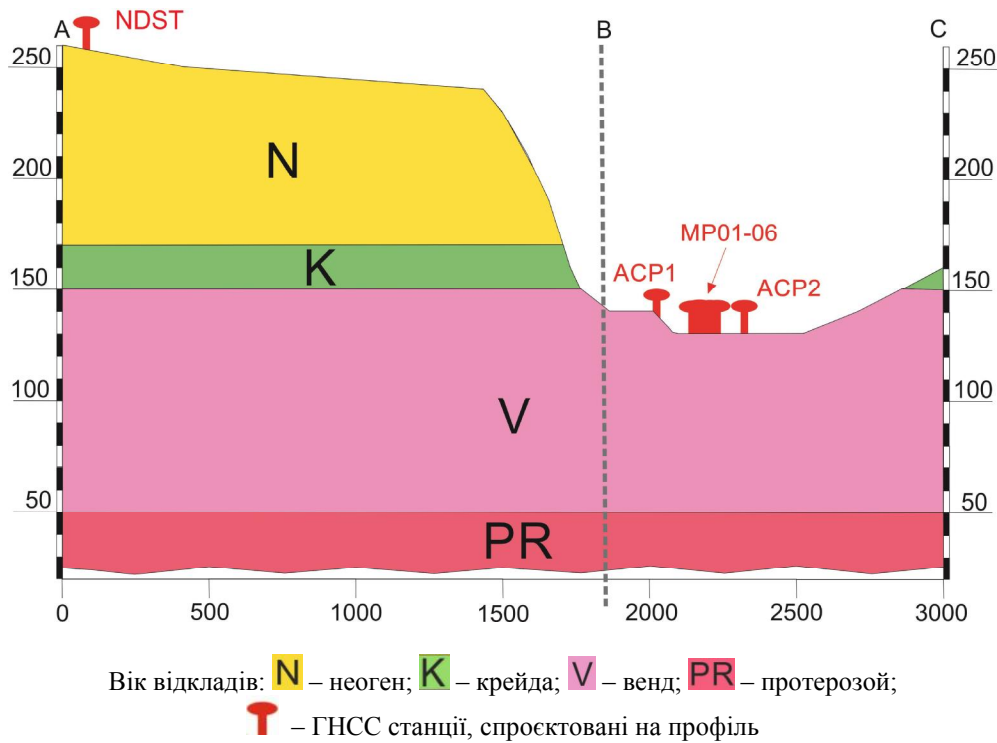


Рис. 15. Геологічний профіль по лінії ABC та схематичне зображення залягання відкладів за віком, за [Геологічна карта, 2008]

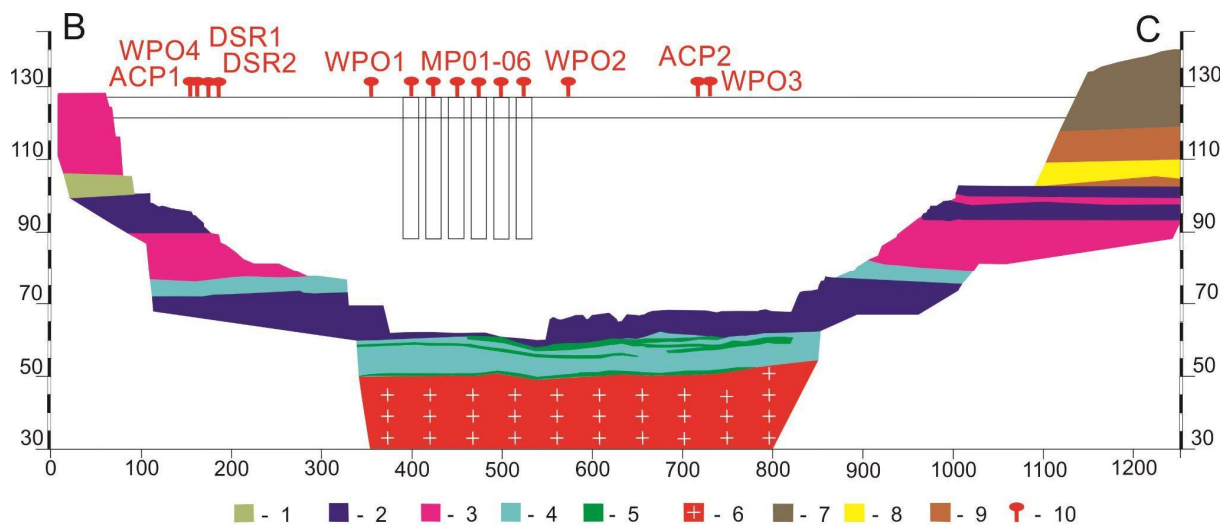


Рис. 16. Інженерно-геологічний профіль по лінії BC, паралельно до дамби греблі Дністровської ГЕС-1, за матеріалами [ПАТ “Укргідропроєкт”, 2017]

Спостерігаються також відмінності щодо висотного зсуву між ГНСС станціями греблі та ГНСС станціями на берегах Дністра. Найменші опускання характерні для станцій греблі (MP01-

06), а опускання на берегах переважно вдвічі більші (DSR1, ACP1, ACP2, WPO2). Знову ж таки, простежується зв'язок пружних деформацій з геологічною будовою. ГНСС станції на греблі

розташовані на умовно монолітній та однорідній бетонній конструкції, яка до того ж встановлена на граніти, на яких залягають малопотужні (15 м) вендські відклади. ГНСС станції на берегах розміщені на гірських породах вендського віку завтовшки 80 м. Ці породи перешаровуються (алевроліти, аргеліти, пісковики), у багатьох випадках розколоті тріщинами. Зазначені фактори впливатимуть на динаміку деформацій та нерівномірного просідання. А це, своєю чергою, призводить до утворення тріщин та руйнувань тіла дамби в зонах контакту з берегами.

Висновки

1. За результатами досліджень встановлено та проаналізовано зміщення ГНСС пунктів моніторингової мережі Дністровської ГЕС-1, спричинені неприпливним атмосферним навантаженням у грудні 2019 р. та лютому 2021 р. Встановлено, що пункти мережі Дністровської ГЕС-1 зазнають менших змін висоти, ніж перманентні ГНСС станції в радіусі 100 км. Показано, що це відповідає різниці потужностей та щільності гірських порід під відповідними пунктами, які зазнають різних пружних деформацій під впливами однакового навантаження NTAL.

2. Встановлено диференціацію висотного зсуву ГНСС станцій, розташованих на різних об'єктах Дністровської ГЕС-1 (гребля та береги). Значення просідань пунктів на греблі менші, ніж модельні значення NTAL. Це зумовлено тим, що для модельних значень NTAL використовують середню густину Землі, а пункти греблі розташовані на щільних породах венду (алевролітах, аргілітах, частково пісковиках), які залягають на гранітах. Крім цього, дані ГНСС підтверджуються системою моніторингу лінійно-кутових вимірів. Неоднорідність динаміки пунктів, очевидно, призводить до тріщин, зафіксованих у конструктивних елементах ГЕС, особливо в ділянках контакту греблі з берегом.

3. Ми припускаємо, що оскільки геодезична основа неоднорідно реагує на NTAL, то це призводить до зміни перевищень між пунктами і впливає на точність прецизійних інженерно-геодезичних робіт, які виконують на об'єкті у такі періоди. Важливим питанням є аналіз впливу NTAL на виконання робіт, пов'язаних із високоточним визначенням висот. На нашу думку, під час аномального впливу NTAL висоти навіть близько розташованих пунктів можуть змінитися, якщо геологічна будова під ним різна. Але вплив інших факторів не можна виключати. У дослідженні виявлено, що пункти, між якими близько 100–500 м, зазнають різних просідань. Такі різниці висотних зсувів пунктів сягають 3–5 мм, що

значно перевищує допуски для високоточного нівелювання на такі відстані.

4. На основі виконаних досліджень припускаємо, що варто застосовувати спеціальні моделі для врахування NTAL для інженерних об'єктів зі складною геологічною будовою. Необхідні також подальші дослідження на території інших ГЕС України.

Список літератури

- Бисовецкий Ю. А., Третьак К. Р., Щучик Э. С. Автоматизация геодезических наблюдений за гидротехническими сооружениями гидроэлектростанций Укрэнерго. *Гідроенергетика України*, 2011. Вип. 2. С. 45–51.
- Геологічна карта України, Масштаб 1:200 000. Волино-Подільська серія, М-35-XXVIII (Бар), М35-XXXIV (Могиливі-Подільський). 2008. Пояснювальна записка.
- Калинников В. В., Устинов А. В., & Косарев Н. С. Влияние атмосферных нагрузок на результаты спутникового мониторинга здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 методом PPP. *Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)*, 2020. Вип. 25(3), 34–41. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-34-41
- Могилий С., Шоломицкий А., Шморгун Е., Пригаров В. Автоматизированная система геодезического мониторинга. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 2010. Вип. 19. С. 193–197.
- ПАТ “Укргідропроєкт”. Правила експлуатації водосховищ Дністровського каскаду ГЕС і ГАЕС при НПР 77,10 м буферного водосховища. 2017. 732-39-Т48. 106 с.
- Сарнавський В., Овсянніков М. Тектонічна структура і геодинамічний режим масивів порід у зоні взаємодії з гідротехнічними спорудами ГЕС і ГАЕС (на прикладі Дністровського комплексного гідровузла). *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2005. С. 193–206.
- Третьак К. Р., Брусак І. В. Метод виявлення короткотривалих зміщень земної поверхні за статистичним аналізом часових серій GNSS станцій. *Геодезія, картографія та аерофотознімання*, 2021. Вип. 93(1). С. 27–34. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2021.93.027>.
- Третьак К. Р., Савчин І. Р., Заяць О. С., Голубінка Ю. І., Ломпас О. В. та Бісовецкий Ю. Встановлення та супровід автоматизованих систем контролю просторових зміщень інженерних споруд українських гідроелектростанцій. *Гідроенергетика України*, 2017. С. 33–41.
- Третьак К. Р., Заяць О. С., Смірнова О. М. Створення автоматизованої системи геодезичного моніторингу деформацій. *Матеріали VI Між-*

- народної наукової конференції “Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища”, 2016. С. 272–275.
- Третяк К. Р., Краненброк Д. Ж., Балан А. Ю., Ломпас О. В., Савчин І. Р. Апостеріорна оптимізація точності та надійності активної геодезичної мережі моніторингу Дністровської ГЕС. *Геодезія, картографія та аерофото-знімання*, 2014. Вип. 79. С. 5–14.
- Третяк, К., Корлятович, Т., Брусак І., Смірнова О. Диференціація кінематики греблі Дністровської ГЕС-1 (за даними ГНСС-моніторингу просторових зміщень). *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2021. Вип. 42. С. 57–66. DOI: www.doi.org/10.33841/1819-1339-2-42-57-66.
- Barzaghi, R., Cazzaniga, N. E., De Gaetani, C. I., Pinto, L., & Tornatore, V. (2018). Estimating and comparing dam deformation using classical and GNSS techniques. *Sensors*, 18(3), 756. <https://doi.org/10.3390/s18030756>.
- Behr, J. A., Hudnut, K. W., & King, N. E. (1998, September). Monitoring structural deformation at Pacoima dam, California using continuous GPS. In *Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1998)*, 59–68.
- Brusak, I., & Tretyak, K. (2020, December). About the phenomenon of subsidence in continental Europe in December 2019 based on the GNSS stations data. In *International Conference of Young Professionals “GeoTerrace-2020”* (Vol. 2020, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20205717>
- Brusak, I., & Tretyak, K. (2021, October). On the impact of non-tidal atmospheric loading on the GNSS stations of regional networks and engineering facilities. In *International Conference of Young Professionals “GeoTerrace-2021”*. European Association of Geoscientists & Engineers.
- Bubniak, A. M., Bubniak, I. M., & Zyhar, A. I. (2020, May). Lineaments analysis of the Dnister area (between Bakota and Novodnistrovsk). In *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*. (Vol. 2020, No. 1, pp. 1–4). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo110>.
- Dach, R., Böhm, J., Lutz, S., Steigenberger, P., & Beutler, G. (2011). Evaluation of the impact of atmospheric pressure loading modeling on GNSS data analysis. *Journal of geodesy*, 85(2), 75–91. <https://doi.org/10.1007/s00190-010-0417-z>.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., & Fridez, P. (2015). Bernese GNSS software version 5.2.
- Dardanelli, G., La Loggia, G., Perfetti, N., Capodici, F., Puccio, L., & Maltese, A. (2014, October). Monitoring displacements of an earthen dam using GNSS and remote sensing. In *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVI* (Vol. 9239, pp. 923–928). International Society for Optics and Photonics. <https://doi.org/10.1117/12.2071222>.
- ESMGfZ; Earth System Modelling at GFZ. Online Access: <http://esmdata.gfz-potsdam.de>.
- Glomsda, M., Bloßfeld, M., Gerstl, M., Kwak, Y., Seitz, M., Angermann, D., & Seitz, F. (2019). Impact of non-tidal loading in VLBI analysis. In *24th Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astrometry*.
- Mémin, A., Boy, J. P., & Santamaria-Gomez, A. (2020). Correcting GPS measurements for non-tidal loading. *GPS Solutions*, 24(2), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10291-020-0959-3>.
- Petrov, L. (2015). The international mass loading service. In *REFAG 2014*, 79–83. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/1345_2015_218.
- Petrov, L., & Boy, J. P. (2003). Study of the atmospheric pressure loading signal in VLBI observations, submitted to *J. Geophys. Res.* DOI: 10.1029/2003JB002500.
- Rodrigues, E. P. (2007). Estimation of crustal vertical movements due to atmospheric loading effects by GPS observations. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25, 45–50. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2007000100004>.
- Savchyn, I., & Pronyshyn R. (2020). Differentiation of recent local geodynamic and seismic processes of technogenic-loaded territories based on the example of Dnister Hydro Power Complex (Ukraine). *Geodesy and Geodynamics*, 11 (5), 391–400.
- Tregoning, P., & van Dam, T. (2005). Atmospheric pressure loading corrections applied to GPS data at the observation level. *Geophysical Research Letters*, 32(22). <https://doi.org/10.1029/2005GL024104>.
- Tregoning, P., & Watson, C. (2009). Atmospheric effects and spurious signals in GPS analyses. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B9).
- Tretyak K., Periy S., Sidorov I., Babi L. (2015). 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*, 9 (1), 83–96.
- Tretyak, K., Korliatovych, T., Brusak, I. (2021, October). Applying the statistical method of GNSS time series analysis for the detection of vertical displacements of Dnister HPP-1 dam. In *International Conference of Young Professionals “GeoTerrace-2021”*. European Association of Geoscientists & Engineers.
- VMF Data Server; editing status 2020-12-14; re3data.org – Registry of Research Data Repositories. <http://doi.org/10.17616/R3RD2H>.

- Yavaşoğlu, H. H., Kalkan, Y., Tiryakioğlu, İ., Yigit, C. O., Özbey, V., Alkan, M. N., Bilgi S. & Alkan, R. M. (2018). Monitoring the deformation and strain analysis on the Ataturk Dam, Turkey. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1), 94–107. DOI: 10.1080/19475705.2017.1411400
- Yue, C., Dang, Y., Xu, C., Gu, S., & Dai, H. (2020). Effects and Correction of Atmospheric Pressure Loading Deformation on GNSS Reference Stations in Mainland China. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/4013150>.

Kornyliy TRETYAK^{1a}, Ivan BRUSAK^{1b}, Ihor BUBNIAK², Fedir ZABLOTSKYI¹

¹ Department of High Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine; ^{1a} <https://orcid.org/0000-0001-5231-3517>; ^{1b} <https://orcid.org/0000-0001-5434-4931>;

^{1c} <https://orcid.org/0000-0003-4107-2994>

² Department of Engineering Geodesy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-3548-8785>

IMPACT OF NON-TIDAL ATMOSPHERIC LOADING ON CIVIL ENGINEERING STRUCTURES

The vertical displacements of GNSS sites of civil engineering structures caused by non-tidal atmospheric loading (NTAL) are analyzed in the study. The object of the study is the Dnister Hydroelectric Power Plant No. 1 (HPP-1) and its GNSS monitoring network. The initial data are RINEX-files of 14 GNSS stations of Dnister HPP-1 and 8 permanent GNSS stations within a radius of 100 km, the NTAL model downloaded from the repository of German Research Centre for Geosciences GFZ for 2019–2021, and materials on the geological structure of the object. Methods include comparison and analysis of the altitude component of GNSS time series with model values of NTAL as well as interpretation of the geodynamic vertical displacements, taking into account the analysis of the geological structure. As the result, it was found that the sites of the GNSS network of Dnister HPP-1 undergo less vertical displacements than permanent GNSS stations within a radius of 100 km. This corresponds to the difference in thickness and density of rocks under the GNSS sites and stations, so they undergo different elastic deformations by the same NTAL. In addition, different dynamics of vertical displacements of GNSS sites on the dam and on the river banks are detected. It leads to cracks and deformations of concrete structures in the dam-bank contact zones. During the anomalous impact of NTAL, the altitude of even nearby sites can change if the geological structure beneath them is different. The work shows that for civil engineering structures it is necessary to apply special models to take into account NTAL deformations for high-precision engineering and geodetic measurements.

Key words: GNSS time series; vertical deformations; non-tidal atmospheric loading; Dnister HPP-1.

Надійшла 10.09.2021 р.