

УДК 528.481+551.242

В. Г. ПАВЛИК<sup>1</sup>, А. М. КУТНИЙ<sup>1</sup>, О. П. КАЛЬНИК<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, вул. Г. Мясоедова, 27/29, Полтава, 36011, Україна, ел. пошта: vgravlyk@gmail.com, тел. 0991715137.

<sup>2</sup> Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, просп. Першотравневий, 24, Полтава, 36011, Україна, ел. пошта: alex.kalnik@gmail.com.

<https://doi.org/10.23939/jgd2019.02.016>

## ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ СЕЗОННИХ ВАРІАЦІЙ ВОЛОГИ ҐРУНТУ НА ВЕРТИКАЛЬНІ РУХИ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

**Метою досліджень** є експериментальне встановлення найсприятливіших умов визначення вертикальних рухів земної поверхні з погляду мінімального впливу варіацій вологи ґрунту на результати спостережень. Геодезичний моніторинг деформаційних процесів на геодинамічних полігонах (ГП) відбувається переважно без урахування впливу екзогенних чинників метеорологічного походження на динаміку земної поверхні та реперів. Для успішного виділення тектонічних чи техногенних рухів із усього спектра зареєстрованих переміщень земної поверхні потрібно вилучити їх гідрометеорологічну складову. Одним із видів метеорологічного впливу на динаміку земної поверхні та реперів є об'ємні деформації набряклих ґрунтів внаслідок варіації їх вологості. Вони зумовлюють сезонні вертикальні рухи, величина яких залежить від фізичних та мінералогічних властивостей ґрунту, особливостей навколишнього середовища та амплітуди річних коливань температури і вологи. **Методика досліджень** передбачала паралельні спостереження у двох пунктах за вертикальними рухами і вологістю верхнього однометрового шару ґрунту на ГП у Полтаві за 2006–2015 рр. **Основним результатом** роботи є встановлення нелінійного характеру дії сезонних змін вологи ґрунту на вертикальні переміщення земної поверхні залежно від абсолютного значення вологості. Якщо вологість ґрунту перевищує його максимальну молекулярну вологомісткість (ММВ), то її варіації не впливають на динаміку Землі. Це пояснюється різним механізмом вертикальної інфільтрації води в ґрунті залежно від його водонасиченості. За значної вологості ґрунту її подальші зміни зумовлені переважно капілярними та гравітаційними силами, які не спричиняють деформацій і вертикальних переміщень земної поверхні. **Науковою новизною** досліджень є встановлення важливої ролі ММВ ґрунту в генерації вертикальних рухів земної поверхні та реперів внаслідок варіацій вологи. **Практична значущість** роботи полягає у можливості мінімізації впливу гідрометеорологічних чинників на результати високоточних спостережень за динамікою земної поверхні. Отримані результати можна використовувати для організації високоточних спостережень за вертикальними рухами на ГП та їх інтерпретації.

*Ключові слова:* повторне нівелювання; сезонні вертикальні рухи земної поверхні; вологість ґрунту; стійкість реперів.

### Вступ

Кількісні просторово-часові характеристики деформаційних процесів, які вивчають на ГП, відображають сумарний вплив тектонічних, техногенних та екзогенних чинників. Для успішної інтерпретації результатів спостережень необхідно розділити окремі складові зареєстрованих рухів земної поверхні.

Екзогенні вертикальні рухи гідрометеорологічного походження можуть бути зумовлені змінами атмосферних та гідрологічних навантажень на поверхню Землі, об'ємними деформаціями ґрунту, які відбуваються внаслідок зміни його температури та вологості. Використовуючи моделі атмосфери та розподілу води на континентальних ділянках Землі, можна обчислити навантаження на земну поверхню і отримати відповідні поля зміщень земної поверхні глобального і регіонального масштабів [Rabbel & Zchau, 1985; Dam et al., 2001; Clarke, 2007].

Об'ємні деформації верхніх шарів ґрунту залежать від фізичного та мінералогічного складу ґрунту, величини варіацій його температури та вологи, рельєфу місцевості, особливостей біологічних процесів життєдіяльності рослин, тощо [Русанов, 1961; Павлик та ін., 1996; Павлик, 2010, 2011; Demoulin, 2004]. Фізичний та мінералогічний склад ґрунту задають потенційні можливості вертикальних переміщень земної поверхні, які реалізуються лише за наявності варіацій гідрометеорологічних факторів. Оскільки метеорологічні параметри змінюються із річною періодичністю, то ця складова домінує у спектрі вертикальних рухів верхніх шарів ґрунту. Сезонні вертикальні коливання корінних порід і піщаних ґрунтів зумовлені переважно варіаціями температури і не перевищують 1 мм [Dong et al., 2002; Павлик, 2010]. Періодичні деформації ґрунтів, до складу яких входять глинисті компоненти, спричинені насамперед коливаннями його вологи і сягають десятків міліметрів [Русанов, 1961, Пав-

лик та ін., 1996; Vittuari, et al., 2015]. Найбільші за величиною сезонні вертикальні переміщення перевищують 100 мм і відбуваються на торф'яних та болотних ґрунтах [Zurowski, 1971; Чимитдоржиев и др., 2013]. Тому ігнорування періодичних переміщень Землі та реперів внаслідок варіації вологи ґрунту може призвести до суттєвих похибок під час визначення кількісних характеристик тектонічних чи техногенних деформацій.

Для вивчення вертикальних рухів використовують три основні методи: повторне нівелювання, GPS спостереження та радарну диференціальну інтерферометрію, яка дає змогу здійснювати моніторинг із міліметровою точністю [Ferretti et al., 2007; Hooreg, et al., 2012]. Успішна інтерпретація спостережень за динамікою земної поверхні потребує стійкості геодезичної основи до гідрометеорологічних впливів або інформації про величини їх часових змін. Часто геодезичні реperi, постаменти GPS апаратури, контрольні точки, які використовують для застосування методу диференціальної радарної інтерферометрії, відтворюють сезонні коливання навколишніх ґрунтів [Nicolas et. al, 2006; Szczerbowski, 2009; Ji, & Hering, 2012]. На основі багаторазового визначення висот реперів вздовж профілю завдовжки 40 км у західній Австралії показано, що для надійного встановлення швидкості вертикальних рухів земної поверхні необхідна інформація про сезонні коливання реперів, особливо у випадку малого інтервалу часу між повторним нівелюванням [Lyon, et al., 2018]. Лише 40 % від фактичної величини річних вертикальних коливань, визначених на основі неперервних GPS спостережень, можна пояснити впливом таких відомих факторів, як океанічні (припливні та неприпливні), атмосферні та гідрологічні навантаження, припливний рух полюса [Dong et al., 2002]. Визначення параметрів сезонної складової переміщень земної поверхні методом повторного нівелювання дало змогу пояснити природу вертикальних рухів за даними радарних інтерферометричних спостережень на Усть-Селенгінському тестовому полігоні [Чимитдоржиев и др., 2013]. Наведені приклади свідчать про важливість інформації про сезонні переміщення верхніх шарів ґрунту для вивчення динаміки земної поверхні геодезичними методами.

Варіації вологи глинистих ґрунтів зумовлюють їх об'ємні деформації та вертикальні переміщення. Вода в ґрунті може перебувати у зв'язаному стані під дією сорбційних сил та у вільному стані під дією капілярних та гравітаційних сил. Варіації кількості зв'язаної води в ґрунті зумовлюють зміни товщини водяних плівок навколо його твердих частинок. Це викликає зміни об'єму ґрунту і, як наслідок, його вертикальні переміщення. До цього процесу залучена лише слабкозв'язана вода, яка переміщується в ґрунті від товстіших плівок до тонших і розсуває його тверді частинки [Цытович, 1973]. Міцнозв'язана (гігроскопічна) вода є постійною величиною для певного виду

ґрунту і так само, як і вільна, що лише заповнює його пори, не здатна викликати деформацій. Співвідношення між зв'язаною та вільною водою значною мірою залежить від гранулометричного складу ґрунту. В грубодисперсних ґрунтах більшість води перебуває у вільному стані, а в тонкодисперсних – у зв'язаному. Тому в піщаних ґрунтах вертикальні рухи внаслідок зміни його вологи фактично відсутні, а в суглинистих та глинистих – сягають великих величин. Максимальну кількість зв'язаної води, яку може утримувати ґрунт, називають його ММВ. Зволоження ґрунту до величини його ММВ відбувається під дією сорбційних сил. Цей процес супроводжується набряканням ґрунту і вертикальним підняттям земної поверхні. Подальше збільшення вологості ґрунту відбувається переважно за рахунок вільної води і не повинно спричинити деформацій земної поверхні. Зменшення вологи ґрунту до величини ММВ також не повинно супроводжуватись його стисканням і опусканням земної поверхні [Фельдман, 1988].

### *Мета*

Мета досліджень – встановлення на основі експериментальних даних залежності між величиною вертикальних переміщень поверхні Землі та зволоженістю верхнього шару ґрунту на ГП у Полтаві. Підтвердження того, що варіації вологи ґрунту, які перевищують його ММВ, мало впливають на вертикальне положення земної поверхні, дасть змогу визначити найсприятливіші умови та періоди виконання геодезичних спостережень. Адже в цьому випадку вертикальні рухи Землі та реперів внаслідок періодичного набрякання та стискання ґрунтів, які реагують на зміну вологи, будуть мінімальними.

### *Методика*

#### **Геодезичні спостереження**

Для реалізації поставленої мети використано результати спостережень на ГП у Полтаві, який створений саме для дослідження впливу локальних гідрометеорологічних чинників на динаміку земної поверхні. В цій роботі ми використали ряди вертикальних рухів верхнього однометрового шару ґрунту за даними щотижневих спостережень методом повторного нівелювання двох поверхневих реперів 5 і 7 за період від червня 2006 р. до грудня 2015 р. Репери 5 і 7 – це бетонні моноліти, висота яких 1 м і діаметр 0,18 м, встановлені у верхньому однометровому шарі ґрунту. Репери розташовані на рівнинній місцевості із трав'янистою рослинністю на відстані 15 м один від одного на середньосуглинистих ґрунтах. Механічний склад верхнього однометрового шару ґрунту поблизу реперів такий: вміст піщаних фракцій (розміром більше ніж 0,05 мм) становить 37 %, пилюватих (розміром 0,05–

0,005 мм) – 45 %, глинистих (розміром менше ніж 0,005 мм) – 11 %, органіки – 7 % [Павлик, 2010].

Раніше ми встановили, що сезонні вертикальні рухи реперів на ГП у Полтаві визначаються інструментальними методами до глибини 4 м від поверхні Землі [Павлик, 1999]. Тому вертикальні переміщення будь-якого нашого поверхневого репера складаються із руху його моноліту у верхньому однометровому шарі ґрунту  $v_{0-1,0}$  та інтегрального руху шарів ґрунту, які розташовані нижче від його основи до глибини 4 м  $v_{1,0-4,0}$ .

Вертикальні переміщення репера 5  $v_5$  можна виразити так:

$$v_5 = v_{0-1,0} + v_{1,0-4,0} \quad (1)$$

Переміщення реперів 5 і 7 визначено щодо вихідного репера А15. Цей репер являє собою циліндричний бетонний моноліт заввишки 30 см, поміщений у свердловину діаметром 18 см на глибині 1,5 м від поверхні Землі. Завдяки обсадній трубі на стійкість цього репера не впливають деформації шарів ґрунту, які розташовані вище від його фундаменту. Сезонні рухи репера А15  $v_{A15,5}$  складаються із переміщень його моноліту на глибині 1,2–1,5 м від поверхні Землі  $v_{1,2-1,5}$  та інтегрального руху шарів ґрунту в діапазоні глибин від 1,5 м до 4 м  $v_{1,5-4,0}$ :

$$v_{A15} = v_{1,2-1,5} + v_{1,5-4,0} \quad (2)$$

Вертикальні переміщення шару ґрунту, який розташований нижче від бетонного моноліту репера 5,  $v_{1,0-4,0}$ , можна розкласти на три окремі складові:

$$v_{1,0-4,0} = v_{1,0-1,2} + v_{1,2-1,5} + v_{1,5-4,0} \quad (3)$$

Сезонний вертикальний рух репера 5 відносно репера А15  $v_{A15,5}$  можна отримати як різницю рівнянь (2) і (3) з урахуванням виразу (3):

$$v_{A15,5} = v_{A15} - v_5 \approx -v_{1,0-1,2} - v_{0-1,0} \quad (4)$$

Рух репера 7 матиме вигляд, аналогічний рівнянню (4).

Отже, щоб на стійкість досліджуваного репера не впливали деформації розташованих нижче шарів ґрунту, низ досліджуваного репера і верх вихідного повинні збігатись. Це твердження справедливе лише в тому випадку, якщо репери розміщені на ділянці із однаковими фізичними властивостями ґрунтів, рельєфом, кліматичними умовами та іншими чинниками, які зумовлюють сезонні вертикальні рухи шарів ґрунту на різних глибинах.

На ГП у Полтаві не вдалось підібрати такий вихідний репер, який би дав змогу повністю виключити динаміку усіх шарів ґрунту, які розташовані нижче від досліджуваних реперів. Але величина сезонних вертикальних рухів шару ґрунту 1,0–1,2 м  $v_{1,0-1,2}$ , за нашими екс-

периментальними даними, не перевищує 5–7 % порівняно із верхнім однометровим шаром  $v_{0-1,0}$ . Це підтверджує рис. 1, на якому показано вертикальні рухи шарів ґрунту 0–0,9 м і 0,9–1,2 м від поверхні Землі, які отримані на ГП у Полтаві у 2017–2018 рр. поблизу реперів 5 і 7.

Тому в наших дослідженнях нехтуємо вертикальними сезонними переміщеннями шару ґрунту на глибині 1,0–1,2 м  $v_{1,0-1,2}$ , які значно менші порівняно з верхнім однометровим шаром.

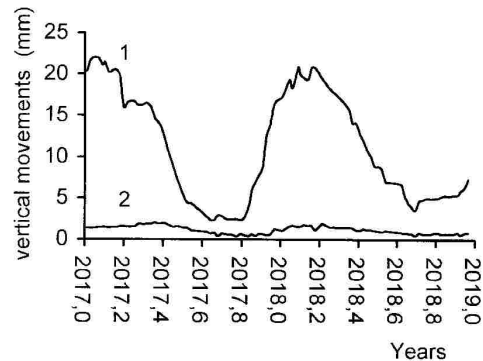


Рис. 1. Вертикальні рухи на ГП у Полтаві у 2017–2018 рр.:

1 – шар ґрунту 0–0,9 м;  
2 – шар ґрунту 0,9–1,2 м

#### Спостереження за вологістю ґрунту

Паралельно із геодезичними спостереженнями на ГП визначали вологість ґрунту абсолютним термогравіметричним методом [Грушка, 2005] до глибини 1 м через кожні 0,1 м поблизу реперів 5 і 7. Цей метод доволі трудомісткий, але його точність висока. Вологість визначають у відсотках маси води до маси сухого ґрунту. Взимку, коли ґрунт перебував у мерзломому стані, вологість не визначали. Моніторинг часових змін вологи ґрунту цим методом передбачає взяття проб ґрунту щоразу в іншому місці. За результатами наших досліджень навіть у точках, які розташовані на відстані всього один метр одна від одної, вологість може відрізнятись на 3–4 %, що значно більше від точності її визначення. Це свідчить про високий ступінь локальності цього гідрологічного параметра. Відносна точність визначення вологи ґрунту на ГП у Полтаві у три–чотири рази нижча, ніж відносна точність вертикальних переміщень земної поверхні за даними спостережень реперів. Тому для зменшення розкиду окремих значень вологи здійснено згладжування вихідних даних усередненням трьох суміжних за часом значень цього параметра.

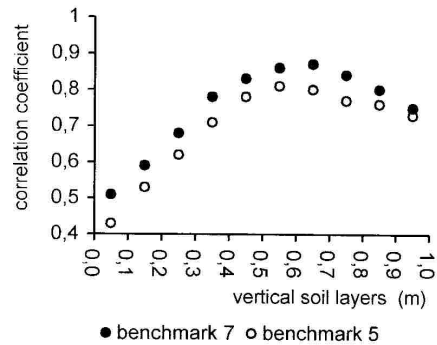
#### Результати

Варіації вологи окремих шарів ґрунту можуть по-різному впливати на інтегральну вертикальну

складову динаміки земної поверхні, отриману на основі спостережень реперів 5 і 7. Для визначення тих шарів ґрунту, деформації яких найбільше впливають на переміщення земної поверхні, визначено коефіцієнти кореляції між відносними вертикальними рухами кожного із реперів, з однієї сторони, та вологістю шарів ґрунту завтовшки 0,1 м, з іншої, – до глибини 1 м включно. Обчислені коефіцієнти кореляції показано на рис. 2.

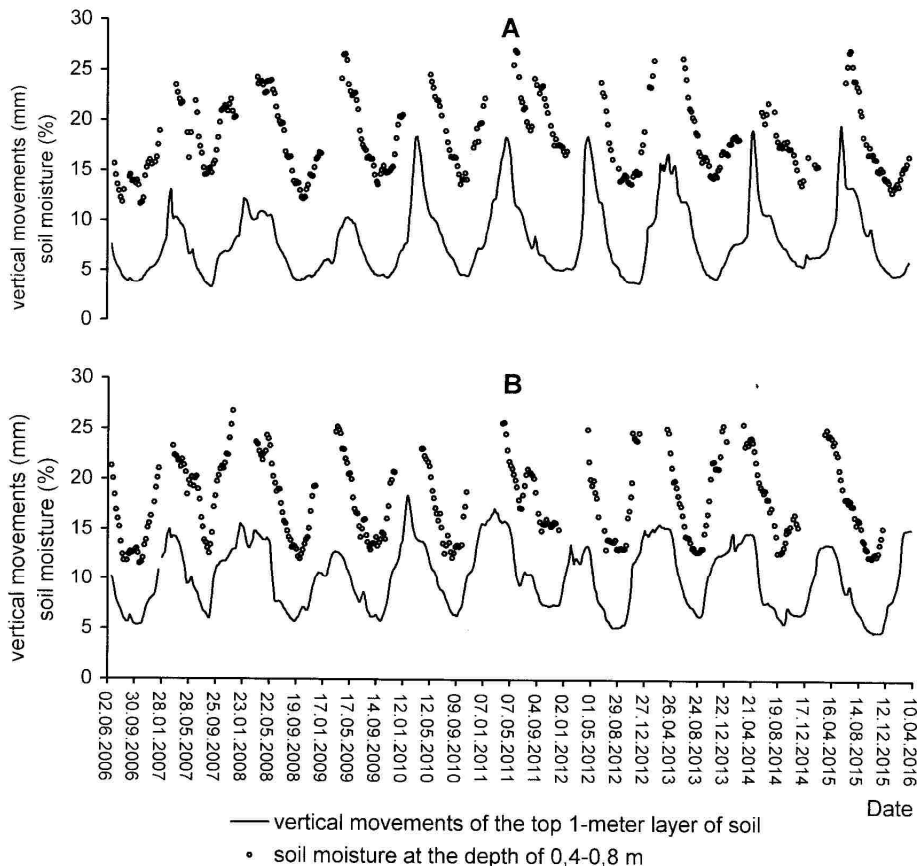
За даними рис. 2 можна зробити висновок, що вертикальні рухи поверхневих реперів зумовлені більшою мірою змінами вологи в шарі ґрунту 0,4–0,8 м. Надійність отриманих емпіричних коефіцієнтів кореляції [Смирнов, Дунин-Барковский, 1965] надзвичайно висока, оскільки середнє квадратичне відхилення кожного із них у межах від 0,02–0,04. Цікавим є також той факт, що вплив варіацій вологи на переміщення репера 7 систематично більший, ніж для репера 5. Цю особливість можна пояснити тим, що репер 7 розміщений на відкритій ділянці місцевості, а 5 – поблизу дерев. Тому витрати вологи ґрунту поблизу репера 5 внаслідок підвищеної транспірації повинні бути більшими порівняно із репером 7,

що й позначається на розподілі отриманих значень коефіцієнтів кореляції.



**Рис. 2.** Залежність коефіцієнтів кореляції між вертикальними рухами реперів 5 і 7 та вологістю шарів ґрунту товщиною 0,1 м в діапазоні глибин 0–1,0 м за період 2006–2015 рр.

На рис. 3 показано вертикальні рухи верхнього однометрового шару земної поверхні за даними повторних десятирічних спостережень реперів 5 і 7 та відповідні значення вологи шару ґрунту на глибині 0,4–0,8 м.



**Рис. 3.** Вертикальні рухи верхнього однометрового шару ґрунту, мм, та його вологість на глибині 0,4–0,8 м, %, на ГП у Полтаві за 2006–2015 рр.: А – за даними спостережень репера 5, Б – за даними спостережень репера 7.

Для забезпечення однорідності вихідних даних ряди вертикальних переміщень згладжені аналогічно масивам вологи ґрунту. Середня квадратична похибка одного значення вертикальних рухів на рис. 3 не перевищує 0,1 мм.

Емпіричні коефіцієнти кореляції досліджуваних часових рядів вертикальних рухів і вологи ґрунту надзвичайно високі (0,93 для репера 7 і 0,88 для репера 5 за довжини масивів більше ніж 350 значень). Цей факт підтверджує основну роль варіації вологості ґрунту в генерації сезонних коливань земної поверхні на ГП у Полтаві.

Для того, щоб дослідити залежність впливу змін вологи на вертикальні переміщення верхнього шару земної поверхні від величини абсолютного значення зволоженості ґрунту, обчислено коефіцієнт  $k_i$ . Він дорівнює відношенню зміни вертикального положення верхнього шару ґрунту  $\Delta h_i$  до зміни його вологи  $\Delta W_i$  за той самий проміжок часу  $\Delta t_i$ :

$$k_i = \frac{\Delta h_i}{\Delta W_i} \quad (5)$$

Інтервал часу  $\Delta t_i$  вибирали якомога меншим. Величина  $\Delta W_i$  визначається із меншою точністю, ніж  $\Delta h_i$ . Тому до неї ставили додаткові умови. Зміни вологи в області визначення кожного окремого значення  $\Delta W_i$  повинні перевищувати 2 %, щоб не виникало сумнівів щодо їх реального існування. Середнє значення величини  $\Delta W_i$  дорівнює 2,8 %. Загалом за весь період спостережень отримано близько 150 значень коефіцієнта  $k$ . Відтак отримані коефіцієнти згруповано залежно від величини середнього абсолютного значення вологи ґрунту. При цьому середні значення вологи ґрунту розділено на шість інтервалів: менше ніж 15 %, 15–17 %, 17–19 %, 19–21 %, 21–23 % і понад 23 %.

На рис. 4 показано залежність коефіцієнта  $k$  (його розмірність – мм вертикальних зміщень до % вологи ґрунту) від абсолютної величини зволоженості ґрунту у відсотках у місцях розташування реперів 5 і 7.

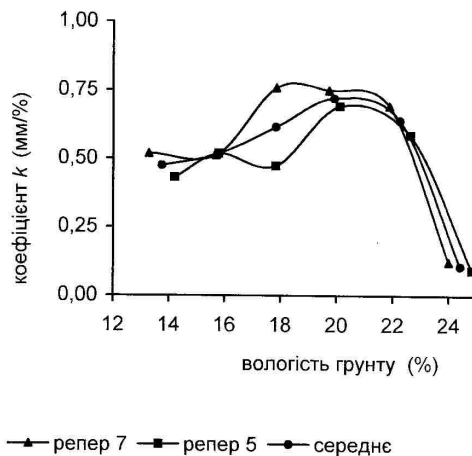


Рис. 4. Вплив величини абсолютної вологості ґрунту на значення коефіцієнта  $k$  реперів 5 і 7.

Як бачимо з рис. 4, характер впливу зволоженості ґрунту на досліджуваний параметр  $k$  поблизу розташування реперів 5 і 7 мало відрізняється. Наявні розбіжності можна пояснити значною мірою локальності вологи ґрунту, на що вказано вище. Якщо зволоженість ґрунту перевищує 22 %, її вплив на вертикальні рухи земної поверхні різко зменшується. Якщо вологість сягає 24 % і більше, то її варіації практично не позначаються на висотному положенні земної поверхні. Це означає, що на ГП у Полтаві ММВ ґрунту становить близько 24 % і подальше збільшення його вологи переважно є наслідком дії капілярних та гравітаційних сил, які не спричиняють деформацій земної поверхні.

Рис. 5 і 6 демонструють відсутність реакції земної поверхні на варіації вологи ґрунту, якщо вона перевищує його ММВ.

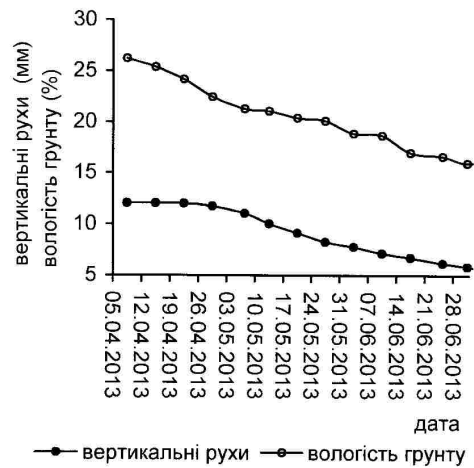


Рис. 5. Вплив варіацій вологи ґрунту в області його ММВ на вертикальні переміщення репера 5

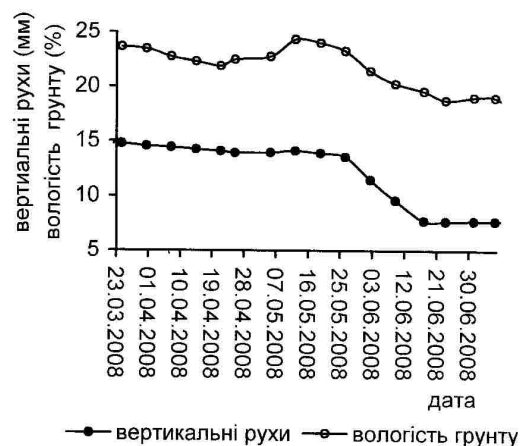


Рис. 6. Вплив варіацій вологи ґрунту в області його ММВ на вертикальні переміщення репера 7

Значні зміни вологи ґрунту, які відбулись у квітні 2013 р. поряд з репером 5 (рис. 5), а також

від кінця березня до кінця травня 2008 р. поблизу репера 7 (рис. 6), не викликали відповідних вертикальних переміщень земної поверхні. Отже, проміжок часу, коли вологість ґрунту перевищує його ММВ, можна вважати найсприятливішим періодом для виконання високоточних спостережень за вертикальною складовою динаміки земної поверхні. В цей час вертикальне положення земної поверхні залишається фактично незмінним всупереч істотним варіаціям вологості ґрунту.

На рис. 7 і 8 суцільними лініями показано тривалість сприятливого періоду для спостережень за вертикальними рухами у місцях розташування реперів 5 і 7 на ГП у Полтаві за період 2007–2015 рр.



**Рис. 7.** Тривалість сприятливого періоду для виконання спостережень за вертикальними рухами репера 5 у 2007–2015 рр.



**Рис. 8.** Тривалість сприятливого періоду для виконання спостережень за вертикальними рухами репера 7 у 2007–2015 рр.

Згідно з рис. 7 і 8 для ГП у Полтаві період мінімального впливу сезонних змін вологості ґрунту на стійкість земної поверхні щороку припадає на весну і може тривати від половини до двох календарних місяців. Після танення снігу і розмерзання ґрунту вологість його верхніх шарів завжди перевищує значення ММВ. На відкритій ділянці місцевості (репер 7) тривалість цього періоду більша, ніж поблизу дерев (репер 5). Це пояснюється тим, що дерева є додатковим джерелом витрат вологості, особливо навесні, тому вологість

ґрунту поблизу репера 5 раніше набуває значення, меншого за його ММВ. За даними багаторічних спостережень на ГП у Полтаві, найсприятливішим для виконання геодезичних спостережень за вертикальною динамікою земної поверхні є квітень. Залежно від місяця розташування ділянки та кліматичних особливостей конкретного року, період, коли зволоженість верхніх шарів ґрунту перевищує його ММВ, може розпочатись в кінці лютого і тривати до середини травня. У випадку значних атмосферних опадів восени період стійкого вертикального положення земної поверхні може настати в кінці року перед замерзанням ґрунту. Але тривалість цього періоду рідко перевищує половину місяця, і він трапляється не щороку на ГП у Полтаві.

### *Наукова новизна і практична значущість*

На основі експериментальних даних показано важливу роль ММВ ґрунту для генерації вертикальних рухів гідрометеорологічного походження у набряклих ґрунтах. Якщо вологість ґрунту перевищує значення його ММВ, то її подальші зміни не спричиняють деформацій земної поверхні. Це зумовлено зміною характеру пересування води у ґрунті та її станом (вільна чи зв'язана) залежно від величини зволоження.

Визначення числових характеристик вертикальної динаміки у періоди, коли вологість ґрунту перевищує його ММВ, дасть змогу мінімізувати вплив зовнішніх гідрометеорологічних чинників на результати спостережень. Адже в цей час поверхня землі й репери, встановлені у верхніх шарах ґрунту, не реагують на варіації вологості. Виявлену закономірність доцільно використовувати під час організації високоточних геодезичних спостережень на ГП та їх інтерпретації.

### *Висновки*

1. На основі десятирічних спостережень (2006–2015 рр.) на ГП у Полтаві виявлено нелінійний характер впливу варіацій вологості ґрунту на вертикальні переміщення земної поверхні. Якщо абсолютне значення вологості ґрунту перевищує його ММВ, то її подальші зміни мало впливають на вертикальні переміщення земної поверхні. Це пояснюється відмінностями механізму вертикальної інфільтрації води в ґрунт залежно від його водонасиченості. Якщо вологість перевищує величину ММВ ґрунту, то її пересування відбувається переважно внаслідок дії капілярних сил та гравітації, які не впливають на деформації.

2. Значення ММВ ґрунту істотно залежить від його фізичних властивостей. Для ГП, який розташований на середньосуглинистих за гранулометричним складом ґрунтах, цей показник зволоженості становить 24%. Для більш тонкодисперсних ґрунтів, які переважають на півдні та сході України [Атлас..., 1979, с. 116–117], ММВ ґрунту буде вищою, ніж у Полтаві. Для легко-

суглинистих ґрунтів значення цього параметра буде меншим порівняно з нашим ГП.

3. Величина ММВ ґрунту дає змогу встановити оптимальні часові періоди для виконання повторних геодезичних спостережень за вертикальною складовою динаміки земної поверхні з метою мінімізації впливу варіацій вологи ґрунту. Для ГП у Полтаві середня тривалість цього періоду перевищує один календарний місяць (від кінця березня і майже увесь квітень). Залежно від кліматичних особливостей конкретного року цей період може мати меншу або більшу часову протяжність. Зі зростанням величини ММВ ґрунту період стійкого висотного положення земної поверхні зменшуватиметься. Зниження величини ММВ ґрунту приведе до збільшення тривалості сприятливого періоду для виконання високоточних геодезичних спостережень.

### Список літератури

- Атлас природных условий и естественных ресурсов Украинской ССР. Москва: ГУГК, 1979. 183 с.
- Грушка І. Г. Методи і засоби вимірювань вологості матеріалів та середовищ. *Наукові праці УкрНДДГМІ*, 2005. 254. С. 169–187.
- Павлик В. Г. Вплив атмосферних опадів на вертикальні рухи земної поверхні. *Геодинаміка*, 2011. 1(10). С. 31–37.
- Павлик В. Г. Дослідження сезонних гідротермічних деформацій земної поверхні на різних глибинах. *Геодезія, картографія та аерофотознімання*, 1999. 59. С. 19–23.
- Павлик В. Г., Кутний А. М., Крипова В. В., Тищук М. Ф. Вплив вологості ґрунту на сезонні вертикальні деформації земної поверхні. *Геодезія, картографія та аерофотознімання*, 1996. 57. С. 55–64.
- Павлик В. Г. Сезонні гідротермічні вертикальні рухи земної поверхні в умовах різних за гранулометричним складом ґрунтів. *Геодинаміка*, 2010. 1(9). С. 22–27.
- Русанов Б. С. Гидротермические движения земной поверхности: монография. Москва: АН СССР, 1961. 228 с.
- Смирнов Н. И., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений: учебное пособие. Москва: Наука, 1965. 512 с.
- Фельдман Г. М. Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах: монография. Новосибирск: Наука, 1988. 258 с.
- Цытович Н. А. Механика грунтов: учебное пособие. Москва: Высшая школа, 1973. 280 с.
- Чимитдоржиев Т. Н., Дагуров П. Н., Захаров А. И. и др. Оценка сезонных деформаций болотистых почв методами радиолокационной интерферометрии и геодезического нивелирования. *Криосфера Земли*. 2013. XVII (1). С. 80–87.
- Clarke, P. J., Lavallée, D. A., Blewitt, G., & Dam, T. V. (2007). Basis functions for the consistent and accurate representation of surface mass loading. *Geophysical Journal International*, 171(1), 1–10. doi: 10.1111/j.1365-246x.2007.03493.x.am
- Dam, T. V., Wahr, J., Milly, P. C. D., Shmakin, A. B., Blewitt, G., Lavallée, D., & Larson, K. M. (2001). Crustal displacements due to continental water loading. *Geophysical Research Letters*, 28(4), 651–654. doi: 10.1029/2000gl012120
- Demoulin, A. (2004). Reconciling geodetic and geological rates of vertical crustal motion in intraplate regions. *Earth and Planetary Science Letters*, 221(1–4), 91–101. doi: 10.1016/s0012-821x(04)00110-4
- Dong, D., Fang, P., Bock, Y., Cheng, M. K., & Miyazaki, S. I. (2002). Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B4), ETG-9. doi: 10.1029/2001JB000573
- Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., ... & Rocca, F. (2007). Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(5), 1142–1153. doi: 10.1109/TGRS.2007.894440
- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., & Arikan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514, 1–13. doi: 10.1016/j.tecto.2011.10.013
- Ji, K. H., & Herring, T. A. (2012). Correlation between changes in groundwater levels and surface deformation from GPS measurements in the San Gabriel Valley, California. *Geophysical Research Letters*, 39(1). doi: 10.1029/2011GL050195
- Lyon, T. J., Filmer, M. S., & Featherstone, W. E. (2018). On the Use of Repeat Leveling for the Determination of Vertical Land Motion: Artifacts, Aliasing, and Extrapolation Errors. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(8), 7021–7039. doi: 10.1029/2018JB015705
- Nicolas, J., Nocquet, J.-M., Camp, M. V., Dam, T. V., Boy, J.-P., Hinderer, J., ... Amalvict, M. (2006). Seasonal effect on vertical positioning by Satellite Laser Ranging and Global Positioning System and on absolute gravity at the OCA geodetic station, Grasse, France. *Geophysical Journal International*, 167(3), 1127–1137. doi: 10.1111/j.1365-246x.2006.03205.x
- Rabbel W., Zschau J. Static deformations and gravity changes at the earth's surface due to atmospheric loading. *Journal of Geophysics*. 1985. 56(2). P. 81–99.
- Szczerbowski, Z. (2009) Toward the reliability of geodetic surveys in study of geodynamics – a problem of influence of seasonal variations. *Acta*

- Geodynamica Et Geomaterialia*, Vol. 6, No. 3 (155), 253–263.
- Vittuari, L., Gottardi, G., & Tini, M. A. (2015). Monumentations of control points for the measurement of soil vertical movements and their interactions with ground water contents. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(5–7), 439–453. doi: 10.1080/19475705.2013.873084
- Zurowski A. Uwagi na temat stalosci pewnych znakow wysokociowych na terenie Zulaw Wislanych. *Przegląd Geodezyjny*. 1971. 43(2). S. 507–509.

V. PAVLYK<sup>1</sup>, A. KUTNYI<sup>1</sup>, O. KALNYK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Poltava Gravimetric Observatory of Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 27/29, G. Myasoedova Str., Poltava, 36004, Ukraine, tel. 0991715137, e-mail: vgpavlyk@gmail.com.

<sup>2</sup> Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, 24, Pershotravnevyi Ave., Poltava, 36011, Ukraine, e-mail: alex.kalnik@gmail.com.

#### FEATURES OF THE INFLUENCE OF SEASONAL VARIATION OF SOIL MOISTURE ON VERTICAL MOVEMENTS OF THE EARTH'S SURFACE

**The purpose** of the research is to establish experimentally the most favorable conditions for determining the vertical movements of the Earth's surface in terms of the minimal influence of variations of soil moisture on the results of observations. Geodetic monitoring of deformation processes at geodynamic testing grounds (GTG) occurs mainly without taking into account the influence of factors on the dynamics of the Earth's surface and benchmarks. To successfully separate tectonic or anthropogenic movements from all recorded motions of the Earth's surface, it is necessary to exclude their hydrometeorological component. One type of meteorological impact on the dynamics of the Earth's surface and benchmarks is the volumetric deformation of the swelling soils due to the variation of their moisture. They cause seasonal vertical movements, the magnitude of which depends on the physical and mineralogical properties of the soil, the characteristics of the environment, and the amplitude of annual fluctuations in temperature and moisture. **The research methodology** included the parallel observations at two points of vertical movements and moisture of the top one-meter layers of soil at GTS in Poltava for the period 2006 to 2015. **The main result** is the determination of a nonlinear nature of the effect of seasonal changes of soil moisture on the vertical displacement of the Earth's surface, depending on the absolute values of moisture. If soil moisture exceeds its maximum molecular moisture content (MMMC), then its variations do not affect the dynamics of the ground. This is explained by the different mechanism of vertical infiltration of water in the soil, depending on its water saturation. At high levels of soil moisture, further changes are caused mainly by capillary and gravitational forces that do not cause deformations and vertical movements of the Earth's surface. **The scientific novelty** of this research is to establish the important role of the MMMC of soil in the generation of vertical movements of the Earth's surface and benchmarks due to variations in its moisture. **The practical significance** of the work lies in the possibility of minimizing the influence of hydrometeorological factors on the results of high-precision observations of the dynamics of the Earth's surface. The results obtained can be used in the organization of high-precision observations of vertical movements on the GTG and their interpretation.

*Key words:* repeat leveling; seasonal vertical movements of the Earth's surface; soil moisture; benchmarks stability.

Received 02.05.2019