

УДК 528.481

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ ТА ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ГІДРОТЕРМІЧНИХ РУХІВ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ДОБОВОГО ПЕРІОДУ НА ПОЛІГОНІ У ПОЛТАВІ

В. Павлик, А. Кутний, Т. Бабич

Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України

Ключові слова: гідротермічні добові вертикальні та горизонтальні рухи, вертикальний екстензометр.

Постановка проблеми

Високоточні спостереження за динамікою земної поверхні завжди спотворені дією гідрометеорологічних чинників, що може знизити достовірність отриманих результатів і створити труднощі в їх інтерпретації. Величини гідротермічних рухів земної поверхні, під якими розуміють переміщення верхніх шарів ґрунту внаслідок варіації гідрометеорологічних факторів, залежать від особливостей фізичної та мінералогічної будови ґрунту та величини коливань метеорологічних чинників. Власне зміни гідрометеорологічних факторів і задають характер гідротермічних переміщень ґрунту, який може бути епізодичним, сезонним та добовим. Найменшими за величиною є добові гідротермічні коливання земної поверхні. Мала величина цих переміщень не дає змоги надійно реєструвати їх сучасними та класичними геодезичними методами. Але для розуміння загалом природи гідротермічних рухів та закономірностей їх прояву вивчення добової складової цього виду коливань земної поверхні є необхідним.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

Полтавська гравіметрична обсерваторія (ПГО) створила спеціальні геодинамічні мікрополігони (ГМП), обладнані засобами геодезичних, геофізичних і метеорологічних спостережень, на яких здійснюється дослідження впливу зовнішніх гідрометеорологічних чинників на динаміку земної поверхні. Багаторічні спостереження довели, що рухи тектонічного чи техногенного характеру в межах окремих локальних ГМП відсутні. Динаміка земної поверхні на полігонах ПГО зумовлена винятково варіаціями гідрометеорологічних факторів.

Експериментально встановлено залежність величини гідротермічних вертикальних рухів від гранулометричного складу ґрунту. На ГМП у Полтаві, де переважають середньосуглинисті ґрунти, гідротермічні вертикальні рухи зумовлені, переважно, варіаціями вологи ґрунту, яка змінює його об'єм і, як наслідок, викликає переміщення земної поверхні [1]. Досліджено дію окремих складових вологи ґрунту (атмосферні опади, евапотранспірація) на процес генерації вертикальних рухів гідрометеорологічного походження [2, 3].

На ГМП геофізичної станції "Судіївка" ПГО вивчали добові вертикальні коливання верхнього

шару ґрунту за допомогою свердловинних кварцових екстензометрів [4]. Але пізніше виявилось, що результати цих спостережень можуть бути спотворені безпосереднім впливом добових змін температури на опір кабелю, завдяки якому електричний сигнал від датчиків екстензометрів передавався на реєструвальну апаратуру. Причина цього – мале заглиблення кабелю. Тому результати дослідження добової складової вертикальних гідротермічних рухів на ГМП у Судіївці треба сприймати з певним застереженням.

Постановка завдання

Метою роботи є експериментальне вивчення добових складових вертикальних і горизонтальних гідротермічних переміщень верхнього шару ґрунту на ГМП у Полтаві. Для цього використано два свердловинні кварцові екстензометри, які дають змогу отримувати три компоненти локальних рухів земної поверхні з точністю понад 10^{-3} мм.

Конструкція і принцип роботи екстензометрів

Вертикальний екстензометр складається з порівняно нерухомої та рухомої частин. Нерухома частина – це кварцова труба з малим коефіцієнтом лінійного температурного розширення завдовжки 3 м і діаметром 40 мм. Нижній її кінець за допомогою хвостовика з нержавіючої сталі міцно з'єднаний з бетонним циліндричним постаментом, висота якого трохи більша за 1 м, розміщений на дні свердловини з діаметром 180 мм і глибиною 5 м. Верхній кінець труби розташований на глибині 0,5 м від поверхні землі й на ньому встановлено гвинт з добре відомим кроком для калібрування приладу та патрон з електричною лампочкою. Рухомою частиною приладу є бетонний диск з діаметром близько 0,4 м і заввишки 0,15 м з отвором посередині. У цей отвір заходить калібрувальний гвинт з лампочкою, що освітлює пару фотоелементів фотоелектричного датчика, які розміщені у вертикальній площині. Сам фотоелектричний датчик закріплений на бетонному диску. Рухома частина екстензометра міститься на глибині 0,4 м від поверхні землі. Детальніше конструкцію вертикального екстензометра розглянуто у праці [5].

Принцип роботи приладу є таким. Під дією зовнішніх гідротермічних збурень бетонний диск із закріпленим на ньому фотоелектричним датчиком здійснює переміщення відносно практично нерухомої лампочки, що освітлює фотоелементи датчика. При цьому на виході датчика, який живиться від високоточного стабілізатора напруги величиною 9 В, виникають зміни напруги, які постійно реєструються.

Лабораторні дослідження показали, що переміщення в межах 10 мм викликають лінійні зміни напруги. А це означає, що, фіксуючи зміни напруги на виході фотоелектричного датчика, можна отримати вертикальні коливання верхнього шару земної поверхні на глибині 0,4 м відносно постаменту екстензометра. Багаторічні спостереження за вертикальною складовою динаміки земної поверхні на ГМП у Полтаві показали, що сезонні гідротермічні рухи шарів ґрунту на глибині 4–5 м, де розміщений постамент екстензометра, не перевищують 0,2 мм, і майже у 50 разів менші, ніж верхнього однометрового шару, в якому розміщена рухома частина приладу [1].

Горизонтальний екстензометр розроблено на базі незадіяного у роботі вертикального, конструкцію якого описано вище. На бетонному диску рухомої частини приладу закріплено дві пари фотоелементів, які зорієнтовані у взаємно перпендикулярних напрямках північ–південь і захід–схід. Фотоелементи датчиків кожної компоненти розташовані в горизонтальній площині на рівні лампочки і на однаковій віддалі від неї. Калібрування датчика горизонтальних переміщень здійснюється за допомогою спеціальних гвинтів, які дають змогу змінювати положення кожної пари фотоелементів відносно лампочки їх освітлення. Гідротермічні горизонтальні рухи зумовлюють переміщення двох пар фотоелементів, у результаті чого змінюється їх освітленість, що викликає коливання напруги на виході фотоелементів, яка постійно реєструється. Нелінійність зміни напруги у межах горизонтальних переміщень фотоелементів величиною 4 мм не перевищує 1 %. Глибини розміщення постаменту горизонтального екстензометра та рухомого бетонного диска такі самі, як вертикального. Кабель між фотоелектричним датчиком і реєструвальною апаратурою закладено на глибину, де вплив добових змін температури ґрунту на його опір є мізерним. Зазначимо, що у середній Європі навіть у найспекотніші літні місяці добові коливання температури на глибині 0,3 м не перевищують 2 °С [6].

Сезонні вертикальні та горизонтальні рухи

Вертикальний та горизонтальний екстензометри розміщені на рівнинній ділянці ГМП у саду ПГО. Рухома частина екстензометрів міститься у середньосуглинистих за гранулометричним складом ґрунтах [1]. Реєстрацію рухів земної поверхні здійснено з годинним інтервалом; точність визначення вертикальної компоненти становила $0,71 \cdot 10^{-3}$ мм, горизонтальних – $0,48 \cdot 10^{-3}$ мм у напрямку північ–південь (Пн–Пд) і $0,25 \cdot 10^{-3}$ мм у напрямку захід–схід (З–Сх).

У цій роботі представлено результати спостережень за вертикальними і горизонтальними рухами верхнього шару ґрунту за період з 1.06.2011 р. до 10.10.2012 р. На рис. 1 і 2 наведено повільні вертикальні та горизонтальні рухи за вказаний період. Внаслідок різних причин траплялись нетривалі пропуски у рядах спостережень. Нагадаємо, що екстензометри реєструють переміщення шару ґрунту на глибині 0,4 м відносно глибини 4–5 м.

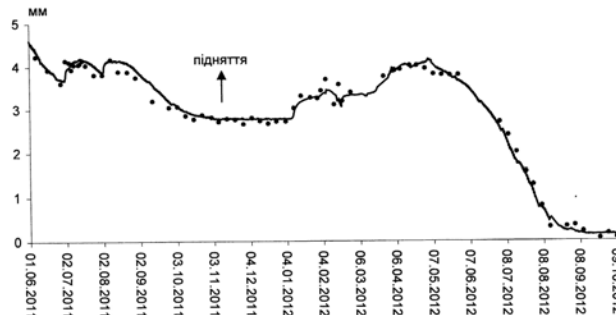


Рис. 1. Вертикальні гідротермічні рухи верхнього шару земної поверхні за результатами екстензометричних спостережень (суцільна лінія) і за даними повторного геометричного нівелювання (крапки). Стрілкою показано напрямок підняття земної поверхні

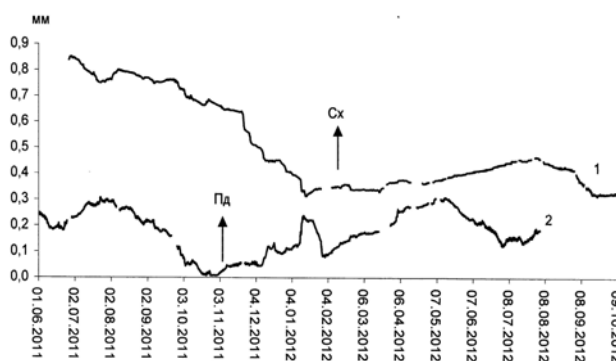


Рис. 2. Горизонтальні гідротермічні рухи верхнього шару земної поверхні: 1 – напрямком Сх–З; 2 – напрямком Пн–Пд. Стрілками показано напрямки рухів відповідно на Сх і Пд

У бетонний диск рухомої частини вертикального екстензометра закладено нівелірну марку. Її висотне положення визначалось повторним геометричним нівелюванням з тижневою періодичністю відносно одного з найстійкіших реперів полігона А1 завглибшки 6 м із середньою квадратичною помилкою 0,1 мм. Повільні рухи репера А1 за 23 роки спостережень на ГМП у Полтаві не перевищують 0,01 мм за рік [7]. Вертикальні коливання рухомої частини екстензометра, отримані за результатами повторного нівелювання, також наведено на рис. 1. Незначні розбіжності між вертикальними рухами, одержаними двома незалежними способами, свідчать про надійність і достовірність екстензометричного методу вивчення відносних переміщень земної поверхні. Горизонтальні рухи, які отримані свердловинним екстензометром, не контролювали геодезичним способом. Але враховуючи те, що конструкції вертикального та горизонтального деформографів є практично однаковими, за винятком способу розташування фотоелементів фотоелектричного датчика, немає сумнівів у достовірності визначених горизонтальних рухів, які показані на рис. 2.

Вертикальні переміщення на глибині встановлення екстензометра за весь період спостережень не перевищують 5 мм і мають виражений сезонний характер, що характерно для Полтави. Адже ґрунти на полігоні з глинистими компонентами, які мають

здатність змінювати свій об'єм під час варіацій вологи, що й зумовлює періодичні рухи шарів ґрунту на різних глибинах [8, 9]. Максимальне підняття відбувається весною, коли після танення снігу запаси вологи в ґрунті найбільші. Влітку, в результаті евапотранспірації (випаровування води з поверхні та її транспірації рослинами), вологість постійно зменшується, що викликає опускання земної поверхні. Цей процес можуть порушити значні за інтенсивністю чи тривалістю дощі, які здатні раптово збільшити вологість і, як наслідок, зумовити короткочасне підняття земної поверхні. Саме це відбулось влітку 2011 р., коли за період з 25.06 до 5.07 випало 110 мм опадів, а за період з 23.07 до 2.08 – 118 мм опадів, що становить відповідно 130 % і 170 % місячної норми (рис. 1). Восени запаси вологи ґрунту мінімальні й висотне положення земної поверхні найнижче в році. Взимку витрати вологи майже відсутні, усі атмосферні опади накопичуються в ґрунті, що збільшує його вологість і викликає підняття земної поверхні. Замерзання та відтаювання ґрунту може зумовити короткочасні стрибкоподібні вертикальні рухи його шарів, розміщених в області дії цих процесів.

Горизонтальні рухи земної поверхні на порядок менші, ніж вертикальні і не перевищують 0,5 мм; їх сезонний характер також виявляється меншою мірою порівняно з вертикальними.

Добові вертикальні та горизонтальні рухи

На фоні сезонних рухів верхнього шару ґрунту відбуваються і короткоперіодичні його коливання. На рис. 3 показано вертикальні та горизонтальні гідротермічні збурення за період спостережень з 13.07.2011 р. до 23.07.2011 р. з вилученою складовою сезонного тренду на цьому інтервалі часу. Зазначимо, що вказаний інтервал часу відповідає періоду року з найбільшими величинами добових коливань земної поверхні.

На рис. 3 видно добові коливання земної поверхні. Особливо чітко вони виявляються у вертикальній компоненті; короткоперіодичні горизонтальні рухи надійно визначаються лише у напрямку Пн–Пд. З метою дослідження закономірностей добової складової рухів верхнього шару земної поверхні усі три 15-місячні ряди спостережень розділено на інтервали завдовжки 6 діб. У разі пропусків у експериментальних даних чи складної форми тренду на 6-добових відрізках часу обмежувались інтервалами тривалістю 4 доби. Для усіх інтервалів часу гідротермічні рухи кожного з трьох напрямків апроксимовані гармонічним коливанням, яке задає їх добову періодичність, та поліномом другого порядку, який відтворює фрагмент сезонних переміщень верхнього шару земної поверхні:

$$y_i - a \cdot t_i^2 - b \cdot t_i - c - A \cdot \cos(\omega \cdot t_i + \varphi) = v_i, \quad (1)$$

де y_i – виміряні щогодинні величини вертикальних чи горизонтальних рухів земної поверхні; a , b і c – коефіцієнти квадратичного тренду; A і φ – амплітуда і початкова фаза добової складової переміщень земної поверхні; ω – кутова частота добової періодичності ($\omega = 15$ град. дуги/годину); t_i – моменти часу; v_i – поправки; $i = 1, \dots, 144$ (для шестидобового відрізка часу); $i = 1, \dots, 96$ (для чотиридобового відрізка часу).

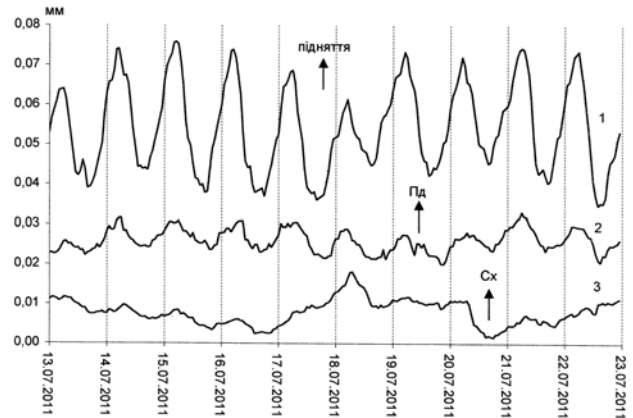


Рис. 3. Фрагмент гідротермічних рухів земної поверхні добового періоду за даними екстензометричних спостережень: 1 – вертикальні рухи; 2 – горизонтальні рухи в напрямку Пн–Пд; 3 – горизонтальні рухи в напрямку Сх–З. Стрілками показано напрямки переміщень земної поверхні

За методом найменших квадратів отримано значення коефіцієнтів систем рівнянь (1) для кожного з інтервалів вихідних рядів спостережень, які дали змогу за допомогою критерію Фішера перевірити адекватність моделей експериментальним даним. Якщо моделі відповідають вимірним вихідним даним рухів земної поверхні з рівнем значущості 0,01, перевіряли значущість отриманих коефіцієнтів. Для цього використано t -критерій Стюдента з рівнем значущості 0,05. На рис. 4 представлено значущі амплітуди A адекватних вихідним даним моделей (1) для трьох складових рухів верхнього шару ґрунту добового періоду за весь час екстензометричних спостережень на ГМП у Полтаві. Крім названих критеріїв, амплітуди задовольняють ще одну умову; їх величина має перевищувати 10^{-3} мм. Остання умова викликана врахуванням точності екстензометричних спостережень.

Амплітуди добових вертикальних рухів на глибині встановлення рухомої частини екстензограма досягають 0,03 мм. Вони мають виражений сезонний характер. Найбільші добові коливання відбуваються влітку, найменші – у другій половині осені, взимку та на початку весни. Горизонтальні переміщення земної поверхні добового періоду майже на порядок менші, ніж вертикальні. Величини їх сезонного ходу корелюють з вертикальними рухами. З другої половини осені і до кінця весни добові горизонтальні переміщення практично відсутні або їх амплітуди не перевищують 10^{-3} мм. Короткоперіодичні горизонтальні рухи в напрямку Сх–З значно менші, ніж у напрямку Пн–Пд. За весь період екстензометричних спостережень вдалось визначити лише сім параметрів добової складової горизонтальних переміщень ґрунту в напрямку Сх–З, які задовольняють встановлені вище умови.

Максимальні за величиною добові рухи земної поверхні відбуваються у періоди найбільшої протягом року евапотранспірації. Це підтверджує рис. 5, де наведено величини сезонного ходу добового опускання верхніх шарів ґрунту внаслідок дії евапотранспірації, розраховані на основі регулярних 10-річних

спостережень за поверхневими реперами на ГМП у Полтаві [3] та середньомісячні значення (подвійна амплітуда) вертикальних рухів добового періоду, які наведені на рис. 4.

Для більшої наочності у представленні результатів здійснено перехід від початкової фази φ добової складової переміщень верхнього шару ґрунту до моменту максимального підняття (у випадку вертикальних рухів) чи моментів максимальних зміщень відповідно на південь та схід (у разі горизонтальних рухів) M :

$$M = -\frac{\varphi}{\omega} \quad (2)$$

На рис. 6 представлено сезонний хід моментів максимальних значень вертикальних і горизонтальних рухів добового періоду верхнього шару ґрунту на ГМП у Полтаві в годинах місцевого часу (UTC+2).

Моменти найбільшого добового підняття верхнього шару земної поверхні, а також максимальних короткоперіодичних горизонтальних рухів зафіксовано, як правило, між четвертою та шостою годинами ранку за місцевим часом. Починаючи з другої половини осені момент максимального добового підняття земної поверхні систематично зростає, досягаючи максимуму у кінці грудня 2011 р. За цей час початкова фаза добової складової вертикальних рухів змінюється майже на протилежну (з 4–5 години на 16 годину). Потім, за два останні зимові місяці, вона поступово повертається до звичного значення. Зауважимо, що вказані варіації фази добової хвилі відбуваються у період її мінімальних амплітуд.

Подібність часового розподілу амплітуд і фаз короткоперіодичних вертикальних і горизонтальних рухів верхнього шару земної поверхні (рис. 4 і 6) свідчить про їх спільну природу. Основними причи-

нами цього явища, на нашу думку, є варіації вологи ґрунту внаслідок добових змін евапотранспірації. Адже найбільше випаровування вологи з поверхні землі та її максимальні витрати на транспірацію рослинами за однакових інших умов (фізичний склад ґрунту, його будова, температура і зволоженість) відзначаються в пообідній період доби, а найменша упродовж доби евапотранспірація припадає на нічний та вранішній час [10]. Нічна транспірація рослин не перевищує 3–5 % її денного значення [11]. Саме тому й виникають коливання евапотранспірації, які спричиняють короткоперіодичні зміни запасів вологи ґрунту, що й зумовлюють зареєстровані нами добові деформації верхніх шарів ґрунту. Механізм генерації добових рухів є таким самим, як і сезонних. На жаль, на ГМП у Полтаві вологість ґрунту визначається лише з тижневою періодичністю, що не дає змоги перевірити це твердження. На станції Ветзель (Німеччина) у 2005 р. протягом 35 днів у неперервному режимі визначали вологу ґрунту, вимірюючи його електричну провідність групою датчиків з метою дослідження впливу варіації запасів вологи на залишкові значення прискорення сили ваги, отримані надпровідниковим гравіметром. Наведені у цій праці дані вказують, що навіть восени, добові коливання вологи ґрунту надійно визначаються до глибини 1,5 м, а інколи й до 2,5 м. Періоди найбільшої та найменшої вологи припадають відповідно на ранковий та пообідній час. Моменти добового максимуму та мінімуму запасів вологи ґрунту є постійними і не залежать від глибини [12]. Результати непрямих визначень варіацій вологи у Ветзелі й характер добових переміщень верхніх шарів ґрунту у Полтаві дуже схожі, що є додатковим підтвердженням гідрологічної природи зареєстрованих нами короткоперіодичних рухів на ГМП.

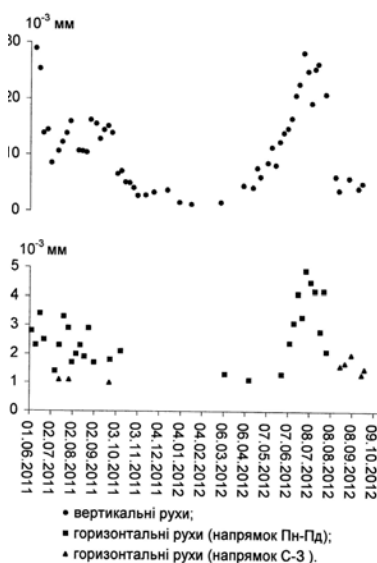


Рис. 4. Амплітуди добових гідротермічних вертикальних і горизонтальних рухів верхнього шару земної поверхні на ГМП у Полтаві

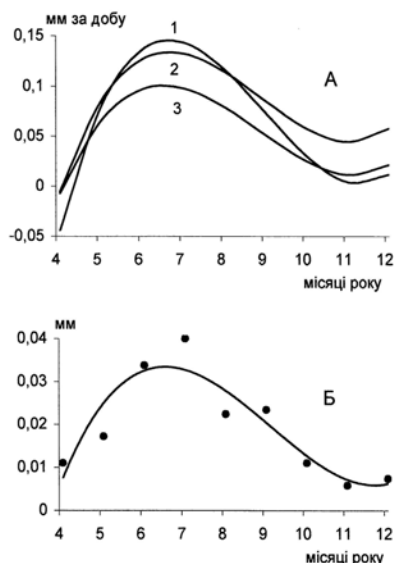


Рис. 5. Порівняння середньодобового опускання земної поверхні внаслідок дії евапотранспірації (А; 1 – шар ґрунту $0=0,3$ м, 2 і 3 – шар ґрунту $0=1,0$ м) та величини добових вертикальних рухів за даними екстензометричних спостережень (Б) на ГМП у Полтаві залежно від календарних місяців року

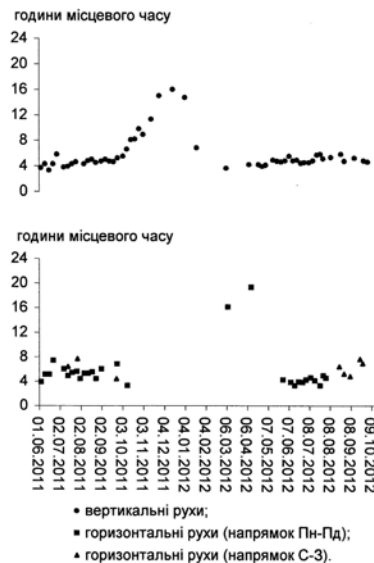


Рис. 6. Моменти максимальних значень добових гідротермічних вертикальних і горизонтальних рухів верхнього шару земної поверхні на ГМП у Полтаві

Висновки

1. Величина сезонних гідротермічних горизонтальних рухів верхнього шару земної поверхні на ГМП у Полтаві на порядок менша, ніж вертикальних, і не перевищує 0,5 мм.

2. Амплітуда добових вертикальних переміщень верхнього шару ґрунту гідротермічного походження не перевищує 0,03 мм і майже на порядок більша, ніж горизонтальних.

3. Моменти максимального добового підняття, а також моменти екстремальних добових горизонтальних переміщень земної поверхні під дією гідрометеорологічних чинників припадають, в основному, на 4–6 години ранку за місцевим часом.

4. Гідротермічні коливання земної поверхні добового періоду сягають найбільших значень влітку і зумовлені варіаціями вологи ґрунту внаслідок добових змін евапотранспірації.

Література

1. Павлик В.Г. Сезонні гідротермічні вертикальні рухи земної поверхні в умовах різних за гранулометричним складом ґрунтів // Геодинаміка. – 2010. – № 1(9). – С.22–27.
2. Павлик В. Результати прогнозування сезонних гідротермічних вертикальних рухів земної поверхні в Полтаві // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів. – 2008. – Вип. II (16). – С. 75–81.
3. Павлик В.Г. Вплив атмосферних опадів на вертикальні рухи земної поверхні // Геодинаміка. – 2011. – № 1(10). – С.31–37.
4. Кутний А. Результати дослідження добової складової вертикальних рухів земної поверхні на основі екстензометричних спостережень / А. Кутний, В. Павлик, В. Булацен // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів. – 2008. – Вип. II (16). – С. 64–68.
5. Кутний А.М. Скважинный экстензометр Полтавской гравиметрической обсерватории / А.М. Кутный, В.Г. Булацен, Б.И. Бродский, А.А. Состин // Вращение и приливные деформации Земли. – 1992. – С. 104–109.
6. Кучерявий В.П. Екологія: підручник. – Львів: Світ, 2001. – 500 с.
7. Павлик В. Результати дослідження власних повільних вертикальних рухів реперів на геодинамічних мікрополігонах Полтавської гравиметричної обсерваторії // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2011. – Вип. 1(23). – С.60–65.
8. Павлик В.Г. Вплив вологості ґрунту на сезонні вертикальні деформації земної поверхні / В.Г. Павлик, А.М. Кутний, В.В. Криптова, М.Ф. Тишук // Геод., картограф. та аерофотознімання. – Львів. – 1996. – № 57. – С. 55–64.
9. Павлик В.Г. Дослідження сезонних гідротермічних деформацій земної поверхні на різних глибинах // Геод., картограф. та аерофотознімання. – Львів. – 1999. – № 59. – С. 19–23.
10. Хэнкс Р.Дж. Прикладная физика почв. Температура и влажность почвы / Р.Дж. Хэнкс, Дж.Л. Ашкрофт; пер. с англ. – Ленинград: Гидрометиздат, 1985. – 151 с.
11. Якушкина Н.И. Физиология растений: учеб. пособие. – М.: Просвещение, 1980. – 303 с.
12. Klugel T., Harnish G., Harnish M. Measuring integral soil moisture variations using geoelectrical resistivity meter // Marees Terrestres Bulletin d'Informations. – 2006. – 142. – P.11369–11375.

Результати дослідження вертикальних та горизонтальних гідротермічних рухів земної поверхні добового періоду на полігоні у Полтаві
В. Павлик, А. Кутний, Т. Бабич

Наведено величини добових гідротермічних вертикальних та горизонтальних рухів верхнього шару земної поверхні на полігоні у Полтаві. Розглянуто причини, що зумовлюють це явище.

Результаты исследования вертикальных и горизонтальных гидротермических движений земной поверхности суточного периода на полигоне в Полтаве
В. Павлык, А. Кутный, Т. Бабыч

Приведены величины суточных гидротермических вертикальных и горизонтальных движений земной поверхности на полигоне в Полтаве. Рассмотрены причины, которые вызывают это явление.

Results of research of vertical and horizontal hydrothermal movements of earth's surface of the daily period in the polygon in Poltava
V. Pavlyk, A. Kutnyj, T. Babych

Values of daily hydrothermal vertical and horizontal movements of earth's surface are given in the polygon in Poltava. The reasons which cause this phenomenon are considered.



54th Photogrammetric Week

Stuttgart

<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/phowo/infos.en.html>

September

8-13

2013