

УДК 556+502+528.4

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.98.12>

І. Черевко, канд. геол. наук,
E-mail: ira071165@yahoo.com,
Національний заповідник "Києво-Печерська Лавра",
вул. Лаврська, 9, 01015, м. Київ, Україна;
В. Зацерковний, д-р техн. наук, проф.,
E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com;
П. Трофименко, д-р с.-г. наук, доц.,
E-mail: trofimenkopetr@ukr.net;
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, 03022, м. Київ, Україна;
І. Пампуха, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: ramp@ukr.net;
Б. Попков, канд. військ. наук, ст. наук. співроб.,
E-mail: popkov.b.a@gmail.com;
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
Військовий інститут, вул. Ломоносова, 81, м. Київ, Україна, 03189;
В. Гудак, студ.,
E-mail: VassiaGudak@gmail.com,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, 03022, м. Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ БАЗИ ГЕОДАНИХ РЕЖИМНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЗА ГІДРОГЕОЛОГІЧНИМИ УМОВАМИ ТЕРИТОРІЇ КИЄВО-ПЕЧЕРСЬКОЇ ЛАВРИ ТА ЇЇ АНАЛІЗ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником О.І. Меньшовим)

Підземні та ґрунтові води є найбільш динамічним і вразливим компонентом геологічного середовища, який у масштабі реального часу реагує на зміни природних і природно-антропогенних факторів та зумовлює виникнення і активізацію небезпечних геологічних процесів, зокрема таких, як зсуви, просідання, підтоплення та ін. З метою оцінки впливу різних чинників на розвиток і активізацію екзогенних геологічних процесів, у першу чергу найбільш швидкоплинних, окрім метеорологічних умов (кількість опадів, їх розподіл за сезонами року) беруться до уваги гідрогеологічні умови та найбільш мінливий з показників – рівень ґрунтових вод.

Постійний моніторинг території вимагає розв'язання безлічі доволі складних різнопланових задач, у тому числі обґрунтованого і комплексного прогнозування розвитку змін під впливом фізичних, хімічних та біологічних факторів на основі сучасних інформаційних технологій.

Зважаючи на те, що територія Національного заповідника "Києво-Печерська лавра" має складний рельєф з перепадом висот з півдня на північний схід у реальних вимірах 74,5 м, для досягнення кінцевої мети необхідно вести постійний моніторинг та проводити протизсувні роботи, здійснювати заходи з відведення поверхневих вод, замінювати комунікації водопостачання та водовідведення, визначати вплив зміни режиму ґрунтових вод на стан території. Оптимізувати цей багатоплановий процес може геобазу даних, використання та ведення якої дозволить приділяти головну увагу вивченню гідрогеологічних умов, зокрема – режиму ґрунтових вод та характеру поширення водоносних горизонтів.

Ключові слова: рівні ґрунтових вод, екзогенні геологічні процеси, поширення водоносного горизонту, гідрогеологічні умови, геоінформаційна система.

Вступ. Підземні та ґрунтові води є найбільш динамічним і вразливим компонентом геологічного середовища, який у масштабі реального часу реагує на зміни природних і природно-антропогенних факторів та зумовлює виникнення і активізацію небезпечних геологічних процесів, зокрема таких, як зсуви, підтоплення та ін. (Кошляков, 2011). Вхідну інформацію для цільового вивчення підземних вод отримують під час виконання спеціальних досліджень, зокрема моніторингових. Поширення та активізація небезпечних геологічних процесів, що розвиваються під впливом природних чинників, тісно пов'язані з кількістю атмосферних опадів та їх розподілом за сезонами року, режимом випадання, температурними змінами у внутрішньорічному і багаторічному розрізі та режимом ґрунтових вод.

Для якісного виконання цих завдань слід проаналізувати та оптимізувати технологічні схеми застосування геоінформаційних технологій (ГІТ) у моделюванні та прогнозуванні.

У роботі (Kumar, Singh, 2015) наголошено, що використання моделей є переважним чинником у галузі дослідження екзогенних геологічних процесів (ЕГП), особливо для широкого спектра гідрогеологічних умов. Загалом, моделі – це концептуальні описи чи

наближення, що описують фізичні системи за допомогою математичних рівнянь; вони не є точними описами фізичних систем чи процесів. Математично представляючи спрощену версію гідрогеологічної системи, можна передбачити, випробувати та порівняти розумні альтернативні сценарії. Застосовуваність або корисність моделі залежить від того, наскільки близько математичні рівняння наближають фізичну систему, що моделюється. Для того щоб оцінити застосовність чи корисність моделі, необхідне глибоке розуміння фізичної системи та припущень, закладених при виведенні математичних рівнянь. Моделі підземних вод описують процеси ґрунтових вод і транспортних процесів, використовуючи математичні рівняння, засновані на певних спрощеннях припущень. Ці припущення зазвичай включають напрям потоку, геометрію водоносного шару, неоднорідність або анізотропію опадів або порід у межах водоносного шару, механізми транспортування забруднювальних речовин та хімічні реакції (Таухе, 1994).

Через спрощені припущення, закладені в математичних рівняннях, і безліч невизначеностей у значеннях даних, що вимагаються моделлю, модель повинна розглядатися як апроксимація, а не точне дублювання польових умов (Зацерковний та ін., 2017). Моделі

підземних вод, однак, навіть як наближення є корисним інструментом дослідження, який можна використовувати для низки застосувань:

- водний баланс (у перерахунку на кількість води);
- кількісні аспекти ненасиченої зони;
- моделювання водного потоку та хімічної міграції в насиченій зоні, включаючи відношення річка–ґрунт;
- оцінку впливу змін режимів ґрунтових вод у навколишньому середовищі;
- створення/оптимізація мереж моніторингу та створення зон захисту ґрунтових вод.

Існуючі методи вивчення гідрогеодинамічної складової базуються на врахуванні переважно детермінованих характеристик потоків підземних вод. Важливо розуміти загальні аспекти як моделей потоку підземних вод, так і транспортних моделей, для того, щоб застосування або оцінка цих моделей виконувалась правильно. Тому увесь процес побудови моделей підземних вод можна охарактеризувати як два різні процеси (Kumar, Singh, 2015). Перший процес – це розробка моделі, що приводить до отримання програмного продукту, а другий – застосування цього продукту для конкретної мети (рис. 1). Моделі підземних вод найефективніше розробляються в логічній послідовності.

Важливим є те, що моделювання іноді вимагає використання декількох типів програмного забезпечення. Якщо говорити про моделювання підземних вод, то до різних типів належать (Kumar, 2019):

- "модельний" скрипт, який вирішує рівняння потоку підземних вод та/або транспортування розчинених речовин;
- GUI, що полегшує підготовку файлів даних для модельного скрипта, запускає код моделі та дозволяє візуалізацію та аналіз результатів (модельні прогнози);
- програмне забезпечення для обробки просторових даних, таких як ГІС, і програмне забезпечення для представлення гідрогеологічних концептуальних моделей;
- програмне забезпечення, що підтримує калібрування моделі, аналіз невизначеності;
- програмне забезпечення, що дозволяє виконувати додаткові розрахунки.

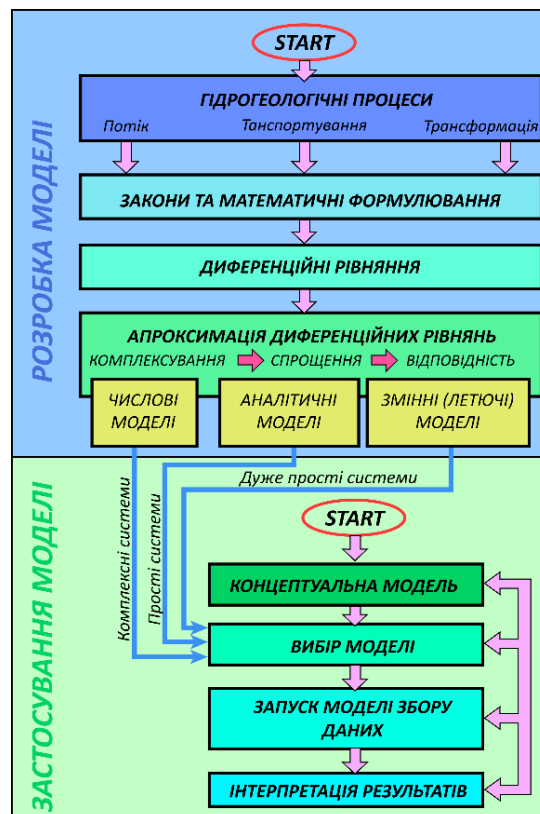


Рис. 1. Алгоритм розробки моделі (Kumar, Singh, 2015)

Геоінформаційний підхід до вирішення гідрогеологічних завдань передбачає використання геоінформаційних систем при збиранні, обробці і збереженні інформації для створення гідрогеологічних математичних моделей та просторового аналізу в ГІС. Тобто ГІС використовується з метою інформаційної підтримки під час створення та функціонування гідрогеологічних математичних моделей (переважно постійно діючих) і систем гідрогеологічного моніторингу, що вдало узагальнено на рис. 2.

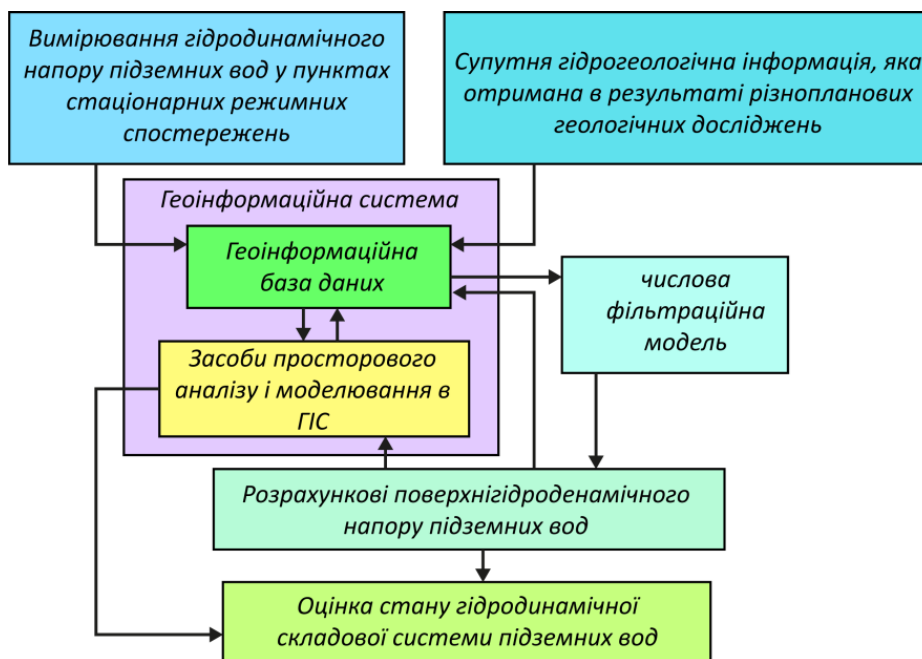


Рис. 2. Схема застосування гідрогеологічного моніторингу підземних вод на основі геоінформаційного підходу (Кошляков, 2011)

Актуальність дослідження. Актуальність полягає в обґрунтуванні необхідності створення, ведення та використання геобаз даних для задач комплексного моніторингу та прогнозування ЕГП, оскільки головну увагу потрібно приділяти вивченню гідрогеологічних умов, зокрема режиму ґрунтових вод та характеру поширення водоносних горизонтів.

Завданнями роботи є :

- аналіз та обробка масиву даних режимних спостережень за РГВ на території Києво-Печерської лаври за тривалий період часу (1990–2020 рр.);
- практичне застосування, інтерпретація та експериментально-дослідне моделювання отриманих результатів для встановлення зон поширення ЕГП на досліджуваній території.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню використання ГІС для розв'язання окремих задач із моделювання та вивчення різноманітних гідрогеологічних та геологічних об'єктів і процесів присвячені праці P.A. Burrough, K.W. Chaud, L.P. Konikow, C.P. Kumar, A. Jarna, D.F. Merriam, C. Soulsby, J. Tauxe, D. Tetzlaff та ін. Але оскільки при цьому використовуються дуже велика кількість різних за поставленими завданнями методик, то аналіз можливостей їх використання для розв'язку тих або інших задач ще далекий від завершення.

Проте, незважаючи на широкий спектр проведених досліджень, подальшого розвитку потребують теоретико-методичні підходи щодо визначення впливу зміни режиму ґрунтових вод на стан території, особливо в умовах гідрогеологічної неоднорідності досліджуваних ділянок.

Мета роботи – інтерпретація даних багаторічних спостережень за режимами поверхневих і ґрунтових вод з визначенням чинників впливу, які призводять до порушення гідрогеологічних умов та розвитку ЕГП на території Києво-Печерської лаври та виділення ділянок, для яких характерне поширення негативних екзогенних процесів.

Геологічні та гідрогеологічні умови території Києво-Печерської лаври. Перший етап будь-якого дослідження небезпечних ЕГП та власне ґрунтових вод складається зі збору всіх існуючих геологічних та гідрогеологічних даних щодо відповідного басейну підземних вод. Це, передусім, стосується інформації про геологічну будову території, опади, землекористування, рослинність, характеристики та межі водоносних горизонтів, якість ґрунтових вод. Якщо таких даних не існує або вони дуже мізерні, спочатку слід проводити програму польових робіт, оскільки жодна модель не має сенсу, якщо вона не базується на раціональній гідрогеологічній концепції басейну (Tetzlaff et al., 2014). Вся архівна та новітня інформація використовується для розробки концептуальної моделі. Тому слід детально вивчити територію дослідження, ґрунтовно визначивши всі можливі природні та геологічні фактори, що прямо чи опосередковано впливають на даний регіон.

У межах зони історичної забудови Києва виділено три орографічні області: Придніпровська височина, Поліська та Придніпровська низовини. У геологічній будові території беруть участь відклади палеогенової, неогенової і четвертинної систем. Для території Києво-Печерської лаври за даними буріння (Левашов та ін., 2008) встановлено, що в геологічній будові беруть участь:

- неогенові відклади (N) – представлені морськими утвореннями новопетрівської світи (N1pt) – пісковики, в товщі яких висічені печерні комплекси;

- четвертинні відклади (Q) – представлені товщею субаеральних бурих глин (Q1);

- техногенні голоценові утворення (t IV) – представлені насипними ґрунтами зі значними вмістом будівельних відходів.

Геологічну будову, умови, форми залягання шарів та їх потужність показано на інженерно-геологічних розрізах (рис. 3).

Територія досліджень розташована у північно-західній частині Дніпровського артезіанського басейну в зоні зчленування Українського щита і Дніпровсько-Донецької западини, складеної доволі потужною товщею осадових порід. До цих відкладів приурочено декілька водоносних горизонтів, що відрізняються один від одного літологічним складом вмісних порід, умовами циркуляції і розвантаження підземних вод. Окрім того, на території досліджень зустрічаються слабопроникні породи, які складають регіональні та локальні водотривкі верстви (відрізняються обмеженням по площі поширенням на окремих ділянках). Місцями, переважно на вододілах, зустрічається верховодка, приурочена, головним чином, до еолово-делювіальних суглинків, що формується у зоні аерації (Костюченко та Мокієнко, 2014).

На основі даних про рівні перших від поверхні водоносних горизонтів, отриманих у результаті спостережень за рівнями ґрунтових вод у режимних та розвідувальних свердловинах, пробурених різними організаціями (Київ-проект, СУППР, КГГП Мінгео, ІГН НАН України) за період з 1978 по 2001 р., виділяються шість водоносних горизонтів і три слабопроникних пласта.

На території Києво-Печерської лаври поширені такі водоносні ґрунтові горизонти (рис. 4):

- 1) у четвертинних еолово-делювіальних і озерно-льодовикових відкладах на плато (Верхня Лавра, верхня частина схилів, Гостинний двір, Дальньопечерний пагорб);
- 2) у четвертинних делювіальних ґрунтах на схилах;
- 3) повсюдно – в олігоцені (харківських) пісках (Левашов та ін., 2005).

Виклад основного матеріалу. Вихідними даними виступають багаторічні режимні спостереження за рівнями підземних та ґрунтових вод на території Національного заповідника "Києво-Печерська лавра", що проводились мережею режимних водопунктів. Зокрема, використано дані замірів РГВ у пробурених на території заповідника свердловинах, які проводились у період з вересня 1990 по березень 2020 р. Періодичність виконання замірів даного масиву становить у середньому 3-4 рази за місяць для кожної із свердловин. Відповідно ця інформаційна основа являє собою досить великий масив значень (31 свердловина, для кожної із яких близько 1300 значень), який для оптимізації подальшої роботи необхідно проаналізувати та інтерпретувати.

На етапі первинної обробки даних моніторингових спостережень, метою якої є впорядкування даних поодиноких спостережень і обчислення основних параметрів режиму підземних вод, виконують складання таблиць даних фактичних спостережень; побудову для кожної спостережної точки хронологічних графіків РГВ, обчислення за графіками основних параметрів режиму підземних вод. У таблиці даних фактичних спостережень вказують номери і місце розташування пунктів спостережень, тобто свердловин, всі числові значення показників РГВ, а також дати, коли виконано ці виміри. За цими даними виконують побудову графіків із вилученням аномальних свердловин в ПЗ Tableau (рис. 5), які ілюструють сезонний хід мілливості.

Як видно із наведених графіків, коливання рівня ґрунтових вод зазвичай мають циклічний характер. Так, найвищі рівні спостерігаються навесні кожного року, а найнижчі – у зимовий період. На основі аналізу фактичних даних встановлено таке. РГВ у межах Верхньої Лаври сягають відміток 178,0–181,0 м, за весь період

найвищі рівні спостерігались у 1996 та 2008–2009 рр. В останні роки довготривалі підйоми рівнів фіксувались у свердловинах, розташованих найближче до вул. Лаврської (w1, w2, w102, w103). Багаторічна амплітуда коливань по режимній свердловині № 1 (w1) склала 1,7 м.

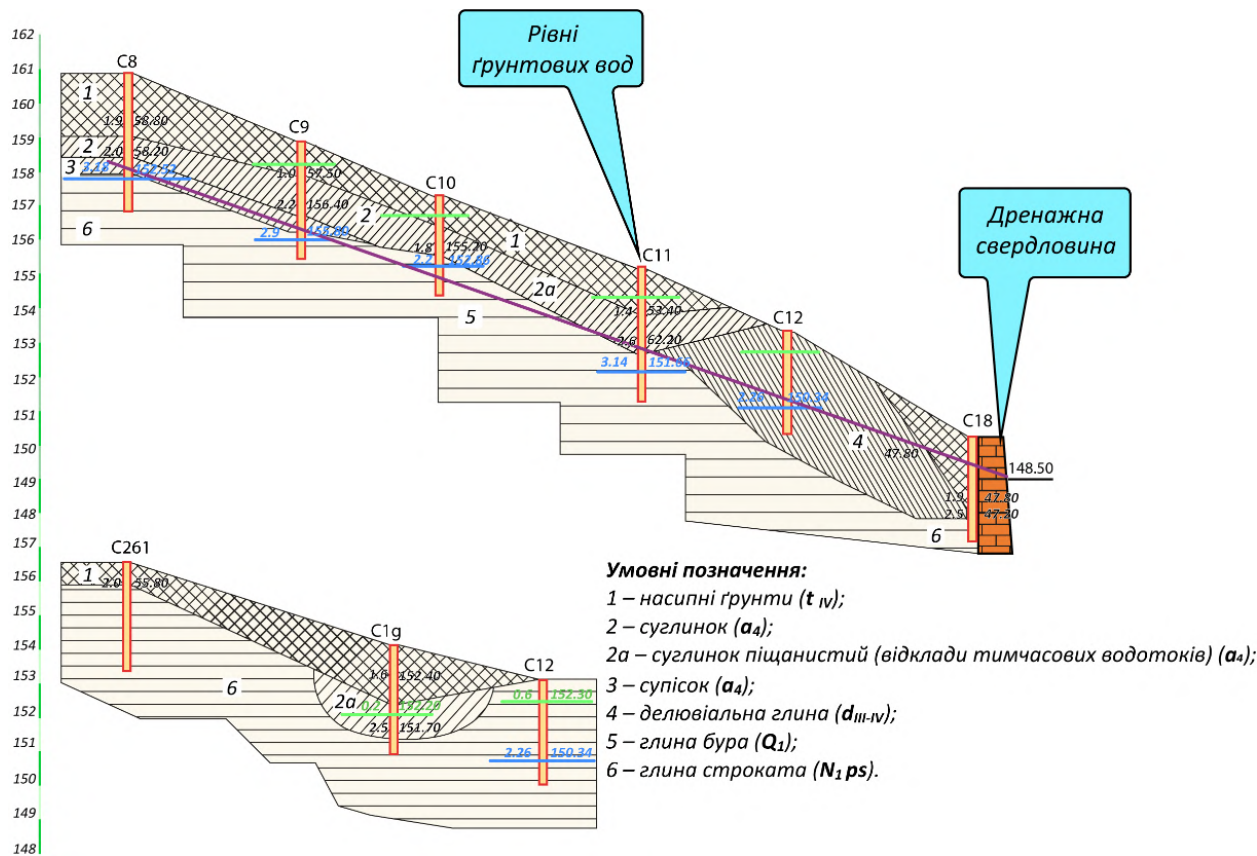


Рис. 3. Інженерно-геологічні розрізи території саду Близьких печер Кисво-Печерської лаври (Черевко та ін., 2015)



Рис. 4. Зони поширення постійного та тимчасового водоносних горизонтів



Рис. 5. Графіки річної зміни РГВ, що демонструють циклічний характер

На території Нижньої лаври (Гостинний двір), де кількість свердловин обмежена, коливання РГВ зазвичай мають циклічний характер – найвищі рівні спостерігаються навесні кожного року, а найнижчі – у зимовий період. Річна амплітуда становить 0,4–1,5 м.

На схилах Лаврського яру ґрунтові води залягають на глибині від 0,9 до 3,2 м від денної поверхні (зафіксовані спостережними свердловинами в саду Близьких печер) з абсолютними позначками 147,8–161,2 м. Потужність водоносного горизонту сягає 1,0–5,0 м. Амплітуда коливань становить 1,2–3,4 м.

Також на графіках чітко простежується залежність режиму ґрунтових вод від характеру живлення – інфільтрації атмосферних опадів, головним чином сніготанення (рис. 6). Щорічно навесні за рахунок живлення водоносного горизонту талими та дощовими водами РГВ підвищуються на 0,5–1,5 м та відбувається розширення площі водоносного горизонту (або утворення тимчасового).

Наступним етапом є підготовка досліджуваної території, яка виконується в ПЗ ArcMap. Для початку роботи створюється база даних, у якій будуть проводитись подальші операції. Завантажується растровий знімок території із відповідною географічною прив'язкою (GCS_WGS_1984). Усі шари даних, які будуть використовуватись для аналізу, повинні бути в єдиній картографічній проекції, адже прив'язка до єдиної картографічної проекції забезпечує точність і відповідність реальним умовам отриманих результатів. Знімок використовується як основа для виконання інтерактивної векторизації меж досліджуваної території та свердловин (рис. 7). Географічна прив'язка свердловин, що занесені до бази даних, є наступним важливим етапом дослідження. Географічна прив'язка точкових об'єктів – свердловин – виконувалась у процесі створення тематичної бази даних, оскільки координати зчитувались з атрибутивних даних у таблиці, які мають адресну інформацію.

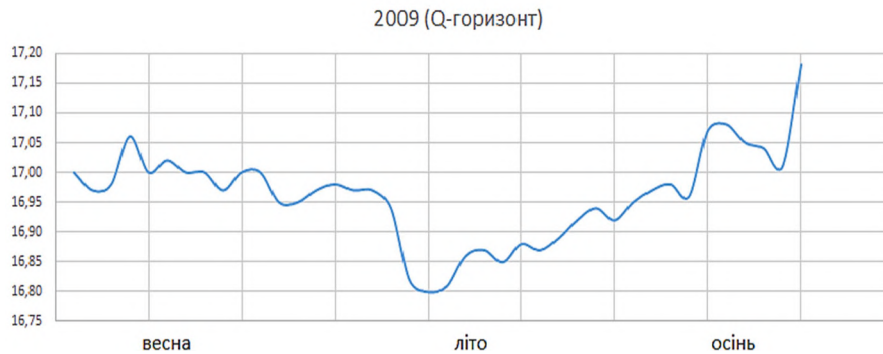


Рис. 6. Графік річної зміни РГВ

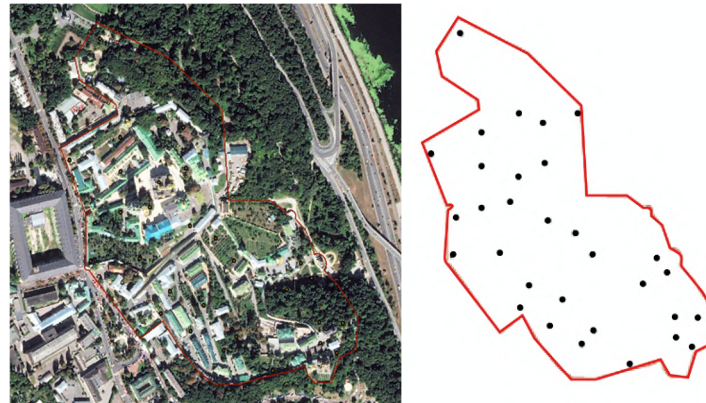


Рис. 7. Векторизовані межі території та свердловини

Оскільки знімок досить високої якості, векторизація проводиться без попередньої підготовки растрових даних. Інтерактивна векторизація пов'язана зі створенням об'єктів у ручному режимі за допомогою прив'язки осередків. Клас свердловин представлено у вигляді точкових об'єктів, клас границь досліджуваної території – як лінійний об'єкт. Кожна структурна одиниця бази даних містить порядковий номер, номер самої свердловини, дату замірів та власне самі РГВ.

Наступним кроком у підготовці території до моделювання поверхонь РГВ є створення карти ізоліній рельєфу. Для цього завантажується відповідний для даного регіону SRTM-знімок, для кожного пікселя якого залежно від яскравості характерне певне значення висоти. Для підвищення якості шару ізоліній, використовується інструмент Smooth Line (Згладжування ліній). Ізолінії проведено через кожні 5 м.

Теоретичні та практичні аспекти побудови поверхонь за РГВ. Наступним етапом обробки вихідних даних є моделювання поверхні. Створити поверхню означає заповнити простір між дискретними точками, що містять дані виміру безперервного явища. Поверхні є об'єктами, які мають певні значення в кожній точці по всій області їх простягання. Значення нескінченної кількості точок по всій поверхні витягуються з обмеженого набору вихідних значень. Вони можуть бути засновані на прямих вимірах, наприклад, значеннях висоти рельєфу або значеннях температур для температурних поверхонь. Значення для поверхні, розташовані між точками вимірювань, присвоюються шляхом інтерполяції (Документація ESRI ArcGIS, н.д.).

Для вибору методу інтерполяції необхідно розуміти, як поверхня може бути зображена засобами ГІС у векторних або растрових системах. У векторних системах зображення поверхні виконується за допомогою моделі нерегулярної триангуляційної мережі (TIN), що є одним із способів подання Z-величини. У растрових системах

поверхня, яка має назву ґрид, відображається у вигляді сукупності пікселів. Кожен піксель може характеризуватися відповідним значенням і, крім того, ще й займати деяку площу, зі збільшенням якої у растровій моделі даних знижується якість зображення поверхні.

Для виконання поставленого завдання – побудови поверхонь РГВ – у ПЗ ArcGIS можна використовувати такі методи, як інструменти інтерполяції зворотньо зважених відстаней, метод Сплайн (Spline), геостатистичні методи, серед яких виділяється Кригінг (Kriging).

Кригінг – це покращений геостатистичний метод, який дозволяє будувати передбачувану поверхню з набору точок із z-значеннями (Документація ESRI ArcGIS, н.д.). На відміну від інших методів інтерполяції в наборі інструментів *Інтерполяція*, інструмент Kriging передбачає інтерактивне дослідження просторової поведінки явища, представленого z значеннями, до вибору вами оптимального методу оцінки для побудови результатуючої поверхні. Кригінг – покроковий процес; він включає пошуковий статистичний аналіз даних, моделювання варіограми, створення поверхні та (додатково) вивчення поверхні дисперсії. Кригінг найкраще використовувати, якщо відома інформація про просторово корельовану відстань або направлене зміщення даних.

Інструмент Сплайн (Spline) використовує метод інтерполяції, який оцінює значення, застовуючи математичні функції, які зводять до мінімуму загальну кривизну поверхні, що приводить до побудови згладженої поверхні, яка проходить точно через вхідні точки.

Концептуально, опорні точки витягуються на висоту їх величини (Mitas, Mitasova, 1988). Сплайн встановлює математичну функцію на задану кількість найближчих вхідних точок при проходженні через опорні точки. Обов'язково повинні виконуватись дві основні умови: поверхня має проходити точно через точки з даними та мати мінімальну кривизну. Також накопичена сума квадратів других

похідних поверхні, взятих для кожної точки поверхні, має бути мінімальною (Документація ESRI ArcGIS, н.д.).

Алгоритм, який застовується для інструменту Сплайн (Spline), використовує таку формулу для інтерполяції поверхні (Franke, 1982):

$$S(x, y) = T(x, y) + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(r_j),$$

де $j = 1, 2, \dots, N$ – коефіцієнти, знайдені на основі розв'язання системи лінійних рівнянь; N – кількість точок; r_j – відстань від точки (x, y) до точки j ; $T(x, y)$ і $R(r)$ – визначаються по-різному, залежно від вибраних опцій.

Для обчислювальних цілей весь простір вихідного растру ділиться на блоки, рівні за розміром. Число блоків за напрямками x і y однакове, вони мають форму прямокутника. Число блоків визначається шляхом ділення загальної кількості точок у вхідному наборі точок на число, задане для числа точок (Mitas, Mitasova, 1988). Для менш рівномірно розподілених даних блоки можуть містити різну кількість точок, при цьому кількість точок є тільки грубим середнім. Якщо в одному будь-якому з блоків число точок менше восьми, блок буде розширено до того розміру, за якого в нього потраплять мінімум вісім точок.

Використовуються два типи побудови сплайнів: *Регуляризований* (Regularized) і *З натягом* (Tension). *Регуляризований тип* створює згладжену поверхню, яка поступово змінюється зі значеннями, які можуть виходити за межі діапазону опорних точок. Цей тип змінює критерії мінімізації таким чином, що в ці критерії включається третя похідна. Параметр ваги (Weight) задає вагу, присвоєну третьою похідною під час мінімізації; ця вага в літературі носить назву τ (тау). Високі значення цього параметра призводять до побудови більш згладженої поверхні. Добре підходять значення від 0 до 0,5. Використання цієї опції забезпечує побудову згладженої поверхні, поряд із згладженими поверхнями першої похідної. Ця методика корисна в тих випадках, коли необхідно обчислити другу похідну проінтерпольованої поверхні (Mitas, Mitasova, 1988).

Тип *З натягом* контролює жорсткість поверхні відповідно до характеру модельованого явища. Він створює менш згладжену поверхню.

Виходячи з того, що метод Кригінг вимагає більшу кількість вхідної інформації, яка за даними режимних спостережень не наявна у повному обсязі, для побудови поверхні РГВ більш прийнятним буде вибір інструменту *Регуляризований тип Сплайну*.

Інструмент Сплайн доступний у наборі інструментів 3D Analyst. Також можлива його реалізація у вікні Python, де вхідними даними є точковий шейп-файл, на виході – апроксимована поверхня – растр TIFF. Побудову початкової поверхні методом Сплайну виконано шляхом використання автоматичного скрипту, де як Z-координати виступає висотне просторове положення гирла свердловини. Далі виконується класифікація, яка являє собою процес об'єднання об'єктів у класи. Для вирішення поставлених завдань виконуємо ручну класифікацію, яка дозволяє згрупувати об'єкти за специфічними критеріями або порівняти значення їх атрибутів з конкретною характерною величиною (рис. 8). Діапазони значень визначають, які просторові об'єкти потраплять в клас, що, у свою чергу, впливає на відображення даних.

Необхідність виконання побудови даного об'єкта полягає в перевірці достовірності отриманих результатів та їх відповідності фактичним даним. Для встановлення адекватності створеної поверхні можна використати

інструмент *Перехресна перевірка* на базі Geostatistical Analyst Tools. Вона надає уяву про те, наскільки точно модель інтерполює невідомі значення. Відібрані точки послідовно виключаються із вибірки, потім розраховуються значення в цій точці з використанням решти даних, далі виміряне і обчислене значення порівнюються.

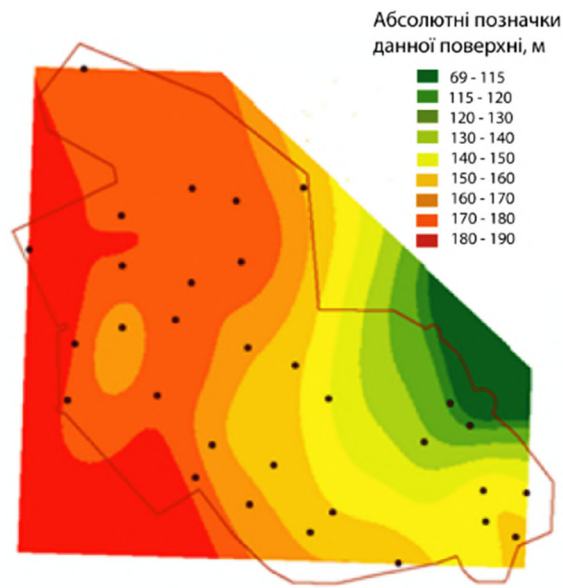


Рис. 8. Рекласифікована денна поверхня

Також можна виконати *ручну перевірку*. Для цього виконується порівняння діапазонів, в які потрапляють свердловини з відомими Z-координатами гирла, із побудованими на основі SRTM-знімка ізолініями рельєфу. Відкривши атрибутивну таблицю та зіставивши розміщення кожної свердловини у конкретному діапазоні із значеннями Z-координати, а також із положенням та значенням ізолінії рельєфу, простежується їх взаємна відповідність (рис. 9). Візуальне порівняння відповідності підписів та кольорової градації діапазонів, в яких розташовані свердловини, свідчить про достовірність побудованої моделі.

Практичне застосування та інтерпретація отриманих результатів для прогнозування ЕГП. Кожен геологічний процес і явище розвивається в певних природних умовах під впливом комплексу кліматичних, фізико-географічних і інженерно-геологічних факторів. Прогнозування важливо тому, що саме наявність, виникнення і розвиток тих чи інших геологічних і інженерно-геологічних процесів і явищ можуть викликати небажані зміни геологічного середовища. У зв'язку із відсутністю достатньої кількості різнобічного статистичного матеріалу про гідродинамічні умови, який необхідний для ґрунтового виконання розрахункових методів, і наявності великого масиву даних про РГВ у різні роки, а також аналітичних даних про геологічну будову, процеси та явища, що відомі на досліджуваній території, прогнозування проводиться з поєднанням різних методів. Для цього проаналізовано декілька явищ, що мають місце на досліджуваній території.

Встановлення можливих зон просідання ґрунту. Визначається поширення наявних на території дослідження водоносних горизонтів. Для цього виконано описані вище операції із побудови поверхонь методом Сплайн і отримано такі результати (рис. 10).

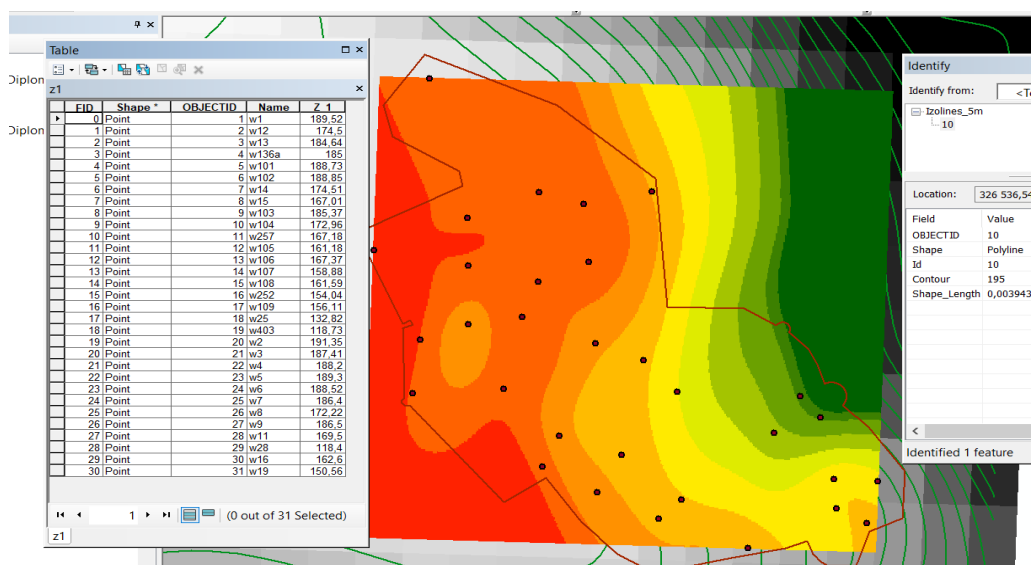


Рис. 9. Зіставлення фактичних даних із отриманими результатами положення гирла свердловин

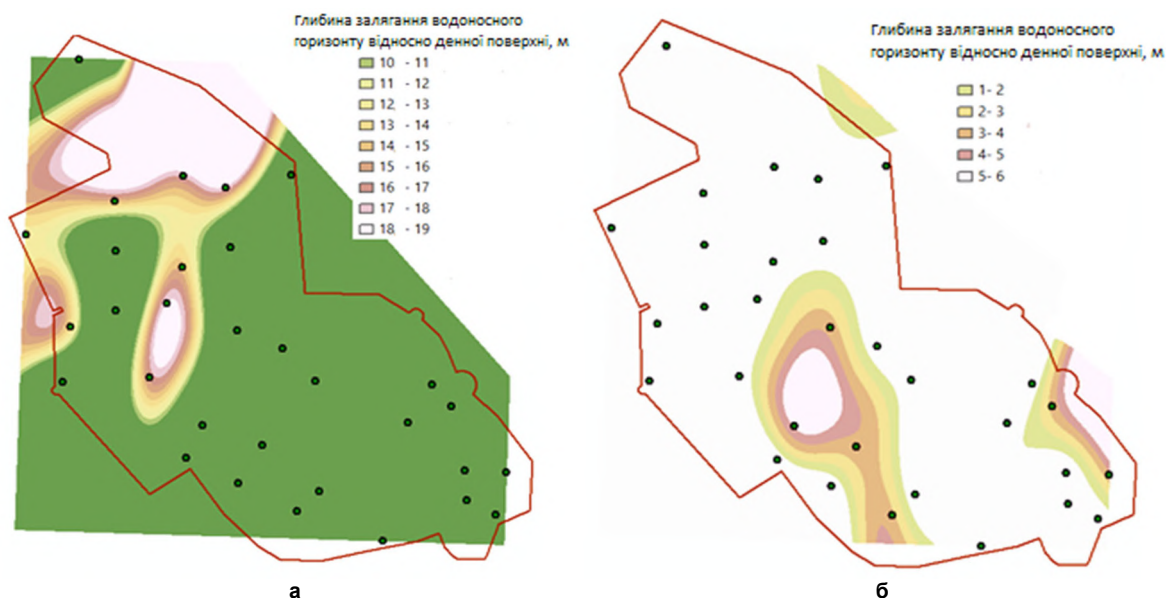


Рис. 10. Поширення четвертинного та палеогенового водоносних горизонтів станом на 2016 рік

Підземні води поширені у вигляді двох гідравлічно не пов'язаних водоносних горизонтів у четвертинних і палеогенових відкладах. Нижній водоносний горизонт розповсюджений по всій території Лаври. Верхній – четвертинний водоносний горизонт на території Верхньої Лаври поширений по всій площі, Нижньої Лаври – спорадично. Щоб яскравіше це продемонструвати, приховано верхній діапазон його поширення по всій території (рис. 10б). Виконавши зіставлення зон поширення кожного із горизонтів із літологічною будовою території, можна дійти висновку, що четвертинний горизонт має спорадичне поширення у зв'язку із тим, що розташований у зоні виклинювання бурих глин.

Для дослідження явища просідання ґрунту виконуються побудови поверхонь за РГВ на основі середньоарифметичних значень у двох вибірках – за 1995 і 2010 рр., і подальшим аналізом поширених у межах досліджуваної території водоносних горизонтів. Оскільки обидва горизонти мають прямий вплив на розвиток процесів просідання, об'єднуємо їх в одну поверхню, проводимо рекласифікацію діапазонів і отримуємо такі результати (рис. 11).

Як видно, у зазначений період часу діапазони поширення водоносних горизонтів зазнали змін. Фактичні дані також вказують на це. Наприклад, у свердловині № 14 (w14) середньорічний РГВ станом на 1995 р. перебував на позначці 3,11 м, у 2010 р. – 4,11 м. Подібна ситуація зустрічається в кожній із свердловин. Таке опускання поверхні водоносних горизонтів може бути зумовлене рядом факторів, що мали місце у даному районі: витокami з водонесучих комунікацій, значним притоком з боку прилеглої міської забудови, спорудженням будівель на заглиблених пальових основах, ліквідацією існуючих дренажних галерей тощо (Cherevko, 2019).

Далі для встановлення площ, на яких можливий розвиток явищ просідання ґрунту, виконано побудову розрізу. Ідея полягає в тому, що використовуються можливості системи лінійних координат для отримання інформації про глибину залягання поверхонь уздовж лінії розрізу з найближчих до неї свердловин. За віссю Х розміщується відстань уздовж розрізу, за віссю Y – глибина залягання водоносних горизонтів. Як вихідні дані використовується точковий шар свердловин. Кожна

точка в ньому містить інформацію про глибину залягання побудованих раніше поверхонь водоносних горизонтів, гіпсометричний рівень денної поверхні.

Щоб створити маршрут за лінією розрізу (рис. 12) запускається інструмент *Create Routes* (Створити маршрути), використовуючи коефіцієнт стиснення відстані (*Measure Factor* = 0.5), для масштабування розрізу по горизонталі. Результатом роботи інструменту буде таблиця, яка містить інформацію з класу об'єктів зі свердловинами і нове поле, в якому записані відстані уздовж маршруту. Додається розташування залягання поверхонь уздовж лінії розрізу за допомогою інструменту

Make XY Event Layer (Створити шар подій XY) з отриманої раніше таблиці. Для прив'язки свердловин, що містять інформацію про глибину залягання пластів, до відстані уздовж маршруту (лінії розрізу) використовується інструмент *Locate Features Along Routes* (Розміщення об'єктів уздовж маршруту). Далі, використовуючи наявну інформацію про геологічну та літологічну будову, за допомогою стандартних інструментів редагування ArcGIS Desktop, виконується оцифровка розрізу. Більшу частину процесу побудови розрізу можна автоматизувати, скориставшись візуальним середовищем моделювання робочих процесів *ModelBuilder*.

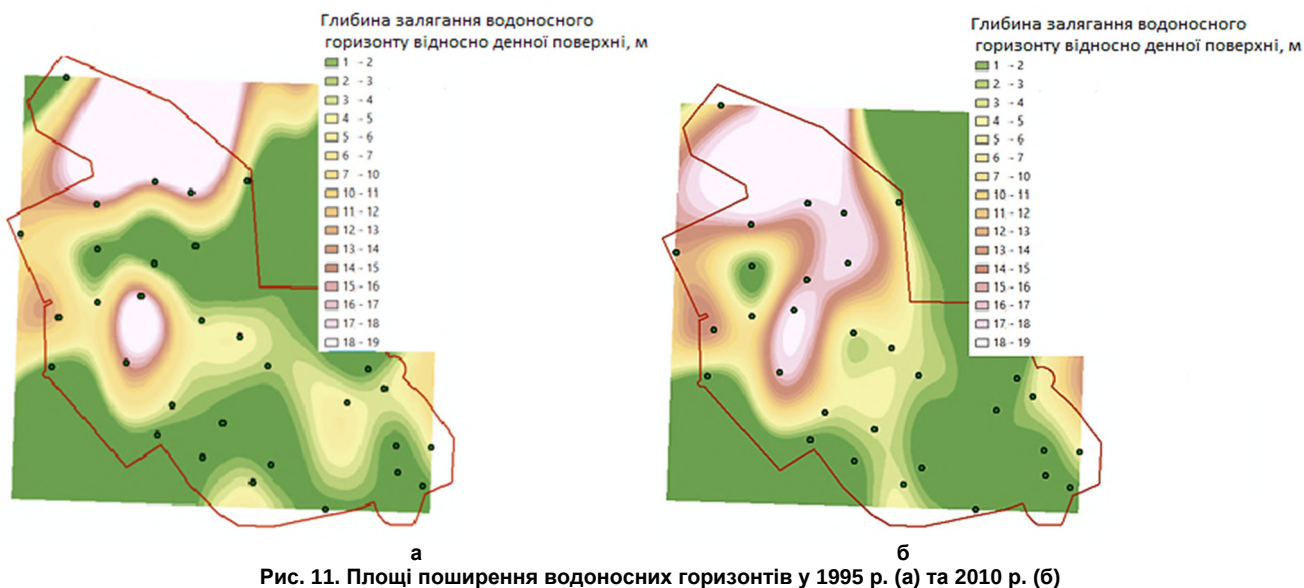


Рис. 11. Площі поширення водоносних горизонтів у 1995 р. (а) та 2010 р. (б)

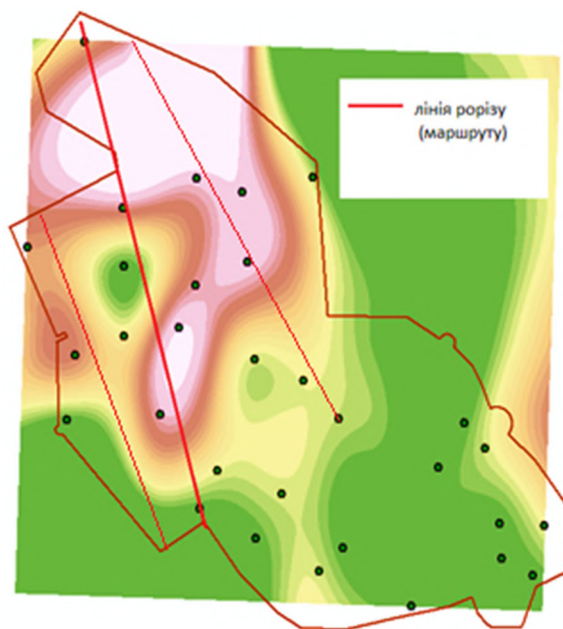


Рис. 12. Лінії розрізів на досліджуваній території

Виконавши ряд таких побудов, складається загальний схематичний геологічний розріз (рис. 13), на якому аналітично можна виділити потенційні зони просідання. Отже, вивчивши різнобічні матеріали вишукувань, які проводились на даній території (Левашов та ін., 2008; Черевко та ін., 2011), а також провівши кореляцію

діапазонів залягання поверхонь із даними про геологічну будову та літологічний склад, можна встановити найбільш імовірні площі поширення просідання ґрунту, які представлені на узагальнювальній схемі (рис. 14).

Поширення та розвиток процесів підтоплення. Підтоплення розглядається як процес, що призводить до

комплексної зміни природних умов у результаті підйому рівня ґрунтових вод та зволоження ґрунтів зони аерації. Під час підтоплення змінюються не тільки рівні, але й гідрохімічний режим ґрунтових вод, вологісний і сольовий

режими ґрунтів зони аерації, просадні властивості ґрунтів, ґрунтові процеси, властивості ґрунтів і пов'язана із цим трав'яниста й деревна рослинність, мікроклімат (Районування ризиків..., 2017).

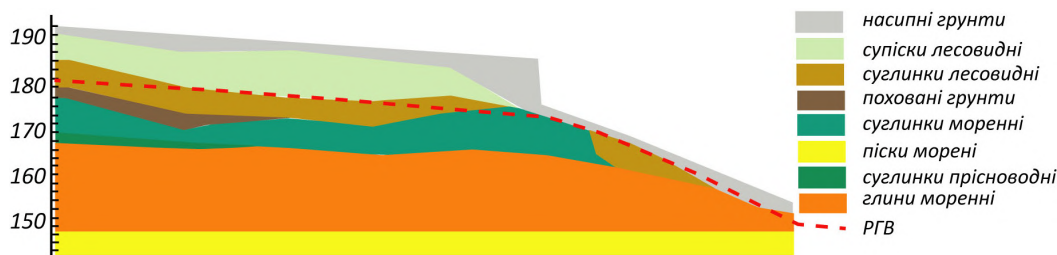


Рис. 13. Узагальнений схематичний геологічний розріз досліджуваної ділянки



Рис. 14. Узагальнювальний план-схема розвитку екзогенних геологічних процесів на території Києво-Печерської лаври (за результатами виконаних побудов та іншими фактичними даними)

Найбільш схильною до підтоплення ділянкою на досліджуваній території є сад над Близькими печерами. У Близькопечерному саді влаштована густа сітка спостережених режимних свердловин, за даними яких можна виконувати побудову поверхонь верхнього водоносного горизонту і відслідковувати його просторово-часові зміни. Для прикладу виконано побудову поверхні за даними станом на 25.02.2019 р. (рис. 15).

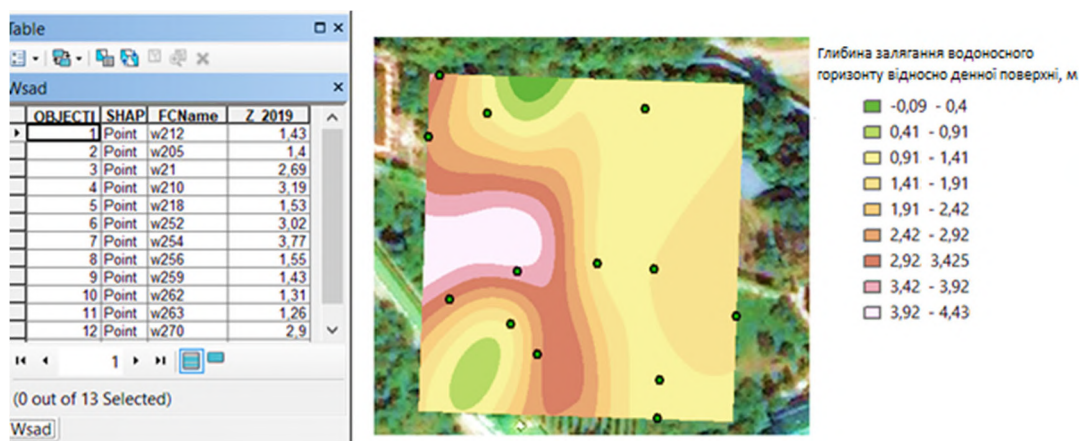


Рис. 15. Поверхня тимчасового водоносного горизонту у саду Близьких печер, який призводить до розвитку процесів підтоплення (станом на 25.02.2019 р.)

Дослідження процесів підтоплення мають важливе значення, оскільки від нього потерпають печерні комплекси. Для аналізу сучасного стану процесів підтоплення застосовано математико-картографічний метод досліджень на основі ГІС. За допомогою *Map calculator* (ArcView GIS) були зіставлені поверхні поширення і залягання ґрунтових

вод, побудовані на різні моменти часу. Виконавши ряд побудов для вибірок і порівнявши отримані результати з геологічними та літологічними даними, отримано такі висновки. У саду Близьких печер постійний водоносний горизонт поширений лише у верхній частині. На решті території водоносний горизонт має характер верховодки,

тобто тимчасового, і виникає на поверхні водотривкого шару (товщі бурих та строкатих глин) після сніготанення та довготривалих або рясних опадів. Ґрунтові води поширюються вниз по схилу в улоговинах еродованої поверхні бурих та строкатих глин, заповнених проникними ґрунтами. У роки високої водності (2008, 2010, 2013) водоносний горизонт формується на поверхні водотривкої товщі бурих та строкатих глин суцільним шаром. Потужність водоносного горизонту незначна, змінюється від 2,0 м у нижній частині саду над печерами до 6,0 м у верхній частині саду. Амплітуда коливань становить 1,2–3,4 м. На достовірність отриманих результатів вказують проведені раніше геофізичні дослідження території Близньопечерного саду (Левашов та ін., 2008), за якими визначені головні напрямки руху водних потоків.

Вивчення різнобічних матеріалів вишукувань попередніх років (Скальський та ін., 2007; Черевко та ін., 2015 та ін.) дозволяють зробити висновки, що формування горизонту ґрунтових вод на ділянці саду Близьких печер відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів, яка призводить до перезволоження ґрунтового масиву, підйому рівнів ґрунтових вод та подальшого поширення водоносного горизонту в бік печерних лабіринтів латеральними шляхами. Водомісткими породами є техногенні відклади; супіски та суглинки тимчасових водотоків, які заповнюють улоговини; делювіальні глини.

Висновки. Виконавши побудови поверхонь на основі режимних даних про РГВ, на досліджуваній території Києво-Печерської лаври можна виділити потенційні зони поширення небезпечних ЕГП, зокрема таких, як просідання і підтоплення ґрунту. Використовуючи отримані результати побудов і беручи до уваги дані про фіксовані раніше явища такого характеру, а також дані за проведеними раніше моніторинговими роботами, узагальнювальну схему (рис. 14) доповнено відповідною інформацією.

Звичайно, на сьогодні існує чимала кількість методик, які використовуються для вивчення ЕГП. Основна частина з них спрямована на вирішення більш локальних задач, зокрема таких, як моніторинг стану споруд та історичних об'єктів. Територія Києво-Печерської лаври розташовується на схилах долини Дніпра і Лаврського яру зі складними геологічними, гідрогеологічними і інженерно-геологічними умовами і характеризується наявністю інтенсивного техногенного навантаження на геологічне середовище, що звичайно ускладнює процес проведення моніторингу. Тому створення єдиної геобаз даних для досліджуваної території може оптимізувати процес моніторингу і прогнозування розвитку небезпечних геологічних процесів, а також дасть змогу ефективно реагувати на розвиток таких явищ і нівелювати їх поширення. Можна виділити цілий ряд завдань, які можуть ефективніше вирішуватись за допомогою такої бази даних, якщо говорити про її ведення в ПЗ ArcMap:

- створення та підтримка геоінформаційної бази даних може слугувати фактографічною основою для виконання різноманітних математичних моделей;
- використання при наповненні та підтримці бази всієї наявної інформації (наприклад, для певної ділянки території за допомогою логічних запитів із геобаз вибираються точки спостережень, які просторово знаходяться в межах ділянки та містять інформацію про рівень ґрунтових вод на визначений користувачем час);
- збереження результатів виконання різноманітних побудов та моделювання у вигляді шарів для подальшого вдосконалення існуючих і створення нових моделей території;

- виконання просторового аналізу і моделювання із інтеграцією в інші ГІС та із використанням інших ПЗ.

Як видно із широкого та різноманітного пакету інструментів, наявних і використовуваних у даній роботі в ПЗ ArcGIS, створення та ведення такої геобаз даних у поєднанні з іншими ПЗ може бути цілком прийнятним та ефективним.

Список використаних джерел

- Документація ESRI ArcGIS. (н.д.). Отримано із <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/analyze/commonly-used-tools/surface-creation-and-analysis.htm>.
- Зацерковний, В.І., Тішаєв, І.В., Віршило, І.В., Демидов, В.К. (2017). Геоінформаційні системи в науках про Землю. *НДУ ім. М. Гоголя*, 145-148.
- Костиuchenko, M., Mokienko, A. (2014). Оцінка небезпеки розвитку зсувів на території ботанічного саду імені академіка О.В. Фоміна. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 44, 43-48.
- Кошляков, О.Є. (2011) Моніторинг гідрогеодинамічної складової геологічного середовища урбанізованих територій (на основі ГІС). *Автореф. дис. ... д-ра геол. наук: 04.00.05*. Київ.
- Левашов, С.П., Піщаний, Ю.М., Корчагин, І.М. (2005). Геофізичні вишукування ділянки саду Свято-Успенської Києво-Печерської лаври з метою визначення зон підвищеної вологості ґрунтів, шляхів міграції підземних водних потоків, встановлення причин замокання ґрунту. *Звіт про НДР. ТОВ НВП "Геопром"*.
- Левашов, С.П., Піщаний, Ю.М., Корчагин, І.М. (2008). Геофізичне обстеження (вишукування) території Свято-Успенської Києво-Печерської лаври в районі саду над Близькими печерами, підпірної стіни Верхньої Лаври, ділянки Трапезної церкви з метою визначення та картування зон підвищеної вологості та шляхів міграції підземних водних потоків. *Звіт про НДР. ТОВ "Геолог-Буд"*.
- Районування ризиків підтоплення територій великих міст та агломерацій. (2017). Посібник до ДБН "Інженерний захист від підтоплення ґрунтовими водами територій та споруд". Отримано із www.uvovdgeo.org.ua.
- Скальський, О.С., Бугай, Д.О., Діло, С.П. та ін. (2007). Створення автоматизованої системи гідрогеологічного моніторингу комплексу Близьких печер Києво-Печерської Лаври. *Звіт про НДР. ПП "Гео-Еко-Консалтинг"*.
- Черевко, І.А., Куциба, В.О. (2011). Дослідження мікроклімату та інженерно-геологічних умов Близьких печер з метою визначення оптимальних умов експлуатації та збереження. *Діапазон печер лаврських*, 112-116.
- Черевко, І.А., Куциба, В.О., Моргун, І.П. (2015). Гідрогеологічні умови території Близньопечерного пагорбу, їх вплив на стан печер та засоби регуляції. *Болховітинівський щорічник*, 49-60.
- Cherevko, I.A. (2019). Hydrogeological conditions of the territory of Kyiv-Pechersk lavra and their influence on the technical state of monuments. *Sivershchyna in the history of Ukraine*, 12, 15-19.
- Frankle, R. (1982). Discrete data smooth interpolation by local splines. *Computer and Mathematics with Applications*, 8, 273-281.
- Kumar, C. (2019). An Overview of Commonly Used Groundwater Modelling Software. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 144-145.
- Kumar, C., Surjeet, S. (2015). Concepts and Modeling of Groundwater System. *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology*, 262-266.
- Mitas, L., Mitasova, H. (1988). Variational approach to the interpolation problem. *Computer and Mathematics with Applications*, 16, 983-992.
- Tauxe, J. (1994). Porous Medium Advection-Dispersion Modeling in a Geographic Information System. *Center for Research in Water Resources*, 1, 23-27.
- Tetzlaff, D.M., Tveiten, J., Salomonsen, P. et al. (2014). Geologic Process Modeling. *IX Conference of Hydrocarbon Exploration and Development*. Отримано із https://www.researchgate.net/publication/320183844_GEOLOGIC_PROCESS_MODELING.

References

- Cherevko, I.A., Kutsyba, V.O. (2011). Near Caves microclimate and engineering-geological conditions study for determination of optimal exploitation and storage conditions. *Dyva pecher lavrskykh*, 112-116.
- Cherevko, I.A., Kutsyba, V.O., Morhun, I.P. (2015). Hydrogeological conditions of Near Cave Hill territory, their influence on the cave state and means of regulation. *Bolkhovitinovskiy Shchorichnyk*, 49-60.
- Cherevko I. A. (2019). Hydrogeological conditions of the territory of Kyiv-Pechersk lavra and their influence on the technical state of monuments. *Sivershchyna in the history of Ukraine*, 12, 15-19.
- ESRI ArcGIS documentation. (n.d). Retrieved from <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/analyze/commonly-used-tools/surface-creation-and-analysis.htm>.
- Frankle, R. (1982). Discrete data smooth interpolation by local splines. *Computer and Mathematics with Applications*, 8, 273-281.
- Koshliakov, O.Y. (2011). Monitoring of the hydrogeodynamic component of the geological environment in urban areas (based on GIS). *Extended abstract of Doctor's thesis: 04.00.05*.
- Kostiuchenko, M., Mokienko, A. (2014). Landslide danger assessment in the A.V. Fomin Botanical Garden. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 44, 43-48.

Kumar, C. (2019). An Overview of Commonly Used Groundwater Modelling Software. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 144-145.

Kumar, C., Surjeet, S. (2015). Concepts and Modeling of Groundwater System. *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology*, 262-266.

Levashov, S.P., Pishchanyi, Y.M., Korchahin, I.M. (2008). Geophysical survey (search) of the Holy Dormition Kyiv-Pechersk Lavra's territory near the garden above the Near Caves, the retaining wall of the Upper Lavra, the Refectory Church area conducted to identify and map high humidity zones and groundwater flow migration routes. *Research Activity Report*. Heoloh-Bud LLC.

Levashov, S.P., Pishchanyi, Y.M., Korchahin, I.M. (2005). Geophysical searches of the Holy Dormition Kyiv-Pechersk Lavra's garden area conducted to determine high soil moisture zones, groundwater flow migration routes and to define soil moisture reasons. *Research Activity Report*. Academic and Research Enterprise Heoprom LLC.

Mitas, L., Mitasova, H. (1988). Variational approach to the interpolation problem. *Computer and Mathematics with Applications*, 16, 983-992.

Skalskyi, O.S., Buhai, D.O., Depo, S.P. and others. (2007). Establishment of automated system of hydrogeological monitoring of Near Caves complex in Kyiv-Pechersk Lavra. *Research Activity Report*. Heo-Eko-Konsaltnh Private Enterprise.

Tauxe, J. (1994). Porous Medium Advection-Dispersion Modeling in a Geographic Information System. *Center for Research in Water Resources*, 1, 23-27.

Tetzlaff, D.M., Tveiten, J., Salomonsen, P. et al. (2014). Geologic Process Modeling. *IX Conference of Hydrocarbon Exploration and Development*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/320183844_GEOLOGIC_PROCESS_MODELING.

Zatserkovnyi, V.I., Tishaiev, I.V., Virshylo, I.V., Demydov, V.K. (2017). Geographic information systems in the Earth sciences. *Nizhyn Mykola Gogol State University*, 145-148.

Zoning the risks of flooding in big cities and agglomerations. (2017). Engineering protection against territory and building groundwater flooding: building code handbook. Retrieved from www.uwodgeo.org.ua.

Надійшла до редколегії 12.06.22

I. Cherevko, PhD (Geol.),
E-mail: ira071165@yahoo.com,
Kiev-Pechersk Lavra National Reserve,
9 Lavrska Str., Kyiv, 01015, Ukraine;
V. Zatserkovnyi, Dr. Sci. (Tech.),
E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com;
P. Trofymenko, Dr. Sci. (Agri.), Assoc. Prof.,
E-mail: trofimenkopetr@ukr.net;
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
I. Pampukha, PhD (Tech.), Assoc. Prof.,
E-mail: pamp@ukr.net;
B. Popkov, PhD (Mil.), Senior Researcher,
E-mail: popkov.b.a@gmail.com;
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Military Institute, 81 Lomonosova Str., Kyiv, 03189, Ukraine;
V. Hudak, Student,
E-mail: VassiaGudak@gmail.com,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

GEODATABASE APPLICATION FOR REGIME OBSERVATIONS OF KYIV-PECHERSK LAVRA TERRITORY HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS AND ITS ANALYSIS

Groundwater is the most dynamic and vulnerable component of the geological environment, which in real-time responds to changes in natural and natural-anthropogenic factors and defines the emergence and intensification of the dangerous geological processes, particularly such as landslides, ground subsidence, flooding, etc. To assess the impact of various factors on the exogenous geological processes (EGPs) development and intensification, primarily the most fast-changing ones, in addition to meteorological conditions (precipitation amount and its seasonal distribution) hydrogeological conditions, and the most volatile indicator - groundwater level - are taken into account.

Continuous territory monitoring requires numerous complex and diverse problem solutions, including reasonable and comprehensive forecasting of changes under the influence of physical, chemical, and biological factors based on modern information technologies.

Given that National Kyiv-Pechersk Preserve territory has a complex relief with a height difference of 74.5 m from south to northeast in real terms, it is necessary to conduct constant monitoring and landslide prevention activities, carry out surface water drainage measures, replace water supply and disposal communications, and determine the impact of changes in groundwater regime on the territory to achieve the ultimate objective. This multifaceted process can be optimized by a geodatabase, the use, and maintenance of which will enable to focus on the study of the hydrogeological conditions, in particular the groundwater regime and the nature of aquifers changes.

Keywords: groundwater levels, exogenous geological processes, aquifer distribution, hydrological conditions, geoinformation system.