

Лідія Іванівна Давибіда,

к. геол. н., доцент, кафедра геотехногенної безпеки та геоінформатики,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна,
e-mail: davybida61085@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-9796-7124>;

Марія Михайлівна Тимків,

асистент, кафедра геотехногенної безпеки та геоінформатики,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
e-mail: maritymkiv@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-5392-116X>

ГЕОСТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ І ОПТИМІЗАЦІЯ ДЕРЖАВНОЇ МЕРЕЖІ ГІДРОГЕОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ В МЕЖАХ БАСЕЙНУ ПРИП'ЯТІ (УКРАЇНА)

Система державного моніторингу підземних вод України перебуває у незадовільному стані, що зумовлює втрату даних безперервних базаторічних режимних спостережень за гідрогеологічними характеристиками, знижує достовірність оцінок і прогнозів стану підземної гідросфери.

Метою даного дослідження є вирішення актуальної проблеми оцінки фактичного стану й оптимізації мережі спостережних гідрогеологічних свердловин для території транскордонного водообмінного басейну Прип'яті в межах України. Для досліджуваної території характерною є недостатня репрезентативність державної мережі гідрогеологічного моніторингу як у порівнянні з нормативами країн Європейського Союзу, так і з діючою мережею моніторингу підземних вод сусідньої Білорусі.

У рамках даного дослідження авторами здійснено огляд існуючих підходів до організації і вдосконалення мережі режимних спостережень. Запропонована концепція розвитку і впровадження системи гідрогеологічного моніторингу території України на основі геостатистичного оцінювання мережі та геоінформаційного підходу.

У якості просторової основи для проектування систем спостережень державного і регіонального рівнів використано схему гідрогеологічного районування за умовами формування водообміну у верхньому гідрогеологічному поверсі. Межі водообмінних басейнів і суббасейнів у природних умовах, як правило, визначаються розмірами та конфігурацією річкових басейнів.

Для території досліджуваного водообмінного басейну Прип'яті проведено аналіз щільності та рівномірності розподілу пунктів спостереження, варіограмний аналіз просторового розподілу рівнів підземних вод у межах досліджуваної території, виконано оцінку очікуваної похибки просторового моделювання рівневої поверхні підземних вод за результатами моніторингу для існуючої мережі. Результати геостатистичного аналізу дали змогу обґрунтувати розміщення проектних свердловин у межах водообмінних суббасейнів для підвищення якості вирішення задач гідрогеологічного моніторингу.

Ключові слова: спостережні свердловини, метод найближчого сусідства, рівні підземних вод, крігінг, середньоквадратична похибка.

Л. И. Давыбиды, М. М. Тымкив. ГЕОСТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ СЕТИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В ПРЕДЕЛАХ БАСЕЙНА ПРИПЯТИ (УКРАИНА). Система государственного мониторинга подземных вод Украины пребывает в неудовлетворительном состоянии, что приводит к потере данных непрерывных многолетних режимных наблюдений за гидрогеологическими характеристиками, снижает достоверность оценок и прогнозов состояния подземной гидросферы.

Целью данного исследования является решение актуальной проблемы оценки фактического состояния и оптимизации сети наблюдательных гидрогеологических скважин для территории трансграничного водообменного бассейна Припяти в пределах Украины. Для исследуемой территории характерна недостаточная репрезентативность государственной сети гидрогеологического мониторинга как по сравнению с нормативами стран Европейского Союза, так и с действующей сетью мониторинга подземных вод соседней Беларуси.

В рамках данного исследования авторами выполнен обзор существующих подходов к организации и совершенствованию режимных наблюдений. Предложена концепция развития и внедрения системы гидрогеологического мониторинга территории Украины на основе геостатистического оценивания сети и геоинформационного подхода.

В качестве пространственной основы для проектирования систем наблюдений государственного и регионального уровней использована схема гидрогеологического районирования по условиям формирования водообмена в верхнем гидрогеологическом этаже. Границы водообменных бассейнов и суббасейнов в естественных условиях, как правило, определяются размерами и конфигурацией речных бассейнов.

Для территории исследуемого водообменного бассейна Припяти проведен анализ плотности и равномерности распределения пунктов наблюдения, вариограмный анализ пространственного распределения уровней подземных вод в пределах исследуемой территории, выполнена оценка ожидаемой погрешности пространственного моделирования уровневой поверхности подземных вод по результатам мониторинга для существующей сети. Результаты геостатистического анализа позволили обосновать размещение проектных скважин в пределах водообменных суббасейнов для повышения качества решения задач гидрогеологического мониторинга.

Ключевые слова: наблюдательные скважины, метод ближайшего соседства, уровни подземных вод, кригинг, среднеквадратичная погрешность.

Постановка проблеми. Підземні води є найбільш динамічною складовою геологічного середовища. Тому для вивчення фізичної суті і причинно-наслідкових зв'язків гідрогеологічних

явищ і процесів, складання надійних прогнозів їх мінливості необхідно використовувати новітні ефективні методи організації гідрогеологічного моніторингу. На даний час в Україні склалася

вкрай несприятлива і загрозна ситуація щодо функціонування системи спостережень за кількісними і якісними характеристиками підземних вод. Недостатнє фінансування, застаріле вимірювальне обладнання, різке скорочення кількості спостережних свердловин, відсутність єдиної бази даних і координованої взаємодії між організаціями-суб'єктами моніторингу, призупинення ведення спостережень за мінливістю рівнів, температурою і хімічним складом унеможливають обґрунтовані оцінку, моделювання і контроль параметрів підземної гідросфери. Так, станом на 01.01.2018 р. мережа державного моніторингу підземних вод складалась із 892 спостережних пунктів, зокрема на ґрунтові води – 288, на міжпластові води – 214, на опорних полігонах по вивченню умов формування експлуатаційних запасів підземних вод – 390. Проте спостереження за рівнем підземних вод у 2017 році проводились лише по 224 спостережних пунктах, а за хімічним складом – по 125 [6]. Така ситуація є катастрофічною, особливо, враховуючи той факт, що на початку 90-х років державна мережа гідрогеологічного моніторингу налічувала 7000 свердловин, абсолютна більшість яких зараз є законсервованими або взагалі ліквідованими. Таким чином, дані багаторічних рядів безперервних спостережень – втрачені, що унеможливує здійснення обґрунтованих оцінок і прогнозів динамічних гідрогеологічних процесів [2, 7, 9].

Очевидно, що необхідно розробити заходи для відновлення державної спостережної мережі і її поступової адаптації до європейських норм і вимог [18]. Відмітимо, що одним із основних принципів управління водними ресурсами у більшості розвинених країн є здійснення моніторингу і територіального управління на рівні річкового басейну, а не адміністративної території. Басейновий принцип управління обґрунтовується єдністю поверхневих і підземних вод у межах річкового басейну.

У роботі [9] виділено ряд першочергових завдань для реорганізації державної мережі гідрогеологічного моніторингу. Зокрема, у найбільш стислі терміни заплановано проведення інвентаризації пунктів спостережень, оцінку їх репрезентативності, розробку концепції реформування системи моніторингу, створення відповідних галузевих нормативних документів, а також формування єдиної бази даних із залученням ІС-технологій.

Для реалізації басейнового принципу обробки даних гідрогеологічного моніторингу в якості просторової основи для державного рівня системи спостережень доцільно розглядати схему районування за умовами формування водообміну у верхньому гідрогеологічному поверсі [2, 16].

Система вивчення підземного стоку ґрунтується на динамічних особливостях водообмінних басейнів різного порядку, виділених за принципом єдності потоків підземних вод від областей формування стоку до його основного розвантаження, яке контролюється єдиним замкнутим балансом підземних вод. Розміри і межі водообмінних басейнів у природних умовах, як правило, визначаються розмірами та конфігурацією річкових басейнів.

Картограма щільності діючих пунктів спостережень за динамікою ґрунтових вод [6, 7] для басейнів II-го і III-го порядків підтверджує вкрай нерівномірний розподіл спостережних свердловин у межах України, а отже, і дефіцит гідрогеологічної інформації для окремих територій (рис. 1).

Зокрема, недостатня забезпеченість пунктами моніторингу характерна для басейну Дону, північної частини басейну Дніпра, півдня басейну Південного Бугу, окремих водообмінних округів (басейнів III порядку) басейну Дністра. Саме ці території потребують першочергового розгляду і проведення заходів для відновлення мережі гідрогеологічного моніторингу. Особливу увагу, згідно вимог Рамкової Водної директиви ЄС, слід приділяти транскордонним басейнам, розташованим на території кількох держав [4, 12, 17].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значна кількість і широка географія досліджень, присвячених проблемам проектування і вдосконалення мереж моніторингу підземних вод, результати яких зокрема представлені в роботах [3, 9-14, 16, 17, 20, 22-29], свідчать про виняткову актуальність даного питання.

У результаті опрацювання як класичної літератури [3, 11, 19, 20], так і сучасних публікацій [13, 14, 25], можна виділити два основних підходи до організації мереж гідрогеологічного моніторингу:

1) проектування на основі математико-статистичного підходу, який базується на формальній статистичній оцінці щільності пунктів спостережень з урахуванням заданої похибки екстраполяції досліджуваних параметрів [3, 25]. Даний підхід застосовується і для проектування опорних мереж, і для невеликих за площею ділянок досліджень у районах розміщення водозаборів меліоративних споруд, полігонів складування відходів тощо. Спостережні свердловини розміщують у вузлах проектно-геометрично-правильної сітки, відстань між якими визначається необхідною точністю і детальністю досліджень. При бурінні свердловин їх розташування коригується з урахуванням особливостей конкретної місцевості.



Рис. 1. Схематична карта щільності спостережних пунктів для водоносного горизонту ґрунтових вод у межах водообмінних басейнів

2) проектування на основі гідрогеологічного районування території з урахуванням умов і чинників формування підземних вод і їх режиму (геологічної, тектонічної і орографічної будови, дренажності території і глибини залягання підземних вод, умов їх живлення і розвантаження, літології водоносних порід, взаємозв'язку підземних і поверхневих вод тощо). Основною одиницею такого районування є басейн підземних вод, виділений за геоструктурними умовами або за принципом єдності водообміну [9, 13, 14, 17, 23-27]. У межах кожного басейну схеми розташування точок мережі моніторингу для вивчення режиму й балансу поверхневих, ґрунтових і міжпластових вод узгоджуються, причому вивченню підлягають лише основні водоносні комплекси і горизонти [3, 18]. Режимні пункти розміщуються на типових ділянках, при цьому щільність регіональної мережі повинна бути достатньо інформативною для побудови адекватних регіональних математичних моделей, які створюються для оцінки стану і прогнозу кількісних і якісних змін підземної гідросфери.

Часто ці два підходи поєднують і застосовують одночасно для однієї території. Найбільш ефективною вважається мережа, яка при мінімальному рівні економічних затрат дає найбільш

повну інформацію про мінливість основних параметрів гідрогеологічного режиму (рівнів, температури, вмісту хімічних речовин тощо). Тому при проектуванні мережі намагаються врахувати всі існуючі особливості умов формування режиму підземних вод, тому первинну мережу проектують максимальної щільності (відстань між сусідніми пунктами зазвичай не перевищує 2 км [3, 12, 14]) і, після 2-3 років експлуатації і ретельного аналізу отриманих режимних даних, виконують оптимізацію і раціоналізацію мережі моніторингу. При цьому у межах кожного гідрогеологічного району (ділянки) залишають ті пункти, для яких отримані параметри режиму близькі до середніх значень загальної мережі району, вилучають пункти, які не дають специфічної інформації (є аналогами сусідніх точок спостережень), розширюють мережу у напрямках, де спостерігається певна невизначеність через складні гідрогеологічні умови чи наявність техногенного впливу, або де є необхідність уточнення інформації для вирішення специфічних питань екологічної безпеки, зокрема для територій, уражених екзогенними геологічними процесами. Даний підхід забезпечує максимальну інформативність мережі, хоча її надмірна щільність на початкових етапах проектування збільшує матеріальні ви-

трати на її утримання і експлуатацію.

Аналіз накопиченого досвіду подібних досліджень дозволив авторам [29] виділити три основні групи методів оптимізації гідрогеологічних спостережних мереж: гідрогеологічні, геостатистичні і застосування цифрових просторових моделей. При цьому базовими є гідрогеологічні методи, що враховують особливості гідрогеологічних систем і компонентів балансу ґрунтових вод у їх межах, та неодноразово використовувались при розробці керівних документів для управління програмами спостереження за підземними водами [18].

Геостатистичні методи дещо рідше застосовують для проектування мереж моніторингу рівня ґрунтових вод, оскільки вони вимагають великої кількості вимірювань для оцінки просторової структури мінливості досліджуваних параметрів, проте, дисперсія помилок оцінки для інтерполяції рівнів ґрунтових вод часто використовується як критерій для оцінки ефективності мережі [13, 26-29]. Аналіз публікацій з даної проблематики дозволяє виділити метод крігінгу як основний геостатистичний інструмент проектування та оптимізації мережі гідрогеологічного моніторингу, що обумовлено його перевагами як точного і гнучкого інтерполятора, можливостями оцінки дисперсії помилки інтерполяції, а також програмною реалізацією даного методу у більшості сучасних комерційних і відкритих ГС.

Створення цифрових моделей чисельних характеристик підземних вод та їх інтеграція з фільтраційними моделями може бути використано для визначення місць розташування пунктів мережі гідрогеологічного моніторингу чи її оптимізації на локальному рівні досліджень [20, 24, 29]. Проте даний метод недоцільно застосовувати для розробки регіональних мереж моніторингу рівня підземних вод через складність обчислень і неможливість урахування просторової неоднорідності гідрогеологічних умов.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Необхідно відмітити, що більшість розглянутих наукових публікацій і методичних рекомендацій щодо організації моніторингових спостережень у першу чергу детально висвітлюють питання проектування й оптимізації мереж моніторингу хімічного складу підземних вод і локальних мереж моніторингу динаміки рівнів у районах розміщення водозаборів або об'єктів, що значно порушують баланс підземних вод. У той же час, проблемам організації гідрогеодинамічного моніторингу регіонального і державного рівнів (зокрема, у межах транскордонних територій) приділено значно менше уваги.

Зазначимо також, що для багатьох країн, де

підземні води є основним джерелом водопостачання, щільність мереж гідрогеологічного моніторингу є досить високою (наприклад, у Австрії – 11 пунктів на км², Німеччині – 19 пунктів на км², Великобританії – 39 пунктів на км² [19]). Тому запропоновані для таких територій методики, [19, 22-24, 26], для України, де спостережні свердловини розташовані вкрай нерівномірно, значна частина їх ліквідована, а існуючі ряди спостережень містять суттєві пропуски, повинні бути переглянуті й адаптовані.

Недостатньо вивченими залишаються й питання застосування геоінформаційного підходу до вирішення подібних задач. На думку авторів, використання геоінформаційних систем (ГІС), до складу яких, зокрема входять програмні інструменти просторового і геостатистичного аналізу, надасть змогу поєднувати можливості різних груп методів проектування і оптимізації мереж гідрогеологічного моніторингу, систематизувати інформацію, отриману в результаті режимних спостережень, у межах будь-яких територіальних одиниць, а також створювати й оперативно оновлювати постійно діючі гідрогеологічні 2-D і 3-D моделі на ГІС-основі.

Формулювання мети статті. Метою дослідження є геоінформаційний аналіз фактичного стану мережі гідрогеологічного моніторингу і геостатистичне обґрунтування оптимальної щільності та проектного розташування нових спостережних пунктів у межах окремого водообмінного басейну, а також оцінка підвищення ефективності запроєктованої мережі для вирішення науково-прикладних гідрогеологічних задач.

У якості досліджуваної території обрано українську частину басейну річки Прип'ять (рис. 2).

Даний вибір пояснюється трьома причинами: 1) низька щільність діючих пунктів гідрогеологічного моніторингу; 2) унікальність природних (зокрема, гідрогеологічних) умов, що обумовлюють високу інтенсивність розвитку процесів підтоплення; 3) річка Прип'ять протікає в межах України і Білорусі, її басейн є транскордонною водною системою, що дає можливість розповсюдження отриманих висновків на інші території як України, так і сусідніх країн. Необхідно також враховувати актуальний досвід Білорусі, де заходи реформування і вдосконалення системи гідрогеологічного моніторингу вже були успішно проведені [12].

Матеріали і методи дослідження. У межах України розташовані правобережні притоки р. Прип'яті, як беруть початок на Волино-Подільській і Придніпровській височинах. За своїм режимом річки належать до типу рівнин-

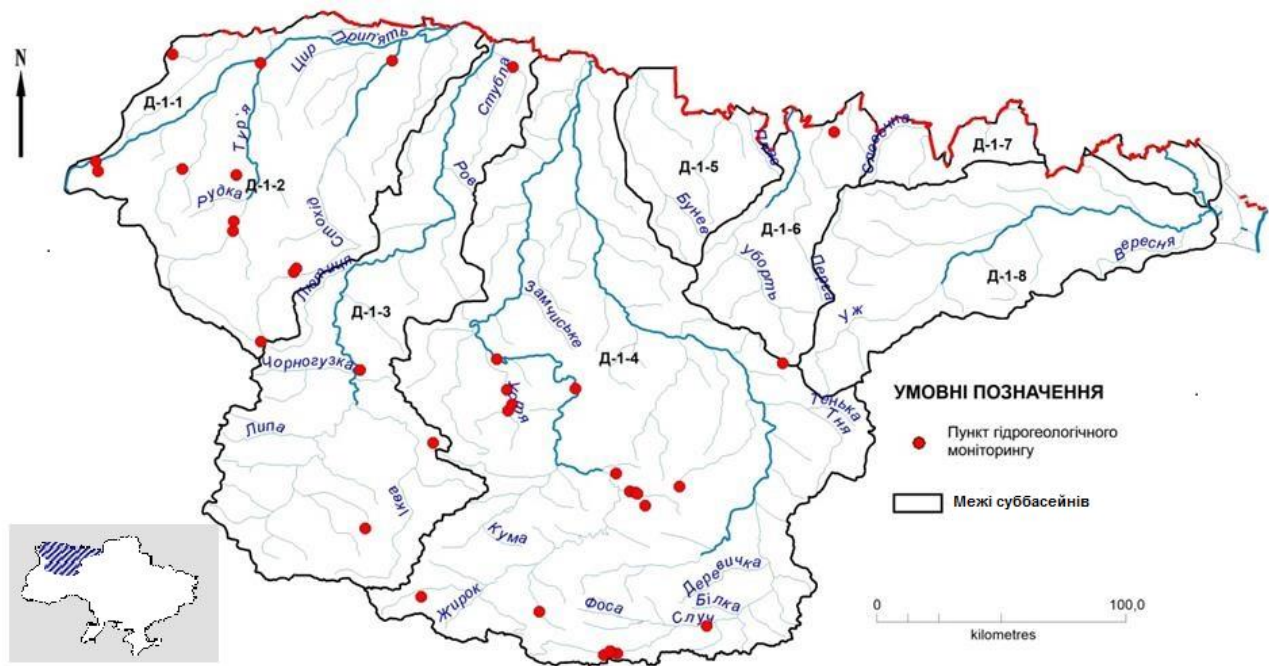


Рис. 2. Оглядова карта території дослідження

них, переважно атмосферного живлення з потужним весняним паводком і низькою меженню (часто порушуються літніми і зимовими дощовими паводками). Середньорічні модулі стоку змінюються від 3 до 4 л/с на км². Значна частина річкового стоку (35-40%) припадає на весняні місяці (березень-квітень); на літньо-осінній період (травень-листопад) припадає 50-60% і на зимовий (грудень-лютий) до 10%. Територія розташована в зоні надмірного зволоження і характеризується стійким розвитком процесів підтоплення та максимальним в Україні заболоченням (до 20 % території).

Як вже було зазначено, територія є транскордонним басейном підземних вод із переважачим напрямком стоку з Білорусі в Україну. За умовами формування водообміну в межах водообмінного басейну Прип'яті виділяють 8 водообмінних округів (суббасейнів 4-го порядку) (рис. 2): Д-1-1 – басейн озера Турського та Турського каналу; Д-1-2 – басейн річок Вишівка, Турія, Стохід; Д-1-3 – басейн Стирі; Д-1-4 – басейн Горині і Случі; Д-1-5 – басейн Льви і Ствиги; Д-1-6 – басейн Уборті і Перги; Д-1-7 – басейн Слободня та малих річок; Д-1-8 – басейн Ужа.

У структурно-гідрогеологічному відношенні водообмінний басейн Прип'яті належить до Волино-Подільського басейну. Характерною особливістю території є поступове занурення порід у західному і південно-західному напрямках. Водонасні горизонти поширені у відкладах верхнього протерозою, кембрію, ордовику, силуру, девону і карбону, які перекриті товщею відкладів

мезозой-кайнозою. Слід відзначити відсутність регіональних водотривів у межах досліджуваної території. Зона інтенсивного водообміну обмежена глибиною розвитку тріщинуватих порід, яка складає 100-110 м у західній і центральній частинах басейну і 300-350 м – у північно-східній частині. У північно-східній частині ця зона включає увесь розріз аж до кристалічного фундаменту, у центральній – до порід девону і силуру, а у зануреній західній частині вона обмежена верхньокрейдовими породами. Нижче вказаних глибин ступінь тріщинуватості порід різко знижується і породи стають водотривким шаром, який розмежовує перший гідродинамічний поверх від другого.

У місцях неглибокого залягання фундаменту, між підземними водами різних водонасних горизонтів, існує гідравлічний зв'язок, внаслідок чого на окремих ділянках утворюються спільні водонасні комплекси. Для водопостачання використовують майже всі водонасні горизонти і комплекси. Найбільший водовідбір здійснюється з неогенових та крейдових горизонтів [5].

Актуальна інформаційна база державної системи моніторингу підземних вод за даними ДНВП «Геоінформ України» містить інформацію про 41 спостережну свердловину в межах досліджуваної території (див. рис. 2). Серед цих свердловин 14 пробурені на безнапірний водонасний горизонт ґрунтових вод і, відповідно, 27 – на напірні горизонти підземних вод. Співвідношення між свердловинами з природним і порушеним режимом складає відповідно 16 і 25. Необхідно

відмітити також нерівномірність розташування існуючих пунктів моніторингу, більшість з яких розміщені в межах водообмінного суббасейну притоки Горинь (Д-1-4), тоді як у суббасейнах Уборті, Ствиги й Ужа мережа практично відсутня [8, 16].

Щільність спостережної мережі (з урахуванням усіх діючих спостережних свердловин) для досліджуваної території становить приблизно 1 пункт на 1700 км², тоді як для території Білорусі середня щільність – 1 гідрогеологічна свердловина на 500 км², а зокрема для білоруської частини басейну Прип'яті – 1 пункт на 700 км² [12]. Необхідно також відмітити, що згідно рекомендацій щодо ведення гідрогеологічного моніторингу в країнах ЄС, щільність спостережної мережі повинна становити щонайменше 1 пункт на 20-25 км² для кількісної і якісної оцінки ресурсів підземних вод, статистично обґрунтованого моделювання і ефективного контролю процесів, що відбуваються в підземній гідросфері [19].

На першому етапі оптимізації необхідно виконати аналіз просторових характеристик існуючої мережі моніторингу [7].

Рівномірність розподілу спостережних пунктів по досліджуваній території – це необхідна умова для застосування багатьох видів аналізу і моделювання. Схема розподілу пунктів є рівномірною, якщо їх щільність (кількість точок на одиницю площі) у будь-якій підобласті території дослідження дорівнює щільності у всіх інших підобластях.

У свою чергу рівномірні схеми поділяють на регулярні та випадкові. Схема є регулярною, якщо точки спостережень створюють певний вид мережі. Це означає, що відстань між точками i та j у деякому напрямку мережі є константою для будь-якої пари точок i та j для даної мережі.

Для перевірки рівномірності розподілу точок часто використовується метод найближчого сусідства. Головна перевага методу найближчого сусідства полягає у тому, що він дозволяє, крім оцінки рівномірності, отримати інформацію про природу цієї рівномірності (тобто, встановити, за регулярною чи випадковою схемою розподілені точки) відповідно до значення числового критерію – R -статистики [7, 8]. Даний критерій враховує як щільність точок мережі для досліджуваної території, так і середнє значення відстані до найближчої сусідньої точки мережі, і набуває значень в інтервалі від 0 до 2,15. На практиці для класифікації схем розподілу пунктів спостережень за допомогою методу найближчого сусідства застосовують таку шкалу: $0,00 < R < 0,50$ – групова схема; $0,50 < R < 1,50$ – випадкова схема; $1,50 < R < 2,15$ – регулярна схема [1, 8].

Для виявлення і оцінки впливу локальних геометричних особливостей мережі (наявності кластерних структур і зон низької щільності) на достовірність моделей, побудованих на основі даних моніторингу, виконують аналіз топології мережі за допомогою гістограм відстаней між точками і площ полігонів Вороного-Тіссена [1].

Наступним етапом є визначення оптимального розташування моніторингових свердловин на основі формальних геостатистичних оцінок просторових характеристик мережі з урахуванням похибки екстраполяції досліджуваних параметрів. Дане завдання може бути вирішене у середовищі ГІС із застосуванням крігінгу із подальшою оцінкою похибок [7, 11, 14, 20, 25]. Важливою властивістю крігінгу є точне відтворення значень вимірювань у точках, де вони відомі [15, 22, 26-28]. Необхідно також відмітити, що варіація крігінгу не залежить від значень вихідних даних, а лише від щільності і конфігурації розташування точок спостережень. Тобто, крігінг дає однакову варіацію для всіх точок з аналогічним взаємним розташуванням, і фактично варіація крігінгу є характеристикою щільності мережі. Окрім оцінки (прогнозу) значення інтерпольованої величини в деякій точці, метод крігінгу дозволяє оцінити похибку інтерполяції для кожної прогнозованої точки. Очевидно, що при заданому критичному значенні похибки (визначається детальністю і масштабом досліджень) можна встановити максимально допустиму відстань між точками розташування пунктів мережі моніторингу. Аналіз попереднього досвіду використання геостатистичних методів для оцінки, проектування і оптимізації моніторингових мереж [26, 28] свідчить також, що застосування методу крігінгу для інтерполяції результатів спостережень не вимагає їх відповідності нормальному закону розподілу. Ці властивості крігінгу дозволяють широко його використовувати для оптимізації мереж моніторингу [1, 15, 10, 11, 13, 22].

Узагальнений алгоритм опрацювання даних для оптимізації мережі гідрогеологічного моніторингу на основі геостатистичного аналізу у геоінформаційному середовищі представлений на рисунку 3.

Виклад основного матеріалу дослідження.

У ході виконання ГІС-аналізу характеру розподілу пунктів гідрогеологічних спостережень у межах території дослідження встановлено середню відстань між сусідніми пунктами $D=17,73$ км і підтверджено їх відповідність випадковій схемі розташування ($R=0,86$), що забезпечує певну рівномірність і незалежність вимірів, проте гістограми, що відображають результати геоінформаційного аналізу геометричних параметрів мережі (відстані між точками спостережень, площі полі-

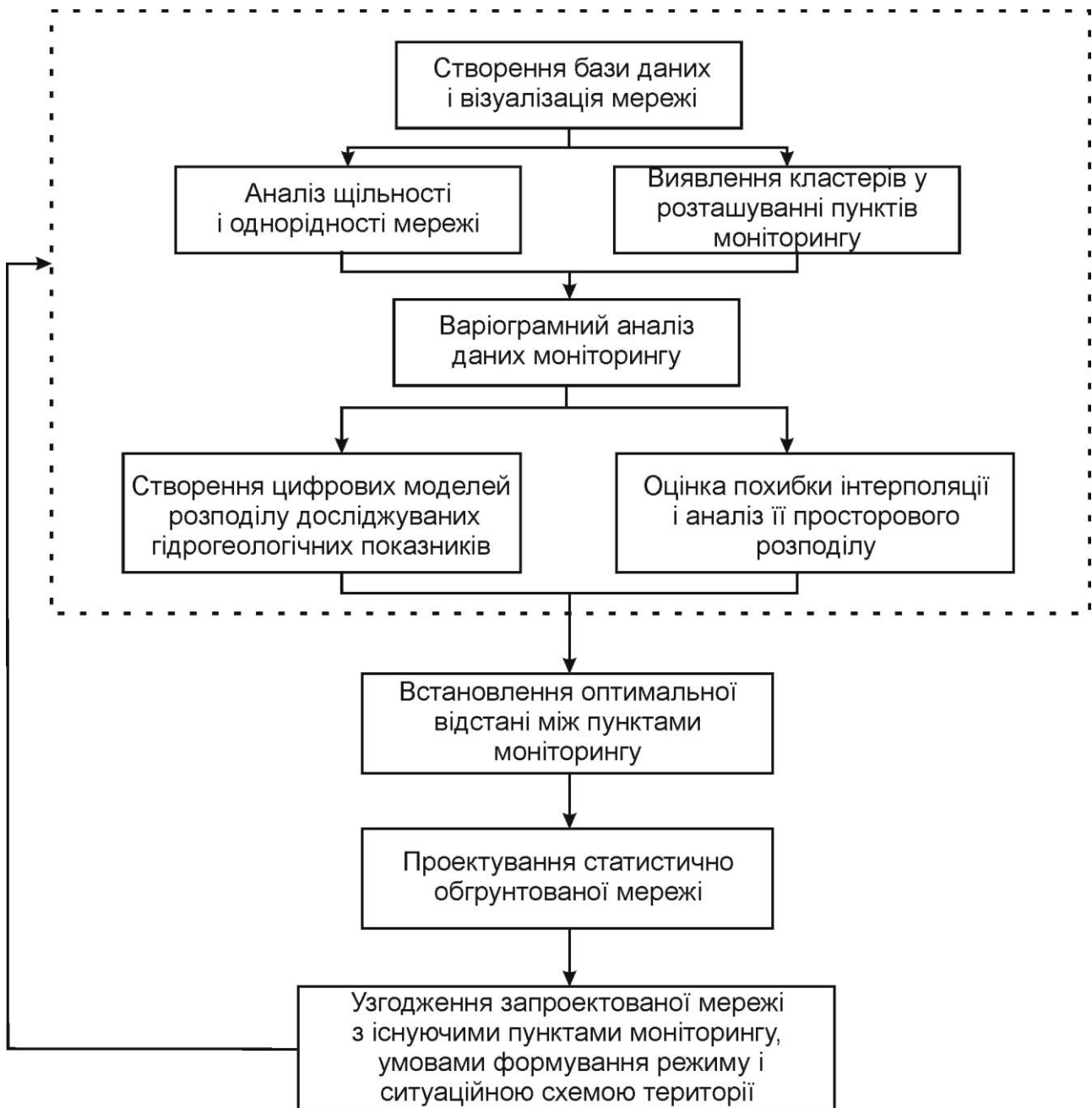


Рис. 3. Схема послідовності геостатистичного аналізу та оптимізації мережі гідрогеологічного моніторингу

гонів Вороного-Тіссена) свідчать про її значну недосконалість (рис. 4). Оскільки при рівномірному розподілі точок в просторі число пар повинно бути однаковим для всіх відстаней, то зростання числа пар з ростом відстані між точками свідчить про наявність кластерів (у даному випадку – локально розміщених груп спостережних свердловин) (рис. 4 а). Кластерністю мережі обумовлена значна асиметрія гістограми площ полігонів Вороного-Тіссена (рис. 4 б).

Очевидно, що для досліджуваної території є доцільним подальший розвиток (відновлення законсервованих і спорудження нових свердло-

вин) системи моніторингу.

Враховуючи той факт, що спостережні свердловини пробурені на напірні і безнапірні водонасінні горизонти з різними типами режиму (як природними, так і порушеними), характеризуються різними періодами спостережень (від 1-2 років до 40-50 років щомісячних спостережень), а також містять пропуски різної тривалості, виконання кореляційного і кластерного аналізу рядів спостережень для виділення груп свердловин із синхронним режимом є недоцільним. Для оцінки кількісних характеристик мінливості глибини положення рівнів підземних вод виконано по-

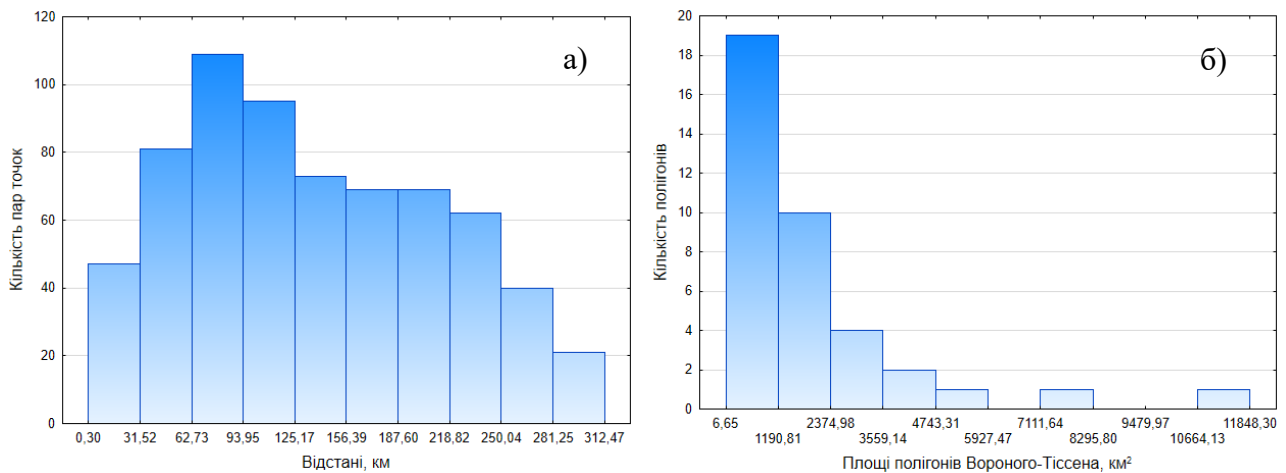


Рис. 4. Гістограми відстаней між точками мережі (а) і площ полігонів Вороного-Тіссена (б)

передній статистичний аналіз їх середньомісячних значень, розрахованих за замірами, здійсненими у 2009-2016 роках. Візуалізація результатів аналізу для пунктів моніторингу виконана за допомогою діаграми розмаху (середньобагаторічне значення положення рівня і амплітуда його коливань), що показана на рисунку 5, і графіка середньоквадратичних відхилень мінливості рівнів у спостережних свердловинах (рис. 6). Згідно ві-

домостей ДНВП «Геоінформ України» і отриманих графіків можна зробити висновок про приналежність пунктів гідрогеологічного моніторингу здебільшого до єдиного комплексу підземних вод, поширеного у тріщинуватих кристалічних породах, гідравлічно пов'язаних із ґрунтовими водами у водно-льодовикових, озерно-льодовикових і делювіальних відкладах у межах інтервалів глибин (0÷5) м, рідше – (10÷15) м.

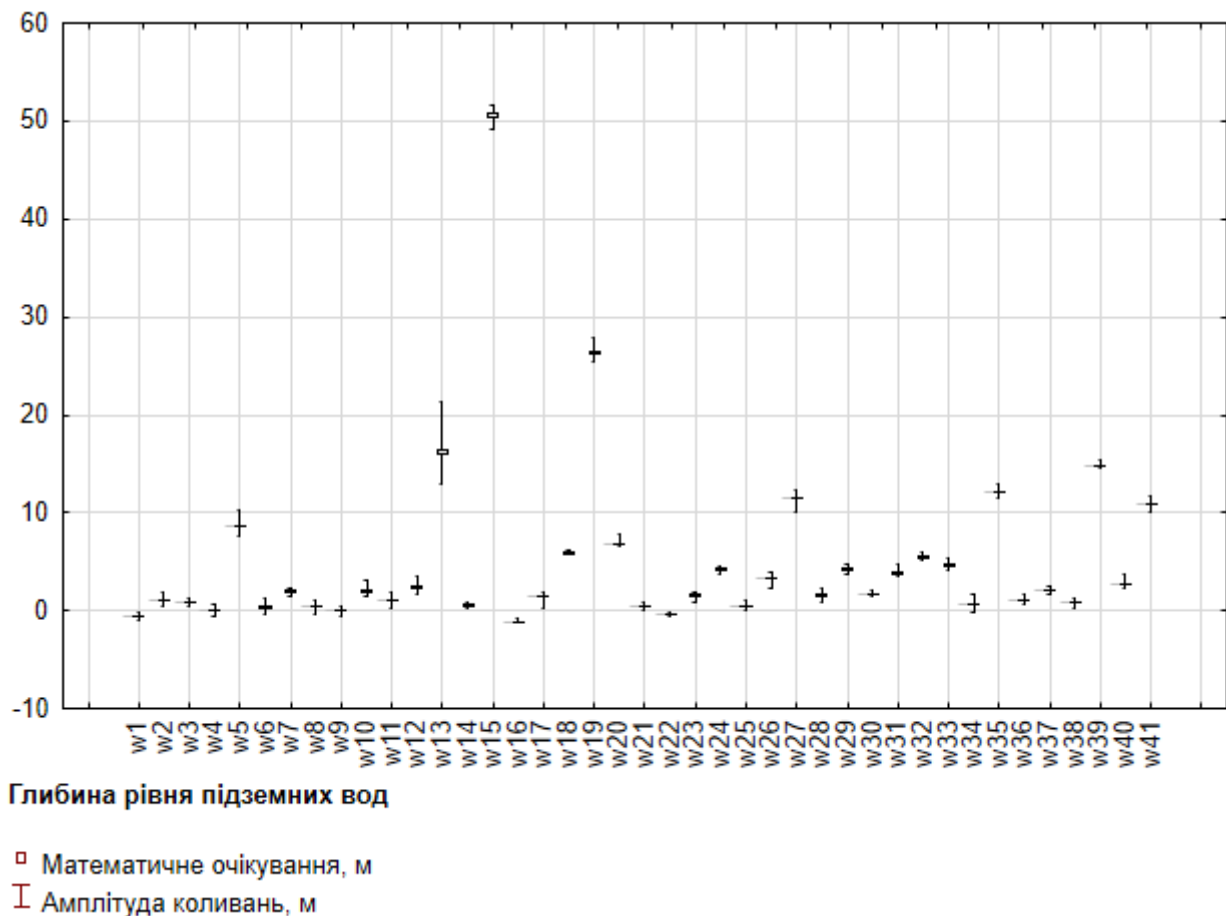


Рис. 5. Статистичні параметри динаміки рівнів підземних вод у спостережних свердловинах

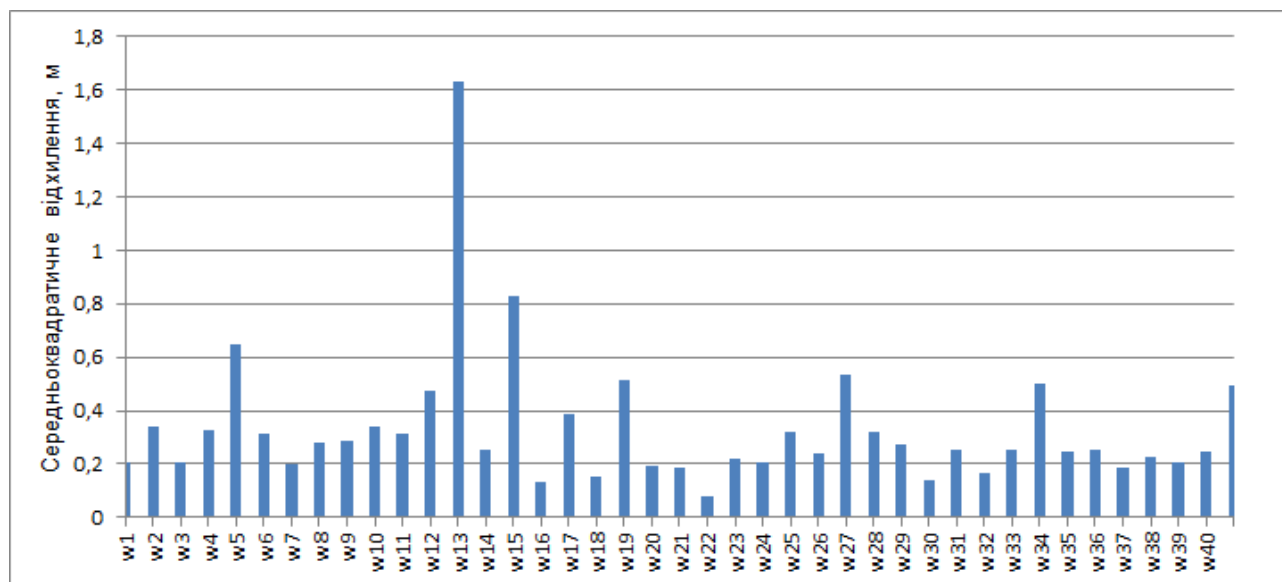


Рис. 6. Середньоквадратичні відхилення мінливості рівнів підземних вод у спостережних свердловинах

Для моделювання просторової мінливості рівнів підземних вод для регіональних масштабів досліджень у якості інтерпольованої величини, як правило, використовують абсолютні відмітки середньобагаторічних рівнів (50% забезпеченості) [11, 13, 23, 24]. Дані числові характеристики були розраховані для кожного спостережного пункту як різниця абсолютної відмітки гирла свердловини і середньобагаторічної глибини залягання рівня підземних вод. Гістограму та основні статистичні характеристики отриманої вибірки даних наведено на рисунку 8а. Розподіл є мультимодальним, що може бути пов'язано як із значною варіацією гідрогеологічних і геоморфологічних умов у межах досліджуваної території, наявністю трендів, обумовлених регіональними і локальними напрямками підземного стоку, так і обмеженим обсягом даних (39 спостережних свердловин). Саме тому крігінг є оптимальним методом для геостатистичного аналізу подібних даних, оскільки, як вже було зазначено, його застосування не вимагає відповідності розподілу вхідної вибірки даних нормальному закону.

Надалі для оцінки просторової кореляційної структури даних виконано побудову експериментальної і підбір теоретичної варіограмної моделі (рис. 8б), від якої залежить подальша ефективність застосування методу та величина похибок. Варіограма показує залежність між дисперсією рівня підземних вод у точках спостережень і відстанню між ними. Надалі емпірично підібрана залежність використовується для передбачення значень у інших точках місцевості, тобто для просторової інтерполяції.

Винятком є свердловини w15 (№ 249328816)

і w19 (№ 255070046), глибина рівня підземних вод яких становить відповідно 50,65 м і 26,32 м від земної поверхні, а середньоквадратичні відхилення значення глибини – 0,83 м і 0,51 м є несуттєвими порівняно з середньобагаторічним положенням рівня у них. Ймовірно, режим даних свердловин є атиповим і характеризує режим ізольованих міжпластових верхньокрейдяного карбонатного і верхньопротерозойського теригенного водоносних горизонтів.

Дана гіпотеза підтверджується графіками регресійних залежностей рівнів підземних вод від абсолютних висот (рис. 7).

Абсолютні відмітки рівнів підземних вод для свердловин w15 і w19 різко відрізняються від загальної тенденції (рис. 7а), а при вилученні їх із загальної вибірки залежність між поверхнею водоносних горизонтів і рельєфом земної поверхні стає практично лінійною (значення коефіцієнта детермінації $R^2=0.992$) (рис. 7б). Отже, при подальшому аналізі характеристики пунктів w15 і w19 не враховувались. Результати спостережень, отримані у цих свердловинах доцільно враховувати як допоміжну інформацію для побудови комплексних гідрогеологічних моделей.

Підбір експериментальної варіограми здійснено з урахуванням можливої наявності тренду за допомогою методу найменших квадратів із подальшою кросвалідацією (перехресною перевіркою) результатів інтерполяції рівневої поверхні (табл. 1) на основі варіограм різного типу.

Отримані результати свідчать, що найбільш оптимальним варіантом для моделювання гідрогеологічних параметрів, отриманих для існуючої державної мережі моніторингу підземних вод, у межах даної території є сферична варіограма

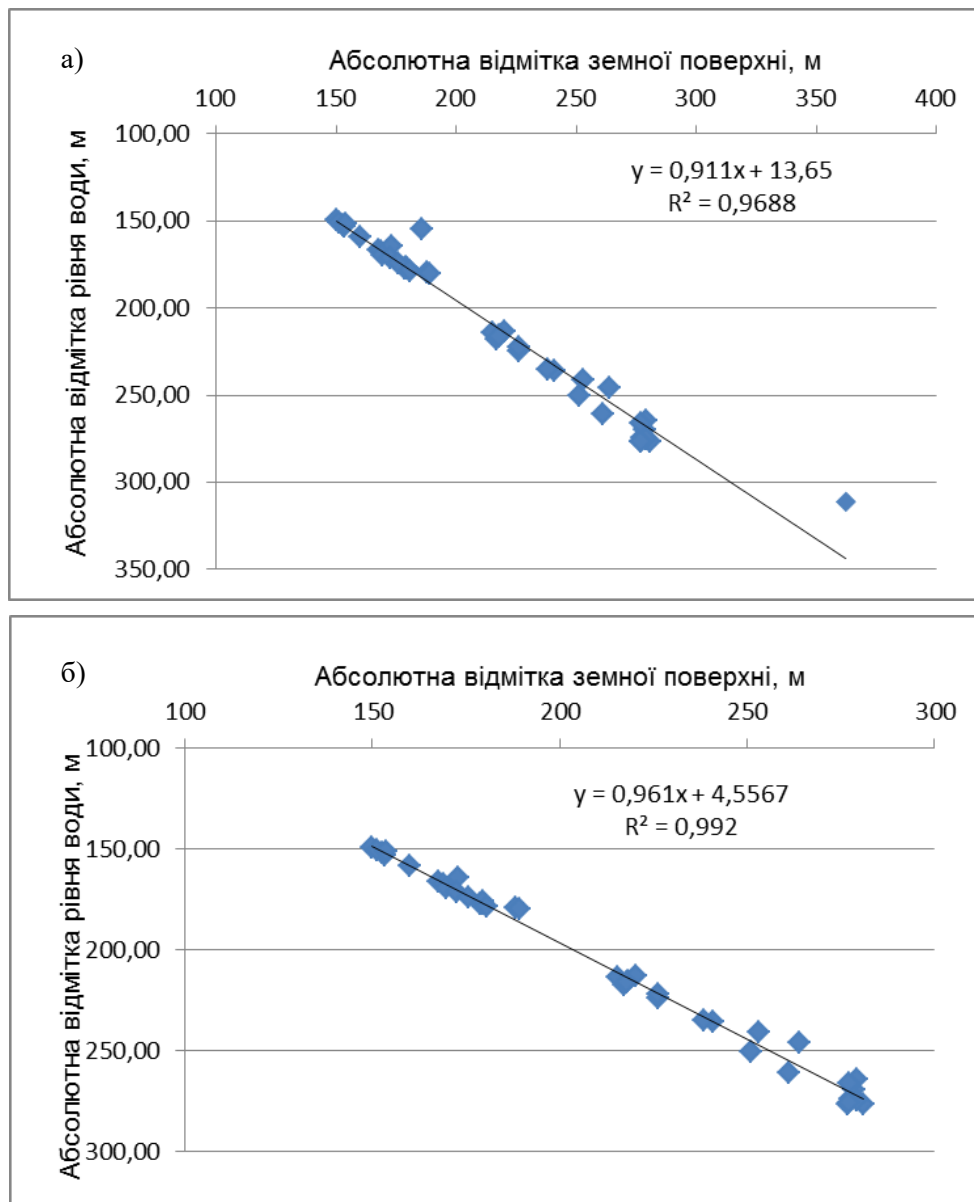


Рис. 7. Емпіричні залежності між рівневою поверхнею водоносних горизонтів і абсолютними відмітками рельєфу

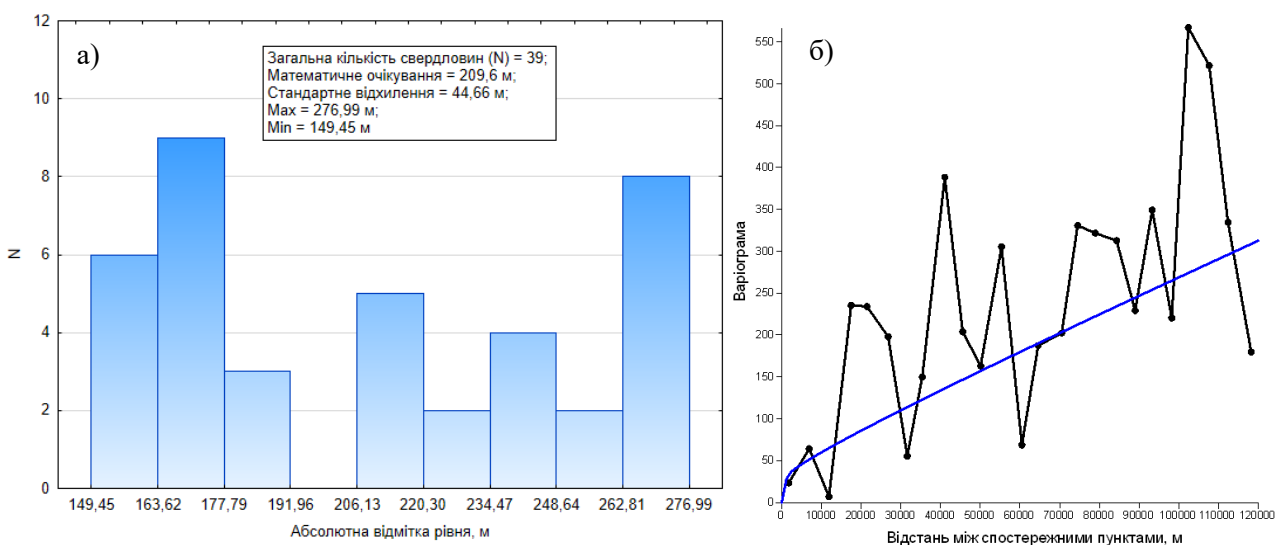


Рис. 8. Графічна візуалізація статистичного (гістограма) (а) і геостатистичного (варіограма) (б) аналізу рівнів підземних вод досліджуваної території

Результати кросвалідації для різних типів варіограмних моделей

Статистичні характеристики отриманих нев'язок	Тип варіограми			
	Лінійна	Гаусівська	Експоненційна	Сферична
Сума нев'язок, м	-31.957	-3.188	-18.196	-5.865
Мінімальне значення, м	-34.676	-33.585	-34.781	-32.623
Максимальне значення, м	29.254	27.123	30.211	28.866
Середнє значення, м	-0.913	-0.091	-0.52	-0.168
Стандартне відхилення, м	12.419	13.339	13.783	13.276
Фактичне значення критерію Колмогорова-Смірнова	0.128	0.18	0.13	0.161
Критичне значення критерію Колмогорова-Смірнова для рівня значимості 95%	0.224			

(рис. 8б), теоретична функція якої:

$$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \right], & h < a \\ \gamma(h) = C_0 + C, & h > a \end{cases}$$

де h – відстань між двома точками, C_0 – нагет-ефект, $C_0 + C$ – поріг варіограми, a – дійсний радіус кореляції (відстань, на якій існує залежність даних).

Проте отримані результати кросвалідації (зокрема, екстремальні нев'язки) свідчать також про наявність суттєвих відхилень інтерпольованих (прогнозних) значень від отриманих результатів замірів для окремих спостережних свердловин для всіх без винятку геостатистичних моделей просторової мінливості досліджуваної змінної. Очевидно, що для цифрових моделей рівнів підземних вод, побудованих на основі

експериментальних варіограм для досліджуваної території, є характерним високий ступінь невизначеності, обумовлений просторовою мінливістю гідрогеологічних умов і недосконалістю мережі моніторингу.

Для вирішення завдань оптимізації мережі моніторингу беззаперечною перевагою крігінгу є можливість обчислення і візуалізації просторового розподілу середньоквадратичної похибки інтерполяції. Значення похибки рівне нулю в точках спостережень (оскільки, як вже зазначалося, крігінг є точним методом інтерполяції) і зростає зі збільшенням невизначеності або зі зменшенням щільності мережі моніторингу. Результати просторового моделювання похибки інтерполяції рівнів підземних вод у межах території української частини басейну ріки Прип'ять наведено на рисунку 9.

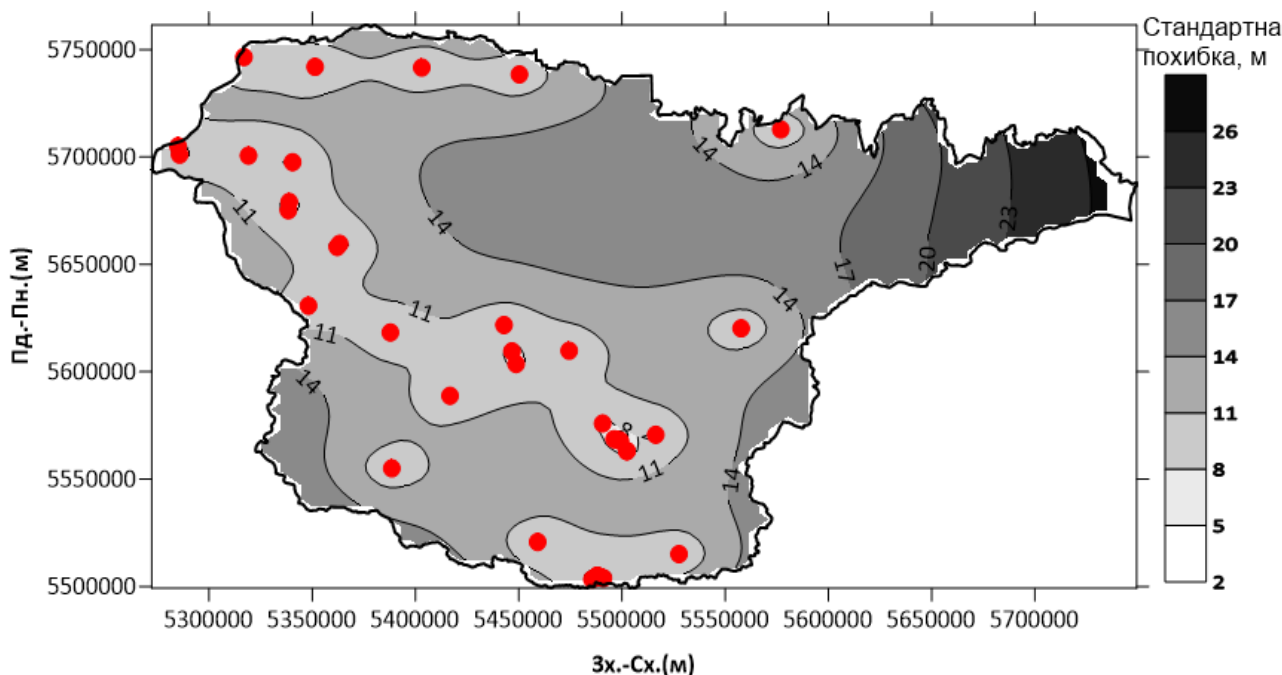


Рис. 9. Схема просторового розподілу похибки інтерполяції методом крігінгу для діючої мережі гідрогеологічного моніторингу

Отримана схема підтверджує недостатню щільність мережі. Абсолютна величина похибки інтерполяції (>14 м), яка перевищує стандартне відхилення результатів кросвалідації спостережень (див. табл. 1), для північно-східної частини території зумовлена відсутністю пунктів моніторингу. Необхідність облаштування спостережних гідрогеологічних свердловин у межах даної частини регіону (правобережжя Случі, північна частина басейну Стирі, басейни Уборті, Словечни, Ужа) є очевидною. Аналіз взаємного розташування постів моніторингу і контурів просторового розподілу величини похибки свідчить, що в середньому похибка інтерполяції перевищує критичне значення ± 14 м на відстані ≈ 28 км від найближчої спостережної свердловини.

Отже, для проектування розміщення свердловин побудовано сітку з кроком (28×28) км, яка покриває досліджувану територію, і координати вузлів якої служать для визначення орієнтовних координат додаткових пунктів моніторингу.

Також при проектуванні мережі гідрогеологічного моніторингу слід враховувати не тільки результати геостатистичного аналізу, але й особливості умов формування режиму підземних вод (у першу чергу – рельєф і розташування поверхневих водотоків), кількість, конфігурацію та розташування гідрогеологічних суббасейнів (округів), виділених за гідрогеодинамічним принципом (див. рис. 2) [5, 17, 21]. Необхідно розташу-

вати пости таким чином, щоб вони були репрезентативними для прирічного, терасового та вододільного типів гідрогеологічного режиму [3, 17], особливу увагу при цьому необхідно приділити транскордонній зоні [9, 18]. При наявності в межах басейну кількох водоносних горизонтів свердловини проектують у вигляді груп («кущів») із фільтрами, розташованими на різних ярусах.

На думку авторів, при розташуванні проектного пункту поблизу локалізації колишньої діючої, але ліквідованої свердловини, доцільним є узгодження проектних координат із координатами колишньої свердловини. У такому випадку можливе відновлення безперервних рядів спостережень за гідрогеологічними параметрами [5, 8].

Керуючись отриманими результатами аналізу і вищенаведеними принципами оптимізації, авторами запропоновано проект оптимізованої державної мережі гідрогеологічного моніторингу для української частини басейну річки Прип'яті (рис. 10). Додатково заплановано створити 60 пунктів гідрогеологічного моніторингу. З урахуванням запроєктованих свердловин щільність спостережної мережі становитиме приблизно 1 пункт на 690 км². Такий показник – практично аналогічний щільності мережі моніторингу підземних вод басейну річки Прип'яті на території Білорусі.

Для проектованої мережі розрахована серед-

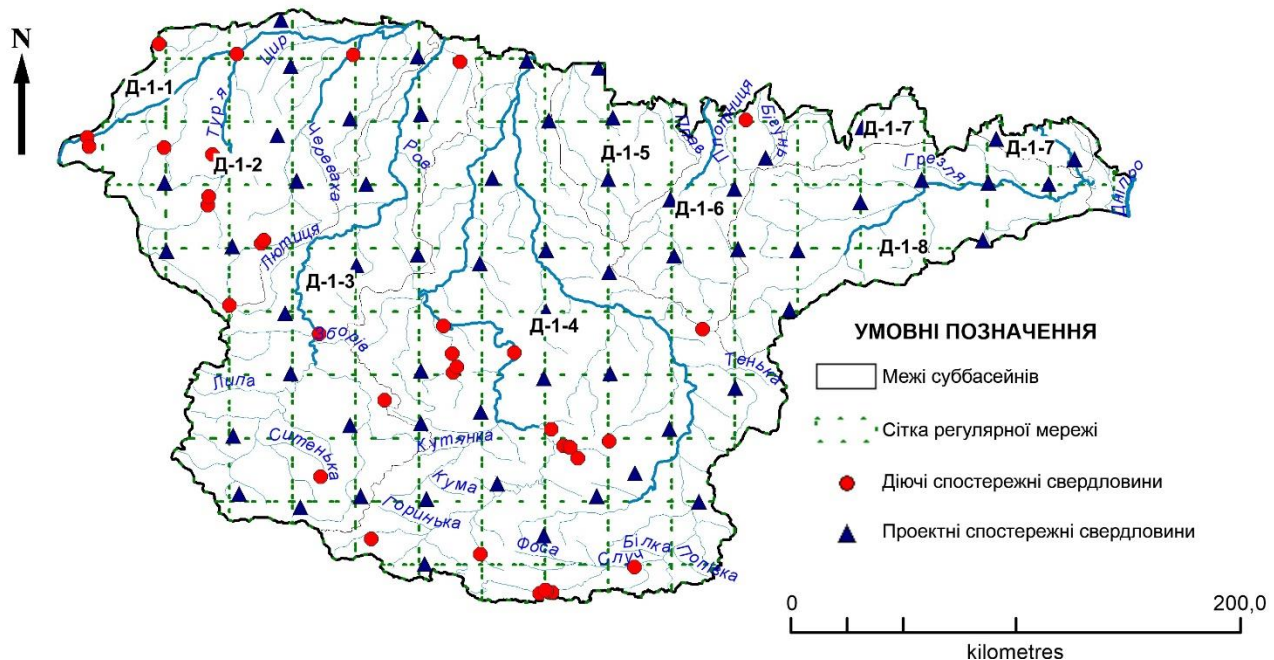


Рис. 10. Проект мережі свердловин гідрогеологічного моніторингу

ня відстань між найближчими сусідніми пунктами – $D=20,18$ км, а значення R -статистики становить 1,54, що дозволяє ідентифікувати запропоновану схему розміщення точок спостережень як регулярну.

Завершальний етап проектування мережі потребує узгодження проектних координат постів із реальною ситуацією на місцевості, подальшої корекції і повторної геостатистичної оцінки точності моделювання поверхні підземних

вод після певного періоду (оптимально 1-2 роки) ведення спостережень за мінливістю рівнів по всіх пунктах моніторингу.

Висновки. Система державного моніторингу підземних вод України перебуває у незадовільному стані, що зумовлює втрату даних безперервних багаторічних режимних спостережень за якісними і кількісними гідрогеологічними характеристиками, знижує достовірність оцінок і прогнозів стану підземних вод, розвитку несприятливих процесів і, відповідно, робить неможливим попередження негативних змін геологічного середовища. Водообмінний басейн ріки Прип'ять належить до найменш охоплених діючими постами гідрогеологічного моніторингу територій України, і, враховуючи гідроекологічну вразливість і транскордонний статус, потребує першочергових заходів для розвитку спостережної мережі.

Організація і ведення гідрогеологічного моніторингу потребує значних фінансових вкладень, тому проектування ефективної спостережної мережі, яка була б достатньою для відображення закономірностей мінливості елементів режиму підземних вод і побудови їх цифрових моделей засобами сучасних геоінформаційних технологій, є важливим і першочерговим завданням.

Аналіз світового досвіду проектування і оптимізації спостережних гідрогеологічних мереж дозволяє виділити геостатистичний метод крігін-

гу як необхідний і загальноприйнятий інструмент оцінки і вдосконалення схеми розташування пунктів у межах досліджуваних територій. Проте особливості гідрогеологічних умов і конфігурація існуючих мереж моніторингу для кожної окремо взятої території обумовлюють необхідність додаткових досліджень.

Результати геоінформаційного і геостатистичного аналізу показали необхідність збільшити кількість діючих спостережних свердловин у 2,5 рази (до 101 пункту моніторингу). Розташування свердловин проектної мережі враховує районування території за гідродинамічним принципом і відповідає регулярній схемі розподілу точок спостережень. Такий підхід до розміщення пунктів моніторингу дасть змогу не тільки охопити спостереженнями ділянки із різними умовами формування гідрогеологічного режиму й отримувати більш повну інформацію, але й забезпечить рівномірність і незалежність випробувань і дозволить обґрунтовано застосовувати статистичні моделі випадкових величин для дослідження просторово-часової мінливості елементів режиму підземних вод.

Щільність запропонованої мережі є обґрунтовано мінімальною для забезпечення необхідною інформацією для вирішення задач гідрогеологічного моделювання і прогнозування національного і регіонального рівнів досліджень.

Література

1. Геостатистика: теория и практика / В. В. Демьянов, Е. А. Савельева; под ред. Р. В. Арутюняна; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. – М.: Наука, 2010. – 327 с.
2. Геостатистичний аналіз і оптимізація мережі гідрогеологічного моніторингу в межах української частини басейну річки Прип'ять / Л. І. Давибіда, М. М. Тимків // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених «GeoTerrace-2018». – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 57-62 с.
3. Ковалевский В. С. Исследования режима подземных вод в связи с их эксплуатацией. – М.: Недра, 1986. – 198 с.
4. Кошляков О. Є. Проблеми виділення підземних водних масивів у межах транскордонних територій України з урахуванням вимог водного законодавства ЄС / О. Є. Кошляков, О. В. Диняк, І. Є. Кошлякова // Вісн. Київ. ун-ту. Геологія. – 2014. – № 4 (79). – С. 67-70.
5. Рубан С.А. Гідрогеологічні оцінки та прогнози режиму підземних вод України. Монографія / С.А. Рубан, М.А. Шинкаревський. – К.: УкрДГРІ, 2005. – 572 с.
6. Стан підземних вод України, щорічник – Київ: Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України», 2018. – 121 с.
7. Тимків М. М. Аналіз стану державної мережі гідрогеологічного моніторингу території України і можливостей його оптимізації на основі геоінформаційного підходу / М. М. Тимків, Л. І. Давибіда, Е. Д. Кузьменко // Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «GeoTerrace-2016» 15–17 грудня 2016 р. / відп. ред. К. Р. Третяк. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. – С. 157-160.
8. Тимків М. М. Аналіз стану мережі моніторингу підземних вод території басейну річки Прип'ять (у межах України) / М. М. Тимків, Д. В. Касіячук, Л. І. Давибіда // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова галузь: Перспективи нарощування ресурсної бази», 23-25 травня 2018 р. – Івано-Франківськ, 2018. – С. 310-313.
9. Шестопалов В.М. Стан і шляхи реформування державної системи моніторингу підземних вод з урахуванням міжнародного досвіду та вимог водної рамкової директиви Європейського Союзу / В. М. Шестопалов, Н. Г. Люта // Мінеральні ресурси України. – 2016. – № 2. – С. 3-4.
10. Baalousha H. Assessment of a groundwater quality monitoring network using vulnerability mapping and geostatistics: a case study from Heretaunga Plains, New Zealand / H. Baalousha // Agric Water Manag. – 2010. – № 97. – P. 240-246.
11. Ben-Jema F. Multivariate geostatistical design of groundwater monitoring networks / F. Ben-Jema, M. A. Marino,

- H. A. Loaiciga // *Journal of water resources planning and management-ASCE*. – 1994. – № 120. – P. 505-522.
12. Berezko O. Groundwater monitoring in Belarus: implication and future prospects / O. Berezko, O. Vasneva // *Transboundary Aquifers in the Eastern Borders of the European Union*. – Springer Science+Business Media. Dordrecht. – 2012. – P. 115–120.
 13. Bhat S. Geostatistics-based groundwater-level monitoring network design and its application to the Upper Floridan aquifer, USA / S. Bhat, L.H. Motz, C. Pathak, L. Kuebler // *Environ Monit Assess*. – 2015. – № 187. – P. 1-15.
 14. Chandan K.S. Optimization of groundwater level monitoring network using GIS-based geostatistical method and multi-parameter analysis: a case study in Wainganga Sub-basin, India. Chin / K.S. Chandan, B.K. Yashwant // *Geogra. Sci*. – 2017. – Vol. 27, No. 2. – P. 201-215. <https://doi.org/10.1007/s11769-017-0859-9>
 15. Davis J. *Statistics and Data Analysis in Geology*. – Biometrics, 1988. – 440 p.
 16. Davybida L. I. Assessment of Observation Network and State of Exploration as to Groundwater Dynamics within Ukrainian Hydrogeological Province of Dnieper River / L. I. Davybida, E. D. Kuzmenko // *Geomatics and Environmental Engineering*. – 2018. – 12/2. – P. 19-31.
 17. Davybida L.I. Organization of hydrogeological monitoring within the Ukrainian part of the Tisza River basin / L.I. Davybida // *Proceedings book of International symposium “The Environmental and the industry” SIMI, 2018*. – Bucharest, Romania, 2018. – P. 409-416.
 18. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy [official website]. [on-line:] http://eurlex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5c835afb-2ec6-4577-bdf8756d3d694eeb.0004.02/DOC_1&format=PDF [access: 03.03.2020].
 19. European Freshwater Monitoring Network design European Topic Centre on Inland Waters. Topic report № 10/96 / Edited by S. C. Nixon // *European Environment Agency*. – 1996. – 131 p.
 20. Hudak P. F. A location modeling approach for groundwater monitoring network augmentation / Hudak P. F., Loaiciga H. A. // *Water Resources Research*. – 1992. – № 28. – P. 643-649.
 21. Hydrogeological Conditions and Natural Factors Forming the Regime of Groundwater Levels in the Ivano-Frankivsk Region (Ukraine) / L. Davybida, D. Kasiyanchuk, L. Shtohryn, E. Kuzmenko, M. Tymkiv // *Journal of Ecological Engineering, Issue 19(6)*, 2018. – P. 34-44.
 22. Marinoni O. Improving geological models using a combined ordinary-indicator kriging approach/ O. Marinoni // *Engineering Geology*. – 2003. – № 69. – P. 37-45.
 23. Mishra A. K. Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds / Mishra, A. K., Coulibaly, P. // *Journal of Hydrology*. – 2010. – 380(3-4). –P. 420–437. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.015>
 24. Mogheir Y. Spatial assessment and redesign of a groundwater quality monitoring network using entropy theory, Gaza Strip, Palestine. / Mogheir, Y., Singh, V. P., de Lima, J. L. // *Hydrogeology Journal*. – 2006. – 14(5). – P. 700–712. <http://doi.org/10.1007/s10040-005-0464-3>
 25. Pourkhosravani M. Qualitative analysis of Orzooiyeh plain groundwater resources using GIS techniques/ M. Pourkhosravani // *Environmental Health Engineering and Management*. – 2016. – № 3. – P. 209-215.
 26. Theodossiou N. Evaluation and Optimization of Groundwater Observation Networks Using the Kriging Methodology / Theodossiou N., Latinopoulos P. // *Environmental Modelling & Software*. – 2006. – № 22. – P. 991-1000.
 27. Triki I. A geostatistical approach for groundwater head monitoring network optimisation: case of the Sfax superficial aquifer (Tunisia) / I. Triki , M. Zairi, H. Ben Dhia // *Water and Environment Journal*. – 2013. – № 27. – P. 362-372. <http://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2012.00352.x>
 28. Yang F. Design of groundwater level monitoring network with ordinary kriging / F. Yang, S. Cao, X. Liu, K. Yang // *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*. – 2008. – 20(3). – P. 339–346. [http://doi.org/10.1016/S1001-6058\(08\)60066-9](http://doi.org/10.1016/S1001-6058(08)60066-9)
 29. Zhou Y. Upgrading a regional groundwater level monitoring network for Beijing Plain, China/ Y. Zhou, D. Dong, J. Liu, W. Li // *Geoscience Frontiers*. – 2013. – 4(1). – P. 127–138. <http://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.03.008>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу.

UDC 556.38.02

Lidiia Davybida,

PhD (Geology), Associate Professor, Department of Geotechnical Safety and Geoinformatics,
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine,
e-mail: davybida61085@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-9796-7124>;

Mariia Tymkiv,

Assistant, Department of Geotechnical Safety and Geoinformatics,
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
e-mail: maritymkiv@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-5392-116X>

GEOSTATISTICAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF THE STATE HYDROGEOLOGICAL MONITORING NETWORK WITHIN THE PRIPYAT RIVER BASIN (UKRAINE)

Formulation of the problem. The State Hydrogeological Monitoring Network has to provide the necessary information to manage groundwater resources and prevent negative changes in the geological environment. Currently, there is a negative tendency to decrease the number of observation wells, loss of information about the space-time variability of the hydrogeological regime elements in Ukraine. In conditions of limited funding, an important task is to develop an effective strategy for reforming the hydrogeological monitoring system, taking into account international experience and based on modern geoinformation technologies. Particular attention has to be given to transboundary territories. One of them is the Pripyat River basin, which is characterized by the low level of the State Hydrogeological Monitoring Network representativeness, both in comparison with European Union standards and with the existing groundwater monitoring network of neighbouring Belarus.

The purpose of the article is to evaluate the actual state of the hydrogeological observation wells network and optimize it within the territory of the Ukrainian part of the transboundary Pripyat watershed basin.

Methodology and materials. The State Scientific and Production Enterprise "Geoinform of Ukraine" database of State Groundwater Monitoring System composition and functioning as well as zoning map under the conditions of water exchange formation in the upper water-bearing level were used for the study. For the studied territory of the water exchange basin of Pripyat, the analysis of density and uniformity of the observation points distribution as well as the variogram analysis of the spatial distribution of groundwater-level altitudes within the study area were carried. For the actual monitoring network, the expected error of the spatial modelling of the groundwater-surface was evaluated.

Results. The obtained results of the geostatistical analysis made it possible to substantiate the project wells locations within the water exchange sub-basins to improve the quality of hydrogeological monitoring problem solutions.

Scientific novelty. The method of the hydrogeological monitoring network optimization has been improved based on geoinformation and geostatistical approaches and implemented for the Ukrainian part of the Pripyat River basin, taking into account the hydrogeological conditions of the territory and the configuration of the existing network.

Practical significance. Optimization and increment of the observation wells network, taking into account the obtained results, will provide the effective functioning of the hydrogeological monitoring system within the Ukrainian part of the Pripyat River basin and will have an economic effect, given that the cost of any measures to improve the groundwater quality and quantity is far more expensive than the monitoring system optimization.

Keywords: observation wells, nearest-neighbour method, groundwater levels, kriging, mean squared error.

References

1. Demyanov V.V., Savelyeva E.A. & Harutyunyan R.V., (2010). *Geostatistics: theory and practice*. M: Institute for the Safe Development of Nuclear Energy RAS, 327 [in Russian].
2. Davybida, L., & Tymkiv, M. (2018). *Geostatistical analysis and optimization of the hydrogeological monitoring network within the Ukrainian part of the Pripyat river basin*. *International Conference of Young Scientists Geoterrace-2018*, 57–62 [in Ukrainian].
3. Kovalevsky, V.S. (1986). *Groundwater regime studies in connection with the operation*. M: Nedra, 198 [in Russian].
4. Koshliakov, O., Dyniak, O., & Koshliakova, I. (2014). *Problems of determination of groundwater body at cross-border regions of Ukraine according to EU water legislation*. *Bulletin of the University of Kiev. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 4 (79), 67–70 [in Ukrainian].

5. Ruban, S.A., & Shynkarevs'kyi, M.A. (2005). *Hydrogeological assessments and forecasts of groundwater regime in Ukraine*. K.: UkrDGRI, 572 [in Ukrainian].
6. *Groundwater Status of Ukraine (2018)*. State Service of Geology and Subsoil of Ukraine. State Scientific and Production Enterprise "State Information Geological Fund of Ukraine" URL: http://geoinf.kiev.ua/wp/wp-content/uploads/2019/07/schorichnyk_stan_py_2018_1.pdf [in Ukrainian].
7. Davybidia, L., Tymkiv, M., & Kuzmenko E. (2018). Analysis of the state of hydrogeological monitoring network within the territory of Ukraine and the possibilities of its optimization on the basis of the geoinformation approach. *International Conference of Young Scientists Geoterrace-2016*, 157–160 [in Ukrainian].
8. Tymkiv M., Kasiyanchuk D., & Davybidia L., (2018). Analysis of the Groundwater Monitoring Network of the Pripjat River Basin (within Ukraine). *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Oil and Gas Industry: Prospects for Increasing the Resource Base"*, 310–313 [in Ukrainian].
9. Shestopalov, V.M., & Lyuta, N.G. (2016). Status and ways of reforming of the state groundwater monitoring system taking into account international experience and requirements of the EU water framework directive. *Mineral Resources of Ukraine*, 2, 3–4 [in Ukrainian].
10. Baalousha, H. (2010). Assessment of a groundwater quality monitoring network using vulnerability mapping and geostatistics: a case study from Heretaunga Plains. *Agric Water Manag*, 97, 240–246.
11. Ben-Jema, F., Marino, M. A., & Loaiciga, H. A. (1994). Multivariate geostatistical design of groundwater monitoring networks. *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*, 120, 502–522.
12. Berezko, O., & Vasneva, O. (2012). Groundwater monitoring in Belarus: implication and future prospects. *Transboundary Aquifers in the Eastern Borders of the European Union*, 115–119. Retrieved from https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-3949-9_10
13. Bhat, S., Motz, L.H., Pathak, C., & Kuebler, L. (2015). Geostatistics-based groundwater-level monitoring network design and its application to the Upper Floridan aquifer. *Environ Monit Assess*, 187, 1–15.
14. Chandan, K.S., & Yashwant, B.K. (2017). Optimization of groundwater level monitoring network using GIS-based geostatistical method and multi-parameter analysis: a case study in Wainganga Sub-basin. *Chin Geogr Sci*, 27, 201–215. doi: <https://doi.org/10.1007/s11769-017-0859-9>
15. Davis, J. (1988). *Statistics and Data Analysis in Geology*. Biometrics.
16. Davybidia, L.I., & Kuzmenko, E.D. (2018). Assessment of Observation Network and State of Exploration as to Groundwater Dynamics within Ukrainian Hydrogeological Province of Dnieper River. *Geomatics and Environmental Engineering*, 12/2, 19–31.
17. Davybidia, L.I. (2018). Organization of hydrogeological monitoring within the Ukrainian part of the Tisza River basin. *Proceedings Book of International Symposium "The Environmental and the Industry" SIMI*, 409–416.
18. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy [official website]. [on-line:] http://eurlex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5c835afb-2ec6-4577-bdf8756d3d694eeb.0004.02/DOC_1&format=PDF [access: 03.03.2020].
19. Nixon, S.C. (1996). *European Freshwater Monitoring Network design* European Topic Centre on Inland Waters. European Environment Agency, 10/96, 131.
20. Hudak, P.F., & Loaiciga, H.A. (1992). A location modeling approach for groundwater monitoring network augmentation. *Water Resources Research*, 28, 643–649.
21. Davybidia, L., Kasiyanchuk, D., Shtohryn, L., Kuzmenko, E., & Tymkiv, M. (2018). Hydrogeological Conditions and Natural Factors Forming the Regime of Groundwater Levels in the Ivano-Frankivsk Region (Ukraine). *Journal of Ecological Engineering*, 19(6), 34–44.
22. Marinoni, O. (2003). Improving geological models using a combined ordinary-indicator kriging approach. *Engineering Geology*, 69, 37–45.
23. Mishra, A.K., & Coulibaly, P. (2010). Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. *Journal of Hydrology*, 380(3-4), 420–437. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.015>.
24. Mogheir, Y., Singh, V.P., & de Lima, J.L. (2006). Spatial assessment and redesign of a groundwater quality monitoring network using entropy theory, Gaza Strip, Palestine. *Hydrogeology Journal*, 14(5), 700–712. doi: <http://doi.org/10.1007/s10040-005-0464-3>.
25. Pourkhosravani, M. (2016). Qualitative analysis of Orzooiyeh plain groundwater resources using GIS techniques. *Environmental Health Engineering and Management*, 3, 209–215.
26. Theodossiou, N., & Latinopoulos, P. (2006). Theodossiou N. Evaluation and Optimization of Groundwater Observation Networks Using the Kriging Methodology. *Environmental Modelling & Software*, 22, 991–1000.
27. Triki, I., Zairi, M., & Ben Dhia, H. (2013). A geostatistical approach for groundwater head monitoring network optimisation: case of the Sfax superficial aquifer (Tunisia). *Water and Environment Journal*, 27, 362–372. doi: <http://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2012.00352.x>
28. Yang, F., Cao, S., Liu, X., & Yang, K. (2008). Design of groundwater level monitoring network with ordinary kriging. *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B, 20(3), 339–346. doi: [http://doi.org/10.1016/S1001-6058\(08\)60066-9](http://doi.org/10.1016/S1001-6058(08)60066-9)
29. Zhou, Y., Dong, D., Liu, J., & Li, W. (2013). Upgrading a regional groundwater level monitoring network for Beijing Plain, China. *Geoscience Frontiers*, 4(1), 127–138. doi: <http://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.03.008>