

ГЕОЛОГІЯ

<https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-01>
УДК 004.94:556.314

Надійшла 5 травня 2021 р.
Прийнята 17 травня 2021 р.

Багатовимірний системний геомоніторинг підземних вод в районах водозаборів (на прикладі м. Полтава). Частина 1. Ідентифікація системного розвитку гідрогеологічного процесу

Костянтин Аркадійович Немець¹,

д. геогр. н., професор, кафедра гідрогеології,
¹Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
пл. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна,

e-mail: konnem1948@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7262-2111>;

Ігор Валерійович Удалов¹,

д. геол. н., професор, завідувач кафедри гідрогеології,
e-mail: igorudalov8@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3844-6481>;

Анатолій Йонович Лур'є¹,

д. геол.-мін. н., професор, кафедра гідрогеології,
e-mail: anlure16@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4836-5781>;

Вікторія Миколаївна Прибилова¹,

к. геол. н., доцент, кафедра гідрогеології,
e-mail: pribylovavn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7770-8934>;

Олексій Миколайович Крайнюков¹,

д. геогр. н., професор, кафедра екологічної безпеки та екологічної освіти,
e-mail: alkraynukov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5264-3118>

Робота є початком серії наукових праць авторів по актуальній екологічній темі – багатовимірному системному геомоніторингу підземних вод в районах водозаборів. Авторами обґрунтована можливість застосування для геомоніторингу гідрогеологічних об'єктів методу моделювання траєкторії руху об'єктів у нормованому фазовому просторі, розробленого у Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна для задач суспільно-географічного моніторингу. Досліджені гідрогеохімічні режими експлуатації п'яти потужних водозаборів Полтавської міської агломерації, що експлуатують сеноман-нижньокрейдовий водоносний комплекс, за 28-ми річний період часу. Кількісно розраховані по кожному водозабору наступні показники системного розвитку гідрогеологічної системи: довжина шляху, пройденого гідрогеологічною системою водозабору на кожний період часу; проекція поточної точки траєкторії на оптимальну траєкторію, відхилення точки від оптимальної траєкторії та коефіцієнт прогресу на кожний контрольний момент часу. На базі отриманих результатів моделювання встановлені основні тенденції системного розвитку гідрогеологічної системи для всіх досліджуваних водозаборів: зменшення інтенсивності зміни хімічного складу підземних вод на усіх водозаборах з часом; суттєво менші показники інтенсивності зміни хімічного складу підземних вод на водозаборі № 3; найбільша мінливість інтенсивності зміни хімічного складу у часі – на водозаборі № 1; досить помітна синхронізація інтенсивності руху гідрогеологічної системи водозаборів і середньої інтенсивності зміни хімічного складу підземних вод, але виявляються деякі відхилення від цієї закономірності, які можуть бути зумовлені різкими змінами режиму роботи водозаборів.

Ключові слова: геомоніторинг, гідрогеологічна система, моделювання, підземні води, водозабір, хімічний склад.

Як цитувати: Немець К. А. Багатовимірний системний геомоніторинг підземних вод в районах водозаборів (на прикладі м. Полтава). Частина 1. Ідентифікація системного розвитку гідрогеологічного процесу / К. А. Немець, І. В. Удалов, А. Й. Лур'є, В. М. Прибилова, О. М. Крайнюков // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2021. – Вип. 55. – С. 10-22. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-01>

In cites: Niemets K. A., Udalov I. V., Lurye A. I., Pribilova V. M., Krainiukov O. M. (2021). Multidimensional system geomonitoring of groundwater in water in-takes areas (on the example of Poltava city). Part 1. Identification of system development of hydrogeological process. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (55), 10-22. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-01>

Актуальність дослідження. Зростання негативного впливу людини на природне середовище вимагає розробки нових, більш ефективних методів управління техногенними процесами з метою їх узгодженості з природними процесами.

Однією з найважливіших ланок управління є моніторинг – система ідентифікації стану мульти-системи природокористування та інформаційно-го забезпечення прийняття управлінських рішень. Традиційно моніторинг полягає у дослі-

дженні динаміки певної кількості параметрів керованого або природного процесу, на основі чого робиться висновок стосовно: а) ефективності управління; б) змін стану об'єкту управління; в) впливу на природне середовище. У практиці водопостачання із підземних джерел об'єктом управління є природна гідрогеологічна система (ГГС) і відповідний гідрогеологічний процес (ГПП), а техногенною системою (елементом управління) – водозабір. Як правило, аналізуються параметри гідрохімічного і гідродинамічного режиму ГГС і ГПП, а також деякі технологічні параметри експлуатації водозаборів.

З позицій системного підходу необхідно розглядати внутрішню та зовнішню адаптацію ГГС. В залежності від пріоритетності мети геомоніторингу, слід розглядати дві ситуації:

- ситуація А складається під впливом, умовно говорячи, внутрішнього посилу – за ініціативою та в межах компетенції замовника й експлуатуючої організації. Ця ситуація актуальна з часів появи перших водозабірних споруд на підземні води. Спочатку спостереження скрізь велися інтуїтивно, потім за місцевими стандартами, а сьогодні регламентуються відомчими та законодавчими документами. Головною метою є оцінка ефективності управління та оптимізація режиму роботи водозабору. Тоді сам водозабір (площа розміщення експлуатаційних свердловин) буде досліджуваною системою, а ГГС в зоні активного впливу водозабору – зовнішнім середовищем. У цьому випадку увага концентрується на внутрішній адаптації системи – взаємодії свердловин, оптимізації структури (розташування) і режиму роботи, технічному стані тощо. ГГС в ракурсі зовнішньої адаптації розглядається як динамічне середовище формування експлуатаційних запасів, вплив якого залежить від експлуатації водозабору і змін природних умов. Дослідження системного розвитку ГГС має другорядне значення;

- ситуація Б виникає за зовнішнім посилом з ініціативи та в межах компетентності громадських та державних природоохоронних організацій і відомств. Основою, як правило, є національні та регіональні програми захисту навколишнього природного середовища та техногенної безпеки. Пріоритетним є завдання оцінки системного впливу водозабору на природне середовище з метою його мінімізації. У цьому випадку водозабір розглядається як точкове або площинне джерело збурення ГГС (наприклад, за схемою «великого колодязя»), внутрішня адаптація розглядається в активній зоні його впливу як формування ГПП між контуром живлення і площею водозабору, а зовнішнім середовищем є ГГС поза зоною впливу водозабору. Така ситуація складається, коли, наприклад, досліджується робота (з

можливою взаємодією) кількох водозаборів, системний вплив водовідбору на навколишнє середовище або дослідження виконуються в регіональному масштабі. Пріоритетним є дослідження системного розвитку ГГС і ГПП у складі більш загальних природних систем.

У другій половині ХХ ст. сформувалася природоохоронна, а пізніше екологічна парадигми природокористування, що прискорило і якісно змінило державну політику в галузі використання природних ресурсів. З іншого боку в гідрогеологічних дослідженнях зростаючими темпами почали застосовуватись методи математичного моделювання (електричні сітки і цифрові моделі), що зумовило можливість переведення епігнозного та прогнозного моделювання в масштаби більш системних регіональних та оглядових досліджень. Тому сьогодні обидві ситуації є майже пріоритетними і частіше всього доповнюють одна одну.

Узагальнюючи викладене вище, можна стверджувати, що у найбільш загальному сенсі нарощування інформаційного ресурсу суспільства головною задачею геомоніторингу в гідрогеології є спостереження, аналіз та ідентифікація стану й динаміки розвитку ГГС і техногенних систем у їх складі (водозабори, водовідлив, дренаж тощо). При цьому важливо подавати результати аналізу в зручному для дослідження динаміки форматі. Враховуючи це, технологічно всю процедуру гідрогеологічного геомоніторингу умовно можна поділити на низку послідовних задач:

а) отримання моніторингової інформації – безпосередні заміри технологічних параметрів, відбір проб води і виконання хімічних аналізів, збір сторонньої інформації (наприклад, гідрометеорологічної) тощо;

б) перетворення моніторингової інформації в оперативну – фільтрацію, усунення грубих помилок, аналіз різними методами, традиційними для гідрогеології, обґрунтування висновків тощо;

в) згортка інформації, тобто, компактне представлення результатів моніторингу найбільш ефективним чином, зручним, наприклад, для експрес-огляду чи наукового аналізу динаміки розвитку ГГС.

Якщо перші дві задачі вирішуються традиційними для гідрогеології методами, які постійно удосконалюються та оптимізуються, то задача згортки інформації вимагає застосування спеціальних математичних методів. Застосування потужної комп'ютерної техніки і можливостей сучасних інформаційних технологій стимулює продовження пошуків інтегрального відображення результатів моніторингу. Мова йде про адаптацію методів згортки інформації до проце-

дури гідрогеологічного геомоніторингу, коли величезний масив даних за десятками моніторингових параметрів зводиться до кількох інтегральних параметрів. Такі узагальнені параметри, на наш погляд, повинні відповідати таким вимогам:

- мати однозначну семантичну інтерпретацію стосовно динаміки розвитку ГПП і можливості ефективного управління ним;
- об'єктивне відображення стану та динаміки водозабірної системи;
- інваріантність для можливості об'єктивного порівняння стану і динаміки ГГС різних ієрархічних рівнів;
- можливість наочного відображення динаміки ГПП і ГГС на 2D або 3D графіках.

Метою даної статті є обґрунтування можливості застосування для геомоніторингу гідрогеологічних об'єктів методу моделювання траєкторії руху об'єктів у нормованому фазовому просторі (НФП), розробленого у Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна для задач суспільно-географічного моніторингу.

Стан досліджуваної проблеми. Як уже зазначалося вище, методи гідрогеологічного моніторингу особливо інтенсивно почали розроблятися з другої половини ХХ ст.

Покращенням методології вивчення питних підземних вод та розробкою заходів для контролю за змінами якісного складу цих вод, у різний час та різних регіонах світу займалися багато дослідників. Це праці таких видатних науковців, як Є. С. Дзекцер (1993), А. Л. Брикс (1983, 2013), О. А. Улицький (1998), Є. О. Яковлев (1994, 1998), М. С. Огняник (2013), І. В. Удалов (2012, 2015), Е. Preziosi (2014), N. Dalla Libera (2017), A. Molinari (2019) та ін. У цих роботах розроблялася методологія еколого-гідрогеологічних досліджень питних підземних вод під впливом природних чинників та активного техногенезу. Ключові принципи цих робіт є базовими для сучасних розробок даного напрямку.

Далі наводяться результати деяких досліджень, які для авторів представляли великий науковий інтерес.

Одним із основоположників сучасної методології еколого-геологічних досліджень в Україні є Яковлев Є. О. У роботах [1, 6-8] науковцем у тому числі рекомендовано за границі територій для моніторингових досліджень приймати зону збереження початкового стану ГС. Ним запропоновано дані межі визначати на базі двох рівнів впливу на ГС – гідрогеофільтраційному і гідрогеохімічному (гідрогеоміграційному).

М. С. Огняник у працях [3, 4] займався у тому числі розробкою методології еколого-гідрогеологічних досліджень питних підземних вод під впливом природних чинників та активно-

го техногенезу. Особливу увагу приділено територіям, у межах яких ґрунтовий шар та підземні води забруднені легкими нафтопродуктами.

Кононенко А. В., Лур'є А. І. та Удалов І. В. у роботі [13] розробили критерії оцінки рівнів забруднення підземних вод крейдових водозаборів Східної України при проведенні гідрогеохімічного моніторингу на даній території. Це зроблено на базі визначених авторами пріоритетних показників якісного складу цих вод.

У роботах Удалова І. В., Решетова І. К. та ін. [5, 10] на прикладі Східного Донбасу розглянуто використання інтегрального підходу в еколого-геологічних дослідженнях ГС (у т. ч. підземних вод). При оцінці рівня забруднення компонентів ГС ними рекомендовано замість недосконалих та застарілих діючих нормативів та стандартів використовувати показники геологічного фоновому вмісту для даної території. Ці показники необхідно визначати із релевантних значень у межах площ із мінімальним техногенним впливом та які віддалені від осередків забруднення.

Сучасні роботи зарубіжних дослідників з питань гідрогеологічного моніторингу вирізняються широтою охоплення.

Проблеми проведення гідрогеологічного моніторингу та, на базі цього, оптимізації режимів експлуатації водозаборів на фоні погіршення якості підземних вод на них є нагальними для різних територій світу. А особливо у великих та екологічно нестабільних містах: S. Nurani Zulkipli, H. Abdul Rahim у Куала-Лумпур (Малайзія) [15], Y. Weiwu та ін. у Шанхаї (Китай) [18], Y. Chen, J. Hall та ін. у містах США [11, 17] та деякі ін.

Науковці Weiwu Yan, M. Abtahi та деякі ін. [9, 18 та ін.] займалися удосконаленням методології оцінки якості підземних вод при моніторингових роботах для стандартизації цих робіт та розробки заходів для покращення екологічної безпеки питного водопостачання. В основі – відбір лише важливих компонентів якості вод для даних територій та встановлення для них доцільних вагових коефіцієнтів.

Праці N. Dalla Libera, P. Fabbri та ін. [12], A. Molinari й ін. [14], E. Preziosi й ін. [16] були направлені на розробку методичного підходу до визначення максимально точних значень геологічного фону території при проведенні геомоніторингу. У роботах акцентується увага саме на значенні геофоновому вмісту компонентів під час розрахунків змін гідрогеохімічних особливостей підземних вод. Вважається, що при визначенні стану якісного складу вод доречніше порівнювати поточний вміст компоненту саме із локальним геофоном замість різних діючих нормативів.

В центрі уваги гідрогеологів щодо гідрогеологічного геомоніторингу весь час знаходяться

технології просторово-часової оптимізації систем геомоніторингу, збору, зберігання і обробки результатів геомоніторингу, виходячи з існуючої методології дослідження підземної гідросфери. Відносно мало уваги приділяється подальшому розвитку можливостей математичного моделювання для отримання інтегральних параметрів геомоніторингу. Побудова постійнодіючих моделей водозаборів з можливістю самоадаптації є втіленням найбільш ефективного підходу для більш-менш точного відображення суті ГПП. Але такі моделі при всій їхній корисності і важливості в управлінні водозаборами є тільки засобами отримання локальних параметрів і прогнозування роботи водозаборів, тобто, добре вирішують першу задачу геомоніторингу – отримання масиву моніторингових параметрів. Для вирішення задачі згортки інформації необхідні інші підходи, більш абстрактні і формалізовані.

Методи дослідження. В основу дослідження покладено метод моделювання траєкторії руху об'єктів у НФП, розроблений протягом останніх десяти років для обробки результатів суспільно-географічного моніторингу і найбільш повно описаний у роботі К. Немця і Л. Немець [2]. Нормований фазовий простір утворюється множиною координат – параметрів стану досліджуваного об'єкта. Внаслідок того, що параметри можуть бути різними за розмірністю, фізичною природою тощо, ізометричність НФП забезпечується нормуванням кожної з його координат на розмах значень $P_{max} - P_{min}$. Це означає, що довжина кожного ребра гіперкуба НФП становить одну умовну одиницю, що дає можливість ввести єдину метрику для кількісного аналізу. Таким чином на момент часу t об'єкту у НФП відповідає точка $A^t(P_1^t, P_2^t, \dots, P_n^t)$, де $P_1^t, P_2^t, \dots, P_n^t$ – координати простору, n – вимірність простору (кількість координат). На момент часу $t+\Delta t$ внаслідок зміни стану об'єкту координати точки зміняться на $A^{t+\Delta t}(P_1^{t+\Delta t}, P_2^{t+\Delta t}, \dots, P_n^{t+\Delta t})$. Порівнюючи ці два стани, тобто, аналізуючи вектор, утворений початковою і кінцевою точкою руху об'єкту, можна визначити лінійні і кутові параметри руху за інтервал часу Δt (за аналогією з рухом матеріальної точки у тривимірному фізичному просторі). Загальна траєкторія руху об'єкту утворюється множиною точок на послідовні моменти часу t_1, t_2, \dots, t_m , де m – кількість моментів часу спостереження об'єкту, а точність її побудови залежить від величини кроку дискретизації часу спостереження об'єкту Δt .

Траєкторію руху об'єкта у багатовимірному НФП у загальному випадку не можна уявити або відобразити графічно, що унеможливило її аналіз традиційними для геології методами. Для кількісного аналізу співвідношення сукупності

точок траєкторії у віртуальному просторі з установленною метрикою доцільно застосувати математичний апарат аналітичної геометрії і лінійної алгебри. Виходячи з того, що траєкторію можна представити як послідовність взаємопов'язаних векторів, для кожного з них можна розрахувати лінійні і кутові характеристики, необхідні для опису зміни стану об'єкта. Так, інтенсивність зміни стану можна визначити як швидкість руху об'єкта в ознаковому просторі V_o , як відношення довжини вектора L до періоду часу Δt . Але цей перший узагальнений параметр є недостатнім для розуміння та якісної інтерпретації системної динаміки стану об'єкта (погіршення чи покращення хімічного складу підземних вод, гідродинамічних показників водоносного горизонту, виснаження чи поповнення запасів тощо). Для цього необхідний інший узагальнений параметр, який дозволив би однозначно оцінювати напрям системного розвитку об'єкта (деградація чи еволюція). Такий параметр можна визначити, виходячи з наступних міркувань (що є головною ідеєю методу моделювання траєкторії).

Гіперкуб НФП є простором області руху об'єкта за період $t_0 - t_m$, і у такому сенсі має дві особливі точки: точка початку координат, де $P_1 = P_2 = \dots = P_n = 0$, і точка максимального розвитку об'єкта, де $P_1 = P_2 = \dots = P_n = 1$, які з'єднуються головною діагоналлю гіперкубу. Вона є найкоротшою відстанню від початкової до кінцевої точки процесу руху об'єкта. Водночас її можна розглядати як найшвидшу траєкторією розвитку об'єкта в сенсі системного розвитку. Тому проекція поточної точки траєкторії об'єкта L_d на головну діагональ, яку легко знайти, знаючи кутові і лінійні характеристики вектору руху, характеризує просунутість (прогрес/регрес) об'єкту у розвитку і є другим узагальненим параметром стану об'єкта. Порівняння суміжних точок траєкторії за цим параметром дає однозначну оцінку напрямку розвитку об'єкта за певний період Δt – еволюцію, коли об'єкт рухається у бік максимальних значень координат, або деградацію при русі у протилежному напрямі. Крім цього, легко знаходиться відстань поточної точки об'єкту від головної діагоналі ΔL , яка є третім узагальненим параметром і кількісно оцінює відхилення реальної траєкторії об'єкту від теоретичної (оптимальної), що може бути оцінкою оптимальності процесу. Таким чином, аналіз траєкторії руху гідрогеологічного об'єкту дозволяє компактно представити її на кожний період часу Δt трьома узагальненими параметрами: V_o – інтенсивність зміни стану; L_d – параметр напрямку і просунутості системного розвитку; ΔL – величина відхилення від оптимальної траєкторії.

З викладеного вище видно, що важливою

умовою аналізу багатовимірної моніторингової інформації є встановлення просторових і часових границь досліджуваного процесу зміни стану об'єкта. У загальному випадку нормування координат багатовимірного фазового простору може виконуватися різним чином – на максимальне, середнє значення, середньоквадратичне відхилення та інші константи. Як показує досвід, найбільш ефективним є нормування на розмах значень $P_{max} - P_{min}$ по кожній координаті. Фазові ознаки процесу можуть бути позитивними (сприяють еволюції об'єкту) чи негативними (сприяють деградації об'єкту), для них нормування відбувається за різними формулами. На відміну від переважної більшості природних і соціальних процесів без зміни якості фазових координат, геомоніторинг гідрогеологічних процесів і об'єктів має одну важливу особливість, а саме – наявність ГДК для багатьох компонентів хімічного складу підземних вод. Вважається, що до досягнення ГДК концентрація певної хімічної сполуки чи хімічного елементу є позитивним чинником для розвитку процесу, а при перевищенні ГДК – перетворюється на негативний чинник. Стосовно моніторингу такого динамічного середовища як підземна гідросфера слід

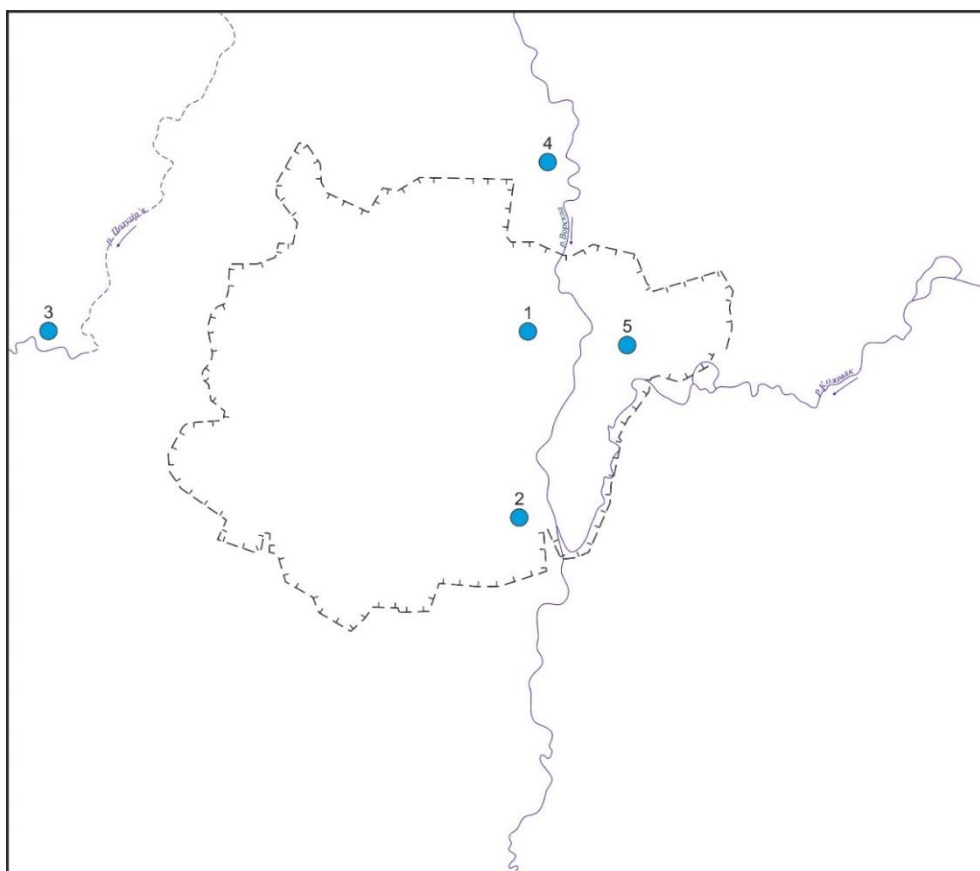
вказати, що у процесі відбору підземних вод їхня якість часто змінюється саме таким чином і фазові координати можуть якісно змінюватись з відповідним коригуванням нормованих значень. У зв'язку з цим максимальні значення лімітованих ознак (фаз) встановлюються за відповідною ГДК або максимальним перевищенням її.

Результати дослідження. Для досягнення мети даного дослідження були використані дані геомоніторингу п'яти водозаборів м. Полтава, які експлуатують сеноман-нижньокрейдовий водоносний комплекс. Аналізувалися зміни середнього хімічного складу підземних вод по кожному водозабору за 12 показниками: рН, жорсткість, сухий залишок, амоній, фтор, хлор, сульфати, гідрокарбонати, кальцій, магній, натрій + калій, закисне залізо. Вихідні дані збиралися з 1981 по 2008 роки за нерегулярною схемою у часі (всього 39 моментів часу).

Розміщення водозаборів відносно гідрографічних елементів району показано на рис. 1.

Після статистичної обробки вихідних даних було розраховано по кожному водозабору описані вище показники системного розвитку:

а) на кожний період часу (між суміжними контрольними моментами часу) – довжина шляху,



УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ:

3 Водозабір та його номер

Meжі м. Полтава

Рис. 1. Карта-схема розміщення досліджуваних водозаборів.

Fig. 1. Map-scheme of studied water intakes location

пройденого ГГС водозабору, яка характеризує інтенсивність зміни хімічного складу підземних вод (швидкість розраховувати некоректно, бо спостереження нерегулярні у часі);

б) на кожний контрольний момент часу – проекція поточної точки траєкторії на оптимальну траєкторію (головну діагональ), відхилення точки від оптимальної траєкторії, коефіцієнт прогресу (відношення проекції точки до довжини головної діагоналі).

Графіки інтенсивності руху ГГС водозаборів у НФП наведено на рис. 2, для порівняння на рисунку показано також графік середньої для всіх водозаборів інтенсивності руху. З наведених графіків можна зробити наступні висновки:

- інтенсивність зміни хімічного складу підземних вод водозаборів м. Полтава з часом зменшується, що можна пояснити зменшенням водовідбору і гідродинамічними чинниками, пов'язаними з формуванням депресійної лійки, зокрема поширенням зони квазістаціонарного режиму фільтрації;

- за абсолютними значеннями інтенсивності зміни хімічного складу підземних вод виділяється водозабір № 3, показник якого суттєво менше показників інших водозаборів, його графік єдиний із всіх інших знаходиться нижче графіку середньої по всім водозаборам інтенсивності;

- найбільшою мінливістю інтенсивності зміни хімічного складу у часі відрізняються підземні води на водозабір № 1 як за амплітудою, так і за абсолютними значеннями;

- спостерігається досить помітна синхронізація графіків водозаборів і середньої інтенсивності зміни хімічного складу підземних вод, але за детальним аналізом виявляються деякі відхилення від цієї закономірності, які можуть бути зумовлені різкими змінами режиму роботи водозаборів.

На рис. 3 подано графіки динаміки довжини проекції поточної точки траєкторії і похідного від неї параметра – коефіцієнту прогресу, а також її відхилення від оптимальної траєкторії (головної діагоналі гіперкуба НФП). Ці узагальнені параметри є найважливішими для аналізу траєкторії руху ГГС водозаборів у НФП.

Як видно з графіків на рис. 3, головна тенденція зміни ГГС для всіх водозаборів (за винятком водозабору № 2) згідно з лініями тренду полягає у зменшенні проекції шляху ГГС в НФП з часом, що свідчить про сповільнення темпів зміни хімічного складу підземних вод. Це також підтверджується динамікою коефіцієнту прогресу. Щодо відхилень реальних траєкторій руху ГГС від оптимальної траєкторії, то їх синхронізація з довжиною проекцій прослідковується в макромасштабі більш-менш чітко тільки для во-

дозаборів №№ 2, 4, 5. Всі висновки, отримані за результатами аналізу динаміки руху ГГС в НФП (рис. 2), викладені вище, практично підтверджуються графіками на рис. 3.

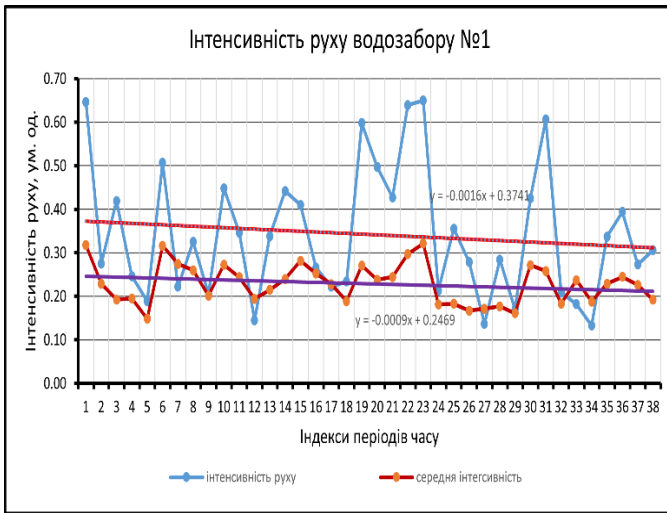
Візуалізація траєкторій руху ГГС водозаборів на фазовій площині «проекція траєкторії на оптимальну траєкторію – відхилення від оптимальної траєкторії» дає можливість наочно бачити зміни ГГС в узагальнених параметрах, як показано на рис. 4. Але при цьому виникли певні труднощі з інтерпретацією графіків. Справа у тому, що в окремі контрольні моменти часу спостерігалися різкі випадкові з точки зору системного розвитку зміни стану ГГС, що можна пояснити дією зовнішніх факторів (наприклад, водністю року, аномальними температурами, особливостями живлення підземних вод тощо) і внутрішніх факторів (зміни режиму роботи водозаборів і т.п.). Тому побудова траєкторії руху ГГС в НФП від точки до точки створює плутанину, в якій закономірності системного розвитку ГГС спотворюються вказаними флуктуаціями. Виявилось більш ефективним групування контрольних точок за моментами часу, що виявило зони їх концентрації у певні моменти розвитку ГГС і дало можливість побудувати узагальнені траєкторії розвитку, показані червоними стрілками на рис. 4. Таким чином, практично для всіх водозаборів вдалося однозначно визначити основні тенденції системного розвитку ГГС.

Як видно із представлених графіків, для водозаборів №№ 1, 4 і 5 переважає системний рух у напрямі зменшення довжини проекції і відхилення від оптимальної траєкторії. Для ГГС водозабору № 2 характерний рух у першій частині досліджуваного періоду із зростанням довжини проекції і величини відхилень від оптимальної траєкторії. У другій половині періоду спостережень траєкторія показує протилежну тенденцію.

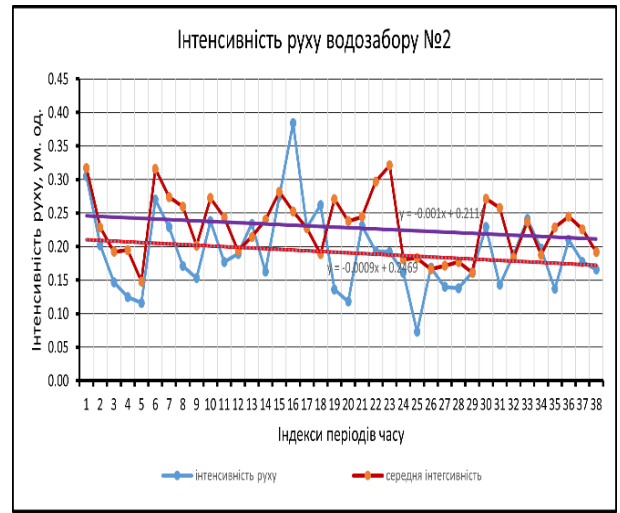
Реальна траєкторія ГГС водозабору № 3 у першій половині періоду спостережень має майже стабільну і досить велику довжину проекції і зменшення відхилень від оптимальної траєкторії. Друга половина траєкторія спрямована у напрямі зменшення довжини проекції і збільшення відхилення.

Висновки. Дана стаття є першою частиною серії наукових праць авторів по багатомісному системному геомоніторингу підземних вод в районах водозаборів.

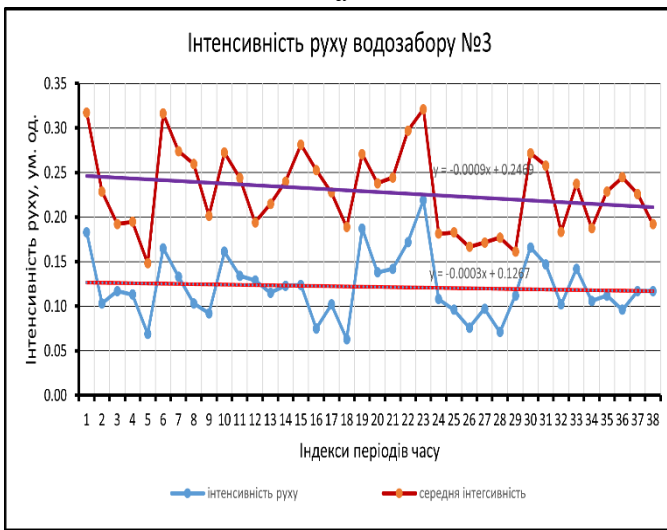
У роботі обґрунтовано можливість застосування для геомоніторингу гідрогеологічних об'єктів методу моделювання траєкторії руху об'єктів у нормованому фазовому просторі, розробленого у Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна для задач суспільно-географічного моніторингу.



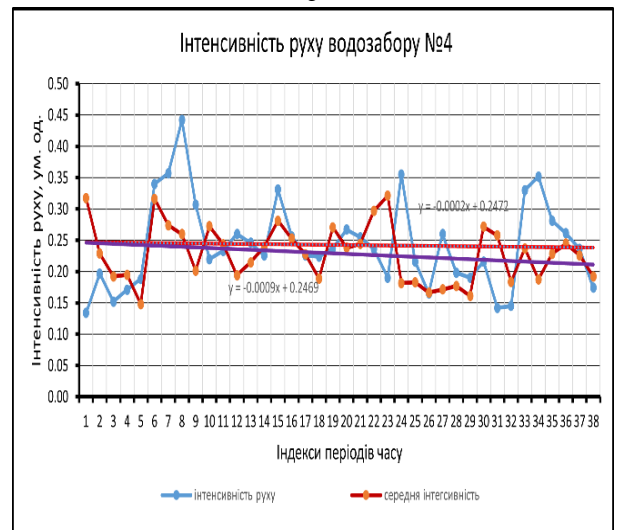
а



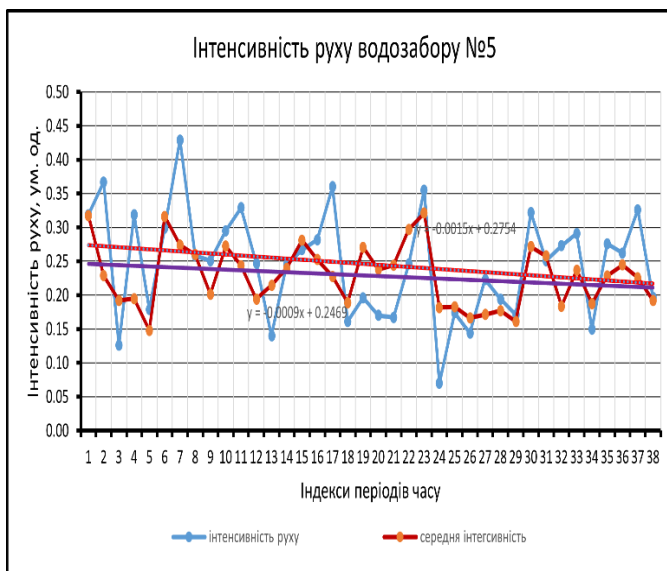
б



в



г



д

Рис. 2. Графіки інтенсивності руху ГГС у НФП:

- а – у районі водозабору № 1;
- б – у районі водозабору № 2;
- в - у районі водозабору № 3;
- г - у районі водозабору № 4;
- д - у районі водозабору № 5

Fig. 2. Graphs of moving intensity of HGS in NPS:

- a - in the area of water intake № 1;
- b - in the area of water intake № 2;
- c - in the area of water intake № 3;
- d - in the area of water intake № 4;
- e - in the area of water intake № 5

Досліджено гідрогеохімічні режими експлуатації потужних водозаборів №№ 1-5 м. Полтава, що експлуатують сеноман-нижньокрейдний водоносний комплекс, за період 1981-2008 рр. за нерегулярною схемою у часі.

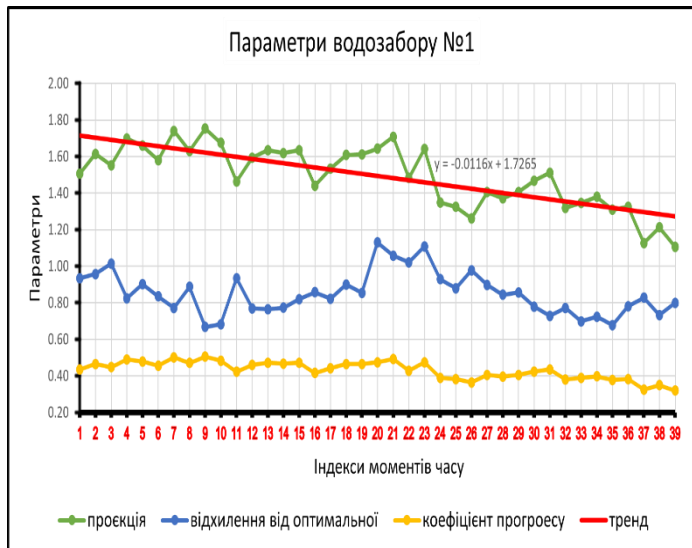
Розраховано по кожному водозабору наступні показники системного розвитку ГГС: а) на кожний період часу – довжину шляху, пройденого ГГС водозабору, яка характеризує інтенсивність зміни хімічного складу підземних вод;

б) на кожний контрольний момент часу – проєкцію поточної точки траєкторії на оптимальну траєкторію (головну діагональ), відхилення точки від оптимальної траєкторії, коефіцієнт прогресу (відношення проєкції точки до довжини головної діагоналі).

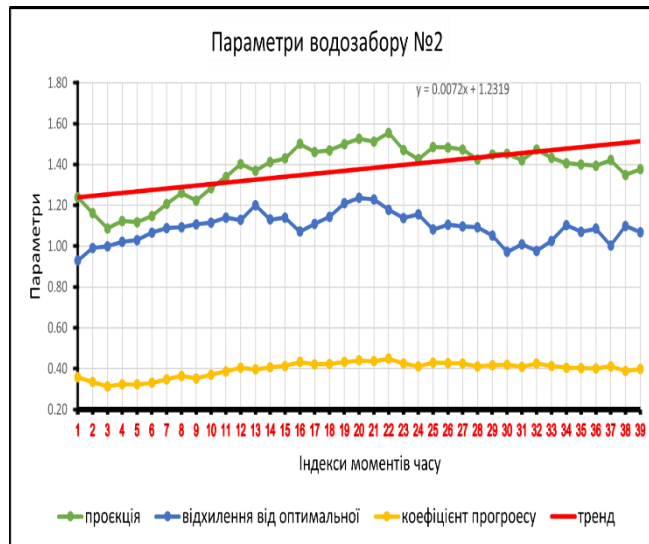
Визначено основні тенденції системного ро-

звитку ГТС для всіх досліджуваних водозаборів:

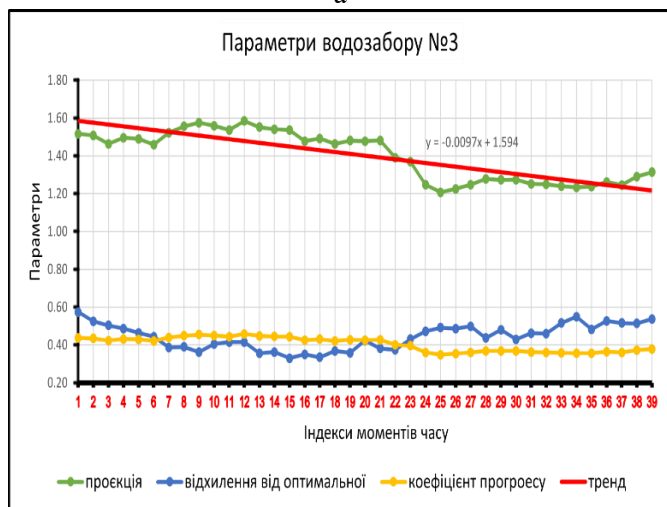
- інтенсивність зміни хімічного складу підземних вод водозаборів №№ 1-5 з часом зменшується, що можна пояснити зменшенням водовідбору і гідродинамічними чинниками, пов'язаними з формуванням депресійної лійки, зокрема поширенням зони квазістаціонарного режиму



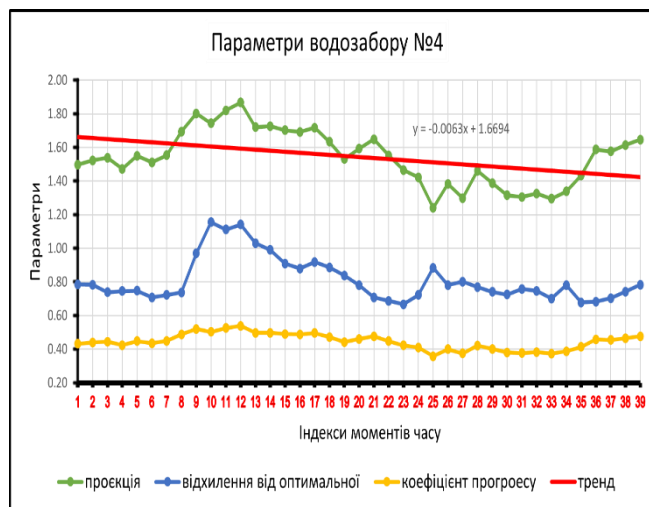
а



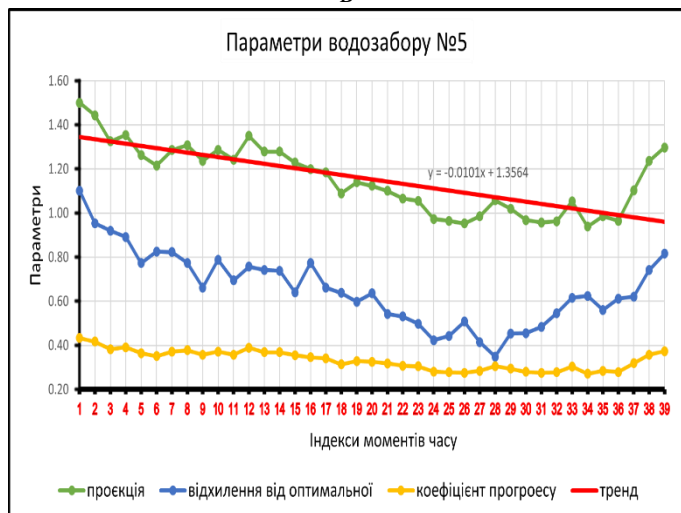
б



в



г



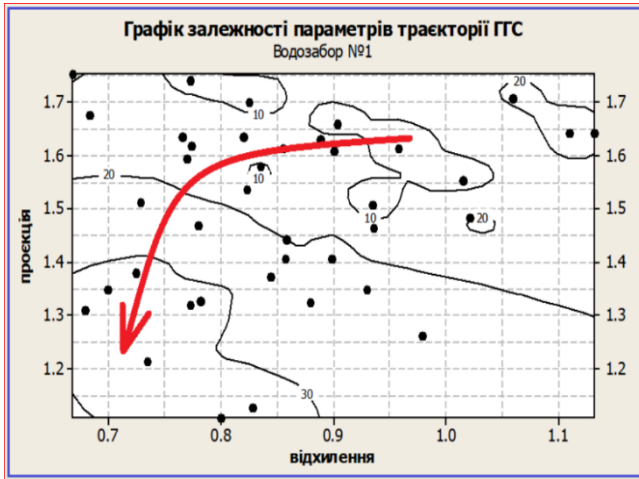
д

Рис. 3. Графіки параметрів траєкторії руху ГТС у НФП:

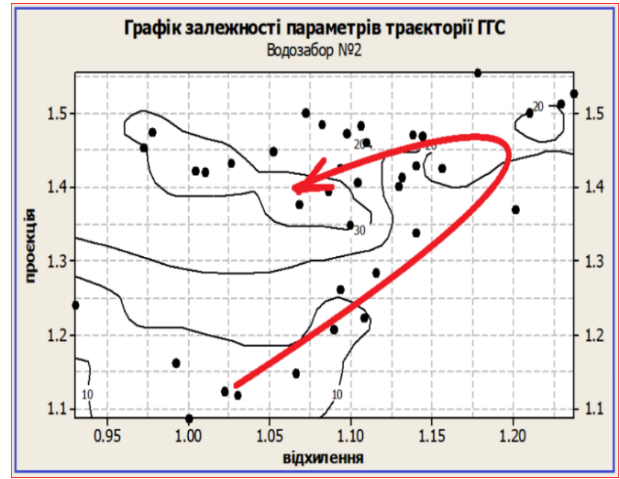
- а – у районі водозабору № 1;
- б – у районі водозабору № 2;
- в - у районі водозабору № 3;
- г - у районі водозабору № 4;
- д - у районі водозабору № 5

Fig. 3. Graphs of moving trajectory parameters of HGS in NPS:

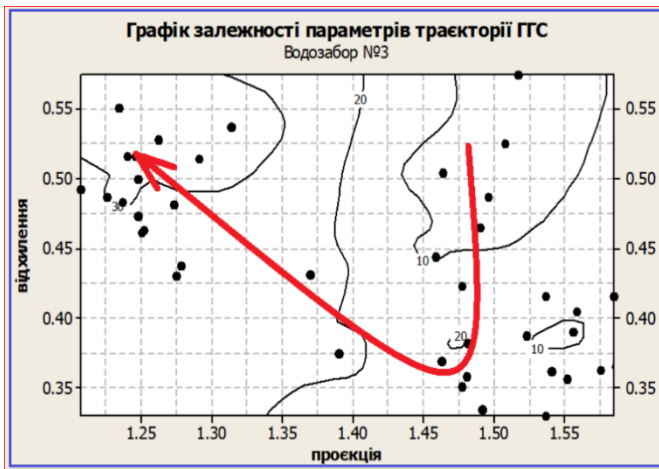
- a - in the area of water intake № 1;
- b - in the area of water intake № 2;
- c - in the area of water intake № 3;
- d - in the area of water intake № 4;
- e - in the area of water intake № 5



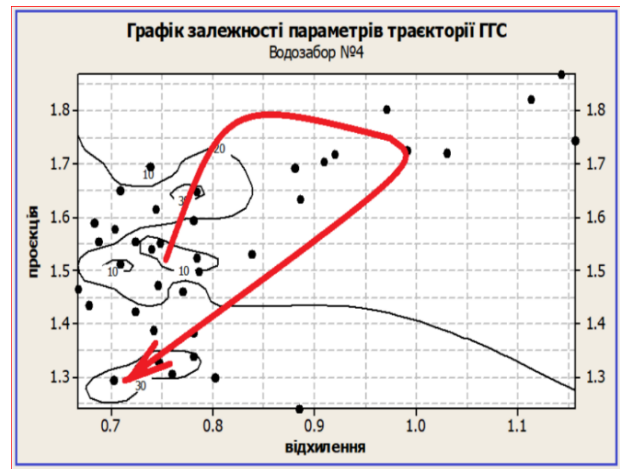
а



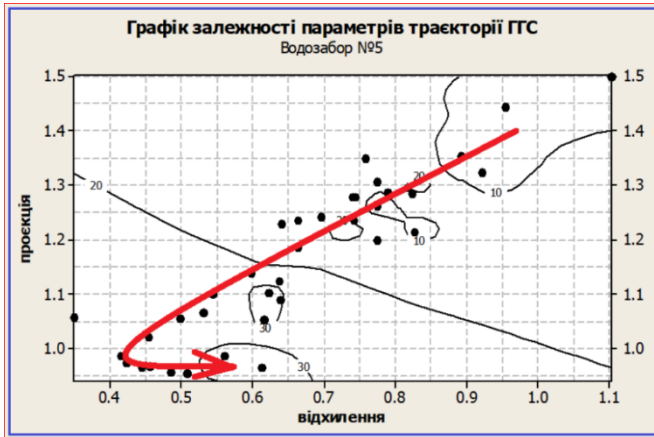
б



в



г



д

Рис. 4. Графіки залежності параметрів траєкторії руху ГТС у НФП:

а – у районі водозабору № 1;

б – у районі водозабору № 2;

в - у районі водозабору № 3;

г - у районі водозабору № 4;

д - у районі водозабору № 5

Fig. 4. Graphs of dependence of moving trajectory parameters of HGS in NPS:

a - in the area of water intake № 1;

b - in the area of water intake № 2;

c - in the area of water intake № 3;

d - in the area of water intake № 4;

e - in the area of water intake № 5

фільтрації;

- за абсолютними значеннями інтенсивності зміни хімічного складу підземних вод виділяється водозабір № 3, показник якого суттєво менше показників інших водозаборів;

- найбільшою мінливістю інтенсивності зміни хімічного складу у часі відрізняються підземні води на водозаборі № 1 як за амплітудою,

так і за абсолютними значеннями;

- спостерігається досить помітна синхронізація графіків інтенсивності руху ГТС водозаборів у НФП і середньої інтенсивності зміни хімічного складу підземних вод, але за детальним аналізом виявляються деякі відхилення від цієї закономірності, які можуть бути зумовлені різкими змінами режиму роботи водозаборів.

Список використаної літератури

1. Временное методическое руководство по проведению комплексных эколого-геологических исследований (на территории Украины) [Текст] / под ред. Е. А. Яковлева [и др.]. – К.: ГПП «Геопрогноз», 1994. – 331 с.
2. Немець К. А. Теорія і методологія географічної науки: методи просторового аналізу [Текст] / К. А. Немець, Л. М. Немець. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. – 172 с.
3. Огняник Н. С. Эколого-гидрогеологический мониторинг территорий загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами [Текст] / Н. С. Огняник, Н. К. Парамонова, А. Л. Брикс [и др.]. – К.: LAT&K, 2013. – 254 с.
4. Огняник Н. С. Охрана подземных вод в условиях техногенеза [Текст] / Н.С. Огняник. – К.: Вища школа, 1985. – 221 с.
5. Удалов І. В. Еколого-геологічне картографування та моніторинг геологічного середовища: навчальний посібник [Текст] / І. В. Удалов, І. К. Решетов. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2012. – 152 с.
6. Яковлев С. О. Еколого-геохімічна оцінка забруднення ґрунтів, донних відкладів, ґрунтових вод. Методичні рекомендації [Текст] / С. О. Яковлев, І. В. Мельник, А. І. Дубицький. – К.: ДГП «Геоінформ», 1998. – 34 с.
7. Яковлев С. О. Методологія екологічних досліджень регіональних техногенних змін геологічного середовища України : автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.26.05 [Текст] / С. О. Яковлев. – Івано-Франківський держ.техн.універ. – К., 1996. – 95 с.
8. Яковлев Е. А. Методология оценки экологического состояния подземных вод [Текст] / Е. А. Яковлев, Н. А. Юркова, В. А. Сляднев // Экология и ресурсосбережение. – Киев, 2001. – № 3. – С. 56–59.
9. Abtahi M. A modified drinking water quality index (DWQI) for assessing drinking source water quality in rural communities of Khuzestan Province, Iran [Text] / M. Abtahi, N. Golchinpour, K. Yaghmaeian [Eds.] // Ecological Indicators, June 2015. – Vol. 53. – P. 283-291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.02.009>
10. Aziz A. Rational integration of ecologic-geological studies [Text] / A. Aziz, I. V. Oudalov, N. Rouhollah [Eds.] // Ecology, Environment and Conservation Paper, 2015. – Vol. 21, Issue 4. – P. 1625-1631.
11. Chen Y. Water quality monitoring in smart city: A pilot project [Text] / Y. Chen, D. Han // Automation in Construction, May 2018. – Vol. 89. – P. 307-316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.008>
12. Dalla Libera N. Geostatistics as a tool to improve the natural background level definition: An application in groundwater [Text] / N. Dalla Libera, P. Fabbri, L. Mason [Eds.] // Science of The Total Environment, November 2017. – Vol. 598. – P. 330-340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.018>
13. Kononenko A. Criteria for Assessing Groundwater Contamination Levels of Marl and Chalk Water Intakes in Eastern Ukraine [Text] / A. Kononenko, A. Lurie, I. Udalov // Eastern European Scientific Journal (Gesellschaftswissenschaften): Düsseldorf (Germany): Auris Verlag, 2018. – № 2. – P. 13-17.
14. Molinari A. Geostatistical multimodel approach for the assessment of the spatial distribution of natural background concentrations in large-scale groundwater bodies [Text] / A. Molinari, L. Guadagnini, M. Marcaccio [Eds.] // Water Research, February 2019. – Vol. 149. – P. 522-532. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.049>
15. Nurani Zulkifli S. Detection of contaminants in water supply: A review on state-of-the-art monitoring technologies and their applications [Text] / S. Nurani Zulkifli, H. Abdul Rahim, W.-J. Lau // Sensors and Actuators B: Chemical, February 2018. – Vol. 255, Part 3. – P. 2657-2689. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.09.078>
16. Preziosi E. Natural background level assessment in groundwaters: probability plot versus pre-selection method [Text] / E. Preziosi, D. Parrone, A. Del Bon [Eds.] // Journal of Geochemical Exploration, August 2014. – Vol. 143. – P. 43-53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.03.015>
17. Szabo J. On-line Water Quality Monitoring for Drinking Water Contamination [Text] / J. Szabo, J. Hall // Comprehensive Water Quality and Purification, 2014. – Vol. 2. – P. 266-282. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382182-9.00038-4>
18. Weiwu Y. Comprehensive assessment and visualized monitoring of urban drinking water quality [Text] / Y. Weiwu, L. Jialong, B. Xiaohui // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, July 2016. – Vol. 155. – P. 26-35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2016.03.026>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Многомерный системный геомониторинг подземных вод в районах водозаборов (на примере г. Полтава). Часть 1. Идентификация системного развития гидрогеологического процесса

Константин Аркадьевич Немец¹,

д. геогр. н., проф., кафедра гидрогеологии,

¹Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина;

Игорь Валерьевич Удалов¹,

д. геол. н., проф., зав. кафедрой гидрогеологии;

Анатолий Йонович Лурье¹,

д. геол.-мин. н., проф., кафедра гидрогеологии;

Виктория Николаевна Прибылова¹,

к. геол. н., доц., кафедра гидрогеологии;

Алексей Николаевич Крайнюков¹,

д. геогр. н., проф., кафедра экологической безопасности и экологического образования

Работа является началом серии научных трудов авторов по актуальной экологической теме – многомерного системного геомониторинга подземных вод в районах водозаборов. Авторами обоснована возможность применения для геомониторинга гидрогеологических объектов метода моделирования траектории движения объектов в нормированном фазовом пространстве, разработанного в Харьковском национальном университете имени В.Н. Каразина для задач общественно-географического мониторинга. Исследованы гидрогеохимические режимы эксплуатации пяти мощных водозаборов Полтавской городской агломерации, эксплуатирующих сеноман-нижнемеловой водоносный комплекс, за 28-ми летний период времени. Количественно рассчитаны по каждому водозабору следующие показатели системного развития гидрогеологической системы: длина пути, пройденного гидрогеологической системой водозабора на каждый период времени; проекция текущей точки траектории на оптимальную траекторию, отклонение точки от оптимальной траектории и коэффициент прогресса на каждый контрольный момент времени. На базе полученных результатов моделирования установлены основные тенденции системного развития гидрогеологической системы для всех исследуемых водозаборов: уменьшение интенсивности изменения химического состава подземных вод на всех водозаборах со временем; существенно меньшие показатели интенсивности изменения химического состава подземных вод на водозаборе № 3; наибольшая изменчивость интенсивности изменения химического состава во времени – на водозаборе № 1; достаточно заметная синхронизация интенсивности движения гидрогеологической системы водозаборов и средней интенсивности изменения химического состава подземных вод, но оказываются некоторые отклонения от этой закономерности, которые могут быть обусловлены резкими изменениями режима работы водозаборов.

Ключевые слова: геомониторинг, гидрогеологическая система, моделирование, подземные воды, водозабор, химический состав.

Multidimensional system geomonitoring of groundwater in water in-takes areas (on the example of Poltava city). Part 1. Identification of system development of hydrogeological process

Kostiantyn Niemets¹,

DSc (Geography), Professor,

¹V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine;

Ihor Udalov¹,

DSc (Geology), Full Professor, Head of the Department;

Anatoliy Lurye¹,

DSc (Geology and Mineralogy), Full Professor;

Victoriia Pribilova¹,

PhD (Geology), Associate Professor;

Oleksii Krainiukov¹,

DSc (Geography), Full Professor

ABSTRACT

Formulation of the problem. The paper is the beginning of scientific papers series of authors on an actual environmental topic – multidimensional system geomonitoring of groundwater in water intakes areas.

The purpose of article is a substantiation of application possibility of the method of objects trajectory modeling in the normalized phase space, which has been developed at V. N. Karazin Kharkiv National University for socio-geographical monitoring tasks, for hydrogeological objects geomonitoring.

Materials and methods. The research is based on the method of objects trajectory modeling in the normalized phase space.

To achieve the purpose of this study, geomonitoring data of five water intakes in Poltava city, which operate Cenomanian-Lower Cretaceous aquifer, has been used. Changes in the average chemical composition of groundwater for each water intake have been analyzed according to 12 indicators: pH, hardness, dry residue, ammonium, fluorine, chlorine, sulfates, bicarbonates, calcium, magnesium, sodium+potassium, ferrous iron. The initial data have been collected from 1981 to 2008 according to an irregular pattern in time (39 points in time).

Research results. The following indicators of systemic development of hydrogeological system have been calculated for each water intake: a) for each period of time – the path length traveled by the water intake hydrogeological system, which characterizes the intensity of changes in the groundwater chemical composition;

b) for each control time – the projection of current trajectory point on the optimal trajectory (main diagonal), the deviation of point from the optimal trajectory, the progress coefficient (the ratio of point projection to the length of main diagonal).

The main trends in the systemic development of hydrogeological system for all studied water intakes have been identified:

- the intensity of changes in the groundwater chemical composition at water intakes Nos. 1-5 decreases over time, which can be explained by the reduction of water withdrawal and hydrodynamic factors associated with the formation of depression funnel, in particular the spreading of quasi-stationary filtration regime;

- according to the absolute values of changes intensity in the groundwater chemical composition, the water intake No. 3 is highlighted, the value of which is significantly less than the values of other water intakes;

- groundwater at the water intake No. 1 has the greatest variability in the changes intensity of chemical composition over time both in amplitude and in absolute values;

- there is a very noticeable synchronization of movement intensity graphs of water intakes hydrogeological systems in the normalized phase space and the average intensity of changes in the groundwater chemical composition, but a detailed analysis reveals some deviations from this pattern, which may be due to abrupt changes in operation mode of water intakes.

Keywords: geomonitoring, hydrogeological system, modeling, groundwater, water intake, chemical composition.

References

1. Yakovlev, Ye. A. (Eds.) (1994). *Vremennoe metodicheskoe rukovodstvo po provedeniyu kompleksnykh ekologo-geologicheskikh issledovaniy (na territorii Ukrainy)* [Temporary guidelines for the conduct of integrated environmental and geological research (in Ukraine)], Kiev: GGP «Geoprognoz», 331. [in Russian]
2. Niemets, K. A., Niemets, L. M. (2014). *Teoriya i metodologiya geografichnoyi nauky: metody`n`y` prostorovogo analizu* [Theory and methodology of geographical science: methods of spatial analysis], Kharkiv: V. N. Karazin KhNU, 172. [in Ukrainian]
3. Ognyanik, N. S., Paramonova, N. K., Briks, A. L. (Eds.) (2013). *Ekologo-gidrogeologicheskyy monitoring territoriy zagryazneniya geologicheskoy sredey legkimi nefteproduktami* [The ecological and hydrogeological monitoring of territories of contamination of geological environment by light oil products], Kiev: LAT&K, 254. [in Russian]
4. Ognyanik, N. S. (1985). *Okhrana podzemnykh vod v usloviyakh tekhnogeneza* [Protection of groundwater in the conditions of technogenesis], Kiev: Vysha shkola, 221. [in Russian]
5. Udalov, I. V., Reshetov, I. K. (2012). *Ekologo-geologichne kartografuvannya ta monitoryng geologichnogo seredov`y`shha: navchal`ny`j posibny`k* [Ecological-geological mapping and geological environment monitoring: a textbook], Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, 152. [in Ukrainian]
6. Yakovlev, Ye. O., Mel`ny`k, I. V., Duby`cz`ky`j, A. I. (1998). *Ekologo-geochemichna ocinka zabrudnennya g`runtiv, donny`x vidkladiv, g`runtovoy`x vod. Metody`chni rekomendaciyi* [Ecological-geochemical assessment of contamination of soil, bottom sediments, groundwater: Guidelines], Kyiv: DGP «Geoinform», 34. [in Ukrainian]
7. Yakovlev, Ye. O. (1996). *Metodologiya ekologichny`x doslidzhen` regional`ny`x texnogeny`x zmin geologichnogo seredov`y`shha Ukrainy`n`y`* [Methodology of ecological researches of regional technogenic changes of the geological environment of Ukraine]: Sc. D. (Technics) Thesis, Kyiv, 95. [in Ukrainian]
8. Yakovlev, Ye. A., Yurkova, N. A., Slyadneva, V. A. (2001). *Metodologiya otsenki ekologicheskogo sostoyaniya podzemnykh vod* [Methodology for assessing the groundwater ecological state]. *Ecology and resource conservation*, 3, 56-59. [in Russian]
9. Abtahi, M., Golchinpour, N., Yaghmaeian, K. (Eds.) (2015). *A modified drinking water quality index (DWQI) for assessing drinking source water quality in rural communities of Khuzestan Province, Iran. Ecological Indicators*, 53, 283-291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.02.009>
10. Aziz, A., Oudalov, I. V., Rouhollah, N. (Eds.) (2015). *Rational integration of ecologic-geological studies. – Ecology, Environment and Conservation Paper*, 21, 4, 1625-1631.
11. Chen, Y., Han, D. (2018). *Water quality monitoring in smart city: A pilot project. Automation in Construction*, 89, 307-316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.008>

12. Dalla Libera, N., Fabbri, P., Mason, L. (Eds.) (2017). *Geostatistics as a tool to improve the natural background level definition: An application in groundwater*. *Science of The Total Environment*, 598, 330-340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.018>
13. Kononenko, A., Lurie, A., Udalov, I. (2018). *Criteria for Assessing Groundwater Contamination Levels of Marl and Chalk Water Intakes in Eastern Ukraine*. *Eastern European Scientific Journal (Gesellschaftswissenschaften): Düsseldorf (Germany): Auris Verlag*, 2, 13–17.
14. Molinari, A., Guadagnini, L., Marcaccio, M. (Eds.) (2019), *Geostatistical multimodel approach for the assessment of the spatial distribution of natural background concentrations in large-scale groundwater bodies*. *Water Research*, Vol. 149, 522-532. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.049>
15. Nurani Zulkifli, S., Abdul Rahim, H., Lau, W.-J. (2018). *Detection of contaminants in water supply: A review on state-of-the-art monitoring technologies and their applications*. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 255, 3, 2657-2689. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.09.078>
16. Preziosi, E., Parrone, D., Del Bon, A. (Eds.) (2014). *Natural background level assessment in groundwaters: probability plot versus pre-selection method*. *Journal of Geochemical Exploration*, 143, 43-53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.03.015>
17. Szabo, J., Hall, J. (2014). *On-line Water Quality Monitoring for Drinking Water Contamination*. *Comprehensive Water Quality and Purification*, 2, 266-282. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382182-9.00038-4>
18. Weiwu, Y., Jialong, L., Xiaohui, B. (2016). *Comprehensive assessment and visualized monitoring of urban drinking water quality*. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 155, 26-35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2016.03.026>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Received 15 March 2021

Accepted 12 April 2021