

Л.І. Давибіда, Е.Д. Кузьменко

## ДОВГОСТРОКОВЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ПРИРОДНОГО РЕЖИМУ РІВНІВ ҐРУНТОВИХ ВОД НА ПРИКЛАДІ ТЕРИТОРІЇ ДНІПРОПЕТРОВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Наведено методику дослідження природного гідрогеодинамічного режиму. Здійснено кількісну оцінку закономірностей багаторічних коливань рівнів ґрунтових вод і їх зв'язків із окремими режимоутворювальними чинниками. Результати покладено в основу довгострокового прогнозу мінливості рівнів ґрунтових вод для гідрогеологічних районів досліджуваної території Дніпропетровської області, які характеризуються синхронністю багаторічного гідрогеодинамічного режиму. Побудовано картографічну регіональну модель прогнозованої забезпеченості рівнів.

**Ключові слова:** ґрунтові води, режимоутворювальні чинники, довгостроковий прогноз, інтегральний показник.

У зв'язку зі зростанням значення підземних вод у безпеці питного водопостачання України за умов збільшення техногенного впливу на них виникла необхідність постійного вивчення і моніторингу рівнів і хімічного складу цих вод, аналізу та оцінки гідрогеологічних фільтраційних і міграційних процесів, прогнозу можливих змін підземної гідросфери. Вивчення та прогнозування режиму підземних вод займають провідне положення у комплексі гідрогеологічних досліджень, оскільки дають змогу кількісно схарактеризувати процес формування підземних вод і прослідкувати зміни гідрогеологічних умов у часі, що, у свою чергу, дає можливість обґрунтувати заходи щодо оптимального використання підземних вод, передбачити і своєчасно виявити негативні природні та техногенні впливи.

Результати попередніх досліджень [1–6] свідчать, що природний режим рівня підземних вод є інтегральною функцією режимоутворювальних чинників і проявляється з певною інерційністю відносно мінливості останніх. Просторово-часовий гідрогеологічний прогноз режиму ґрунтового водоносного горизонту як верхньої зони підземної гідросфери є складною проблемою, яку слід розв'язувати на основі вивчення комплексу закономірностей підземного водоенергообміну і змін режимоутворювальних факторів. В останні роки для території України розроблені методичні основи складання коротко- та середньострокових прогнозів елементів режиму рівня ґрунтових вод, що знаходяться у природних і слабопорушених умовах, із використанням факторних імовірно-статистичних моделей [1]. Питання довгострокового прогнозування рівнів як ґрунтових, так і міжпластових вод, які мають меншу інтенсивність водообміну і тісноту зв'язків з гідрометеофакторами, у літературі висвітлені менш докладно, хоча певні робо-

ти в цьому напрямі проведені [1, 2, 4–6]. Актуальними питаннями в цій галузі також залишаються проблеми поглибленого вивчення процесів формування режиму підземних вод, комплексного врахування складного впливу режимоутворювальних чинників і розробки на цій основі об'єктивних критеріїв, які дадуть можливість екстраполювати результати локальних спостережень для прогнозів режиму підземних вод на довколишні території [2].

Мета проведеного дослідження полягає в розробці методики часового довгострокового прогнозу природного режиму рівнів ґрунтових вод, виділення та екстраполяції на перспективу загального багаторічного тренду формування рівня ґрунтових вод під дією природних чинників, а також апробації запропонованої методики на прикладі окремих типових ділянок із однорідним гідрогеологічним режимом. Вирішення поставлених завдань є необхідним етапом для розробки ПС просторово-часового прогнозування режиму коливань рівнів підземних вод.

Як вихідні дані для дослідження були використані результати багаторічних спостережень (середньорічні глибини залягання рівня ґрунтових вод) для свердловин території Дніпропетровської області. Вивчення та прогнозування гідрогеодинамічного режиму для цього регіону є особливо актуальними у зв'язку зі стійкими тенденціями розвитку підтоплення.

Для аналізу були відібрані спостережні свердловини, для яких багаторічна мінливість положення рівня ґрунтових вод відповідає критеріям природного режиму [1], а також свердловини, що знаходяться у слабопорушених та порушених умовах формування режиму, для яких природний багаторічний хід мінливості положення рівнів було відновлено в результаті проведеного аналізу часових рядів [7].

Оскільки часові прогнози слід складати для території з однорідним гідрогеодинамічним режимом, попередньо було проведено аналіз [7, 8], який дав змогу намітити межі синхронності багаторічного режиму рівнів і виділити такі райони гідрогеодинамічної аналогії:

- I – північна окраїна Причорноморської низовини та Базавлуцький хвилясто-височинний район в умовах значно посушливого клімату;
- II – перехідний район побережжя Дніпра в умовах посушливого клімату;
- III – Придніпровська низовина в межах терас Дніпра й Орелі з вологим прохолодним кліматом;
- IV – межиріччя Самари і Кільченя на території Орільсько-Самарського підвищення з порівняно посушливими кліматичними умовами;
- V – Придніпровська височина та Придніпровська низовина в районі річок Самара і Вовча з недостатньо вологим кліматом;
- VI – північно-західна частина Приазовської височини в умовах посушливого клімату.

Для виділених районів, умовно однорідних за багаторічним природним режимом рівнів ґрунтових вод, розраховані узагальнені ряди мінливості положення рівня ґрунтових вод (рис. 1), що характеризують природний (фоновий) гідрогеодинамічний режим і є вихідними даними для складання регіональних довгострокових прогнозів положення рівня ґрунтових вод. Підсумкові графіки побудовані за осередненими нормалізованими значеннями, отриманими за даними групи спостережних свердловин.

Коливання рівнів ґрунтових вод є не випадковими, а визначеними певними причинно-наслідковими зв'язками. Складність аналізу останніх зумовлена інтерференцією сумарного впливу серії режимоутворювальних (метеорологічних, космогенних, сейсмічних, гідрологічних) чинників, ефект якого проявляється неоднаково у різних гідрогеологічних умовах. Тому основними методами аналізу та прогнозу режиму ґрунтових вод є ті, за допомогою яких враховують багатофакторність процесу [2].

Результати попередніх досліджень [1, 4, 9] засвідчують, що для довгострокового прогнозування природного режиму рівнів підземних вод першочергово доцільно розглядати такі числові характеристики метеорологічних режимоутворювальних чинників: річну кількість опадів, кількість опадів холодного періоду (листопад–лютий), середньорічні температури повітря, середні літні температури повітря. Саме ці параметри дають змогу кількісно схарактеризувати комплексний вплив чинників, які визначають величину живлення підземних вод у кожному окремо взятому році. На території Дніпропетровської області виділено дві кліматичні зони, які дещо розрізняються розподілом температур, кількістю опадів, переважними напрямками вітру тощо [8, 10]: а) більш теплої і сухої південно-західної з репрезентативними метеопостами “Кривий Ріг” і “Комісарівка”; б) північно-східної з дещо нижчими значеннями середньорічних температур і більшою кількістю опадів, які спостерігаються метеопостами “Дніпропетровськ”, “Павлоград”, “Чаплине”, “Губиниха”. Територіально перша кліматична зона відповідає виділеним гідрогеологічним районам I і II, друга відповідно III, IV, V і VI.

На зв'язок періодів сонячної активності (чисел Вольфа) з періодами коливань рівнів підземних вод указано в роботах [2, 4–6]. Проте за наявності зв'язків сонячної активності з геологічними та гідрогеологічними процесами їх природа залишається невиясненою, хоча існують гіпотези щодо цих причин. За Дж. Германом [11], зв'язок сонячної активності з геологічними процесами є опосередкованим через передачу енергії, а також через вплив на клімат Землі, у першу чергу на закономірності циркуляції повітряних мас, опадоутворення, температуру.

Гідрологічні чинники формування режиму виділяють в окрему групу [6, 9], що пов'язано із специфікою їх впливу. Режим поверхневих вод, у свою чергу, також визначається кліматичними чинниками, вплив яких передається на підземні води. Ступінь впливу гідрологічних факторів залежить від геологічної будови та гідрогеологіч-

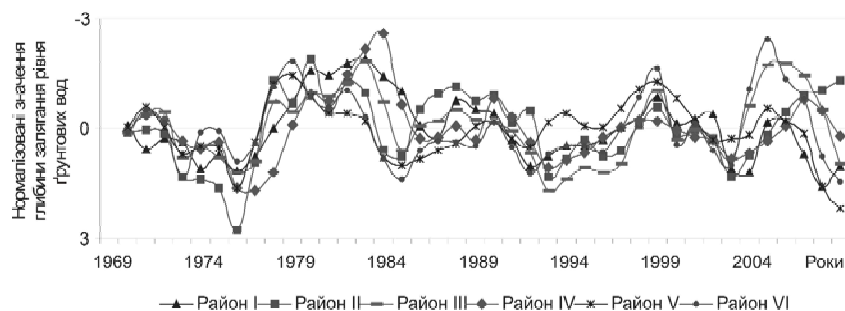


Рис. 1. Регіонально узагальнені ряди мінливості положення рівня ґрунтових вод території Дніпропетровської області

них умов території. Для характеристики гідрологічного режиму вибрано ряди середньорічних витрат води, величина яких пов'язана з модулем стоку, який включає такі чинники, як поверхневий і підземний стік, і тісно пов'язаний із рівнями. Часові ряди середньорічних витрат води є результатами багаторічних спостережень на репрезентативних гідропостах для водотоків кожного виділеного району.

Серед геологічних факторів, ефект яких може бути зафіксований спостереженнями, насамперед слід назвати землетруси. Вплив землетрусів на режим підземних вод, як правило, є епізодичним і найчастіше проявляється у різких змінах рівня напірних вод. Проте сейсмічна активність земної кори іноді може спричинити суттєві зміни умов формування підземних вод, пов'язані зі зміною площ підземних водозбірних басейнів [12]. Сучасні дослідження [13, 14] засвідчують наявність взаємозв'язку гідрогеодинамічного режиму підземних вод території Дніпропетровської області із сейсмічною активністю. Як числову характеристику чинника використовують сумарну річну енергію землетрусів.

Попередньо проведений статистичний аналіз даних багаторічних спостережень за змінами всіх метеорологічних факторів на всіх метеопостах Дніпропетровської області виявив високу відповідність їх фактичних законів розподілу теоретичному нормальному закону розподілу. Розподіли характеристик космічних чинників (числа Вольфа) підпорядковуються гамма-закону, а гідрологічних (середньорічні витрати води) і сейсмічних (сумарна річна енергія землетрусів) – логнормальному теоретичному закону розподілу, тобто містять експоненту. Для уніфікації законів розподілу режимоутворювальних чинників (зведення до нормального закону розподілу) достатньою є процедура логарифмування значень рядів середньорічних витрат, сумарної річної енергії землетрусів і чисел Вольфа.

Часові ряди для всіх чинників формування режиму були зведені до одного періоду 1971–2004 рр. Для кліматичних зон також було розраховано підсумкові графіки багаторічної мінливості метеопараметрів як середнє арифметичне на всіх досліджуваних метеопостах для кожного року.

У цій публікації наведено інтегрований підхід до оцінки факторів, які можуть впливати на зміни рівня підземних вод. Запропонована методика дає змогу встановити взаємні кількісні зв'язки між змінами рівнів ґрунтових вод досліджуваних районів і чинниками їх формування з подальшим виявленням можливості прогнозування положення рівня ґрунтових вод. Подібний спосіб обробки та аналізу даних з успіхом був застосований під час регіонального довгострокового прогнозування екзогенних геологічних процесів [15, 16]. Мета проведеного аналізу рядів довгострокових спостережень за рівнем ґрунтових вод полягала у визначенні періодичності в коливаннях рівнів і мінливості чинників, що їх зумовлюють, як основи для подальшого прогнозування гідрогеодинамічного режиму.

Для визначення основних періодичних складових у часових рядах мінливості положень рівня ґрунтових вод окремих районів і режимоутворювальних факторів було розраховано автокореляційні функції та проведено спектральний аналіз рядів спостережень. Аналіз періодичності коливань у часових рядах положень рівня ґрунтових вод і режимоутворювальних факторів довів, що всі вибрані чинники є квазігармонічними, тобто в усіх наявні періодичні процеси, значні розбіжності у періодичності між гідрогеологічними районами відсутні (табл. 1).

Деякі періоди за різними параметрами збігаються. З метою виключення впливу випадкових коливань (шуму) ряди характеристик метеорологічних, гідрологічних і сейсмічних чинників було згладжено за допомогою методу ковзаючого вікна, унаслідок чого зросла статистична зна-

Таблиця 1. Встановлені періоди коливань значень часових рядів для гідрогеологічних районів (I–VI) Дніпропетровської області, роки

Параметр	Південна частина області		Північна частина області			
	I	II	III	IV	V	VI
Річна кількість атмосферних опадів	4–5, 8, 20		4, 8, 20			
Кількість опадів холодного періоду	3–4, 8, 20		4–5, 8, 20			
Середньорічна температура	3–4, 8–10, 20		3–5, 8–10, 20			
Середня температура повітря влітку	3, 5, 10, 20		3, 5, 10–11, 20			
Число Вольфа	9–11 років					
Сумарна річна енергія землетрусів	3–4, 6, 9 років					
Середньорічні витрати води	9–11	3, 4, 8–11	3, 9–10, 20	3, 9–11, 20	3, 4, 9–11, 20	3, 9–11
Середньорічний рівень ґрунтових вод	5–6, 8, 11, 20	4, 10, 20	4, 8, 10, 20	4, 8, 11, 20	4, 6–8, 10, 20	4, 8, 11, 20

Таблиця 2. Результати кореляційного аналізу часових рядів рівнів ґрунтових вод окремих гідрогеологічних районів і режимоутворювальних чинників

Чинник	Коефіцієнт кореляції з рівнями ґрунтових вод гідрогеологічних районів					
	I	II	III	IV	V	VI
Кількість опадів холодного періоду	<b>-0,49</b>	<b>-0,36</b>	<b>-0,5</b>	-0,22	<b>-0,44</b>	<b>-0,55</b>
Річна кількість опадів	<b>-0,39</b>	<b>-0,44</b>	-0,22	0,25	<b>-0,61</b>	<b>-0,64</b>
Середня температура повітря влітку	<b>0,4</b>	0,28	0,1	-0,001	-0,07	0,12
Середньорічна температура	0,3	<b>0,47</b>	0,01	-0,13	-0,01	0,003
Середньорічна витрата води	<b>-0,37</b>	<b>-0,71</b>	<b>-0,59</b>	<b>-0,37</b>	<b>-0,73</b>	<b>-0,69</b>
Число Вольфа	<b>-0,34</b>	-0,32	-0,33	<b>-0,42</b>	-0,24	-0,11
Сумарна річна енергія землетрусів	-0,15	-0,13	-0,18	-0,28	0,16	0,11

Примітка: жирним шрифтом виділені значущі коефіцієнти кореляції за рівня довіри 0,95.

чуєть триваліших (8–11, 20 років) періодів. Під час подальших розрахунків використовували згладжені ряди мінливості режимоутворювальних чинників. Для них також була виконана процедура нормалізації, яка має на меті трансформацію величин факторних характеристик, виражених у фізичних величинах, у безрозмірні показники контрастності, з якими далі можна проводити математичні операції.

Важливим завданням є встановлення якісних і кількісних зв'язків ритмів зміни досліджуваних показників, а також оцінка зміщення в часі окремих чинників із метою досягнення синфазності основних гармонік проаналізованих рядів. Першочерговим етапом аналізу є розрахунок коефіцієнтів кореляції Пірсона для досліджуваних рядів (табл. 2).

Додатково з метою виявлення дублюючих чинників або таких, які є малоефективними для використання як чинники формування гідрогеодинамічного режиму території, виконано кластерний аналіз даних. Як приклад на рис. 2 показано дендрограму відстаней ( $1-R_{xy}$ ) між окремими режимоутворювальними чинниками одного з виділених гідрогеологічних районів, яка побудована за результатами кластерного аналізу методом Варда.

Результати парного кореляційного аналізу і побудовані для кожного з районів дендрограми підтверджують наявність груп числових характе-

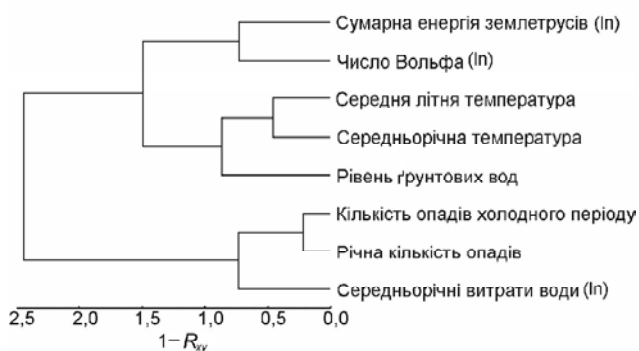


Рис. 2. Дендрограма зв'язків між групами чинників формування режиму рівнів ґрунтових вод району I за результатами кластерного аналізу

ристик чинників, тісніше порівняно з іншими зв'язаних між собою. Це в першу чергу групи метеопараметрів “кількість опадів холодного періоду – річна кількість опадів” і “середня літня температура – середньорічна температура”. Оскільки досліджувана територія Дніпропетровської області розміщується в зоні нестійкого зволоження, для якої характерний тип сезонного та цілорічного живлення ґрунтових вод, для одних районів простежується тісніший зв'язок із сезонними, а для інших – із середньорічними характеристиками метеочинників, що зумовлено домінуванням сезонного або цілорічного живлення ґрунтових вод.

З метою виключення дублюючих параметрів і вибору найефективніших числових характеристик режимоутворювальних чинників для кожного гідрогеологічного району за абсолютною величиною коефіцієнта кореляції відібрано домінуючі числові характеристики метеорологічних чинників формування режиму, а саме:

- район I – кількість опадів холодного періоду і середня температура повітря влітку характерні для території південно-західної кліматичної зони;
- район II – річна кількість опадів і середньорічна температура повітря південно-західної кліматичної зони;
- райони III, IV – кількість опадів холодного періоду і середня температура повітря влітку розраховані за результатами спостережень метеопостів північно-східної кліматичної зони;
- райони V, VI – річна кількість опадів і середньорічна температура повітря північно-східної кліматичної зони.

Що стосується характеристик “середньорічні витрати води – річна кількість опадів (кількість опадів холодного періоду)” та “число Вольфа – сумарна енергія землетрусів”, то, незважаючи на

Таблиця 3. Величини зміщень (лаг) випадкових функцій факторів відносно рядів середньорічного положення рівня ґрунтових вод, роки

Гідрогеологічний район	Сумарна річна енергія землетрусів	Кількість опадів	Температура повітря	Середньорічні витрати води	Число Вольфа
I	-2	+1	0	+1	-1
II	-2	+1	+1	0	-2
III	-2	+1	+1	+1	-1
IV	-1	+2	+3	+2	-1
V	-2	+1	+1	0	-1
VI	-2	+1	+1	0	-1

деяку статистичну спільність, на нашу думку, вони несуть досить різну інформацію за своєю природою, і їх вилучення з подальших досліджень є недоцільним.

Наступним відповідальним етапом обробки статистичних даних часових рядів є процедури розрахунків функції взаємної кореляції та їх подальший аналіз. Вони дають змогу оцінити максимальний ступінь парної кореляції між часовими рядами (фрагментами випадкових функцій) і визначити величину зміщення (лаг) для часової ув'язки всіх факторів між собою. Природно, що як фіксовані були прийняті ряди середньорічних положень рівня ґрунтових вод, відносно яких визначено величини часового зміщення режимуювальних чинників для досліджуваних районів (табл. 3).

Зміщення кривої багаторічних коливань рівня ґрунтових вод на 1–2 роки наперед порівняно з мінливістю метеорологічних чинників пояснюється відносною ізолюваністю підземної гідросфери від зовнішніх впливів, а отже, досить високою інерційністю реакції ґрунтових вод на зміни більш динамічних чинників формування режиму [1]. Зіставлення дат екстремумів сонячної активності з часом настання екстремумів рівнів ґрунтових вод для окремих гідрогеологічних районів дало змогу виявити їх зміщення на 1–2 роки назад. Подібну закономірність у праці [4] пояснено залежністю коливань рівнів ґрунтових вод від значень сонячної активності в моменти її максимальних приростів у послідовні роки. Аналогічне

зміщення спостерігається і для сумарної енергії землетрусів, що підтверджує деяку парагенетичну спорідненість космогенних і сейсмічних чинників, що вже було зазначено раніше.

Таким чином, для подальшого аналізу ряди режимуювальних чинників приймаємо зміщеними на встановлені часові проміжки. Повторний кореляційний аналіз зміщених рядів виявив зростання величин коефіцієнтів кореляції з режимуювальними чинниками для кожного з гідрогеологічних районів (табл. 4).

Значущість зв'язку мінливості досліджуваних параметрів є підставою для розрахунку інтегральних показників. Відповідну методику, а також застосування для вирішення завдань довгострокового прогнозування екзогенних геологічних процесів докладно описано у публікаціях [15–17]. Інтегральні показники для кожного з виділених районів обчислені з урахуванням коефіцієнтів інформативності (табл. 5) за формулою

$$\Phi_i = \sum_{j=1}^m X_{ij}^{\text{норм}} V_j, \quad (1)$$

де  $X_{ij}$  – нормалізовані значення числових характеристик факторів формування режиму;  $V_j$  – ваговий коефіцієнт інформативності  $j$ -го фактора;  $m$  – кількість факторів;  $i$  – рік спостережень.

Розрахунок значень коефіцієнтів кореляції між рівнями підземних вод і відповідними рядами отриманих інтегральних показників засвідчує суттєвість зв'язку. Так, для гідрогеологічного району I коефіцієнт кореляції з відповідним інтег-

Таблиця 4. Результати кореляційного аналізу рядів динаміки рівнів ґрунтових вод окремих гідрогеологічних районів і режимуювальних чинників, зміщених на встановлені часові проміжки

Чинник	Коефіцієнт кореляції з рівнями ґрунтових вод гідрогеологічних районів					
	I	II	III	IV	V	VI
Кількість опадів холодного періоду	<b>-0,73</b>	–	<b>-0,66</b>	<b>-0,8</b>	–	–
Річна кількість опадів	–	<b>-0,52</b>	–	–	<b>-0,82</b>	<b>-0,76</b>
Середня температура повітря влітку	<b>0,39</b>	–	0,17	<b>0,4</b>	–	–
Середньорічна температура	–	<b>0,6</b>	–	–	0,29	<b>0,42</b>
Середньорічна витрата води	<b>-0,58</b>	<b>-0,72</b>	<b>-0,71</b>	<b>-0,69</b>	<b>-0,7</b>	<b>-0,72</b>
Число Вольфа	<b>-0,45</b>	<b>-0,67</b>	<b>-0,36</b>	<b>-0,43</b>	<b>-0,54</b>	<b>-0,47</b>
Сумарна річна енергія землетрусів	<b>-0,37</b>	<b>-0,45</b>	<b>-0,51</b>	<b>-0,43</b>	-0,2	-0,24

Примітка: жирним шрифтом виділені значущі коефіцієнти кореляції за рівня довіри 0,95.

Таблиця 5. Результати розрахунків інформативності кожного з факторів на основі використання матриці парних коефіцієнтів кореляції

Чинник	Ваговий коефіцієнт інформативності чинників формування режиму рівнів ґрунтових вод для гідрогеологічних районів, %					
	I	II	III	IV	V	VI
Кількість опадів холодного періоду	22,2	–	25,1	26,3	–	–
Річна кількість опадів	–	17,7	–	–	26,8	23,1
Середня температура повітря влітку	14,5	–	11,5	15,5	–	–
Середньорічна температура	–	22,6	–	–	11,9	16,9
Середньорічна витрата води	24,6	20,8	31,4	22,7	24,3	27,4
Число Вольфа	21,5	18,8	14,6	15,9	25,8	17,6
Сумарна річна енергія землетрусів	17,2	19,9	17,4	19,7	11,3	15,0

ральним показником становить 0,84, для району II – 0,81; III – 0,79; IV – 0,84; V – 0,78; VI – 0,77.

Розрахунок функцій автокореляції та аналіз Фур'є дали змогу виявити у часових рядах інтегральних показників усіх розглянутих гідрогеологічних районів 8–10-річні ритми, наявні, як зазначено, у часових рядах спостережень за рівнями ґрунтових вод і чинниками формування гідрогеодинамічного режиму. Циклічність рядів забезпеченості інтегрального показника, що подібна до циклічності, яка простежується в рядах багаторічної мінливості рівнів і чинників, що її зумовлюють, та їх тісна кореляція із рядами середньорічних рівнів гідрогеологічних районів дають можливість прогнозувати режим рівнів ґрунтових вод у часі екстраполяцією виявлених трендів.

Імовірнісну оцінку рядів інтегральних показників здійснюють з використанням функції Лапласа, що дає змогу встановити прогнозу забезпеченість рівнів ґрунтових вод.

Наступним кроком досліджень є екстраполяція графіків інтегральних показників та їх відповідної забезпеченості на прогнозний період. Оскільки на цей час не існує загальноприйнятої процедури прогнозування геологічних процесів, продовження рядів проводили такими способами: за допомогою функції прогнозування predict у середовищі MathCAD, із використанням аналізу Фур'є (продовженням ряду з урахуванням всіх гармонічних складових, одержаних перетворенням Фур'є, і виділенням та екстраполяцією складових із найбільшим енергетичним внеском у загальну суму), за допомогою штучних нейронних мереж.

Результати прогнозування – екстрапольовані прогнозні ряди ймовірності інтегрального показника (забезпеченості середньорічного положення рівня ґрунтових вод) для окремого гідрогеологічного району, одержані за різними методами, показано на рис. 3. З огляду на тривалість фактичних рядів рівнів ґрунтових вод у 38 років (1971–2008) та інтегральних показників у 32 роки (1971–2002), прогноз складено на 15 років (близько 1/2 тривалості ряду інтегральних показників), тобто по 2017 р. Похибка в часі визначається де-

тальністю часових рядів і за річного кроку становить  $\pm 1$  рік.

Якість запропонованої методики прогнозу оцінено у відповідності до прийнятих критеріїв надійності гідрогеологічних прогнозів [1, 2, 4]. За ймовірну помилку отриманих прогнозів прийнято довірчий інтервал, який визначено з урахуванням оцінки перевірних прогнозів:

$$R = \frac{S_y \cdot t(\gamma, n)}{\sqrt{N}}, \quad (2)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum (y_i, \phi - y_{i, n})^2}{N}}, \quad (3)$$

де  $R$  – радіус довірчого інтервалу;  $S_y$  – середньоквадратична похибка перевірних прогнозів;  $y_i, \phi$  – фактичні значення положень рівня;  $y_{i, n}$  – прогнозні значення положень рівня;  $N$  – кількість перевірних прогнозів;  $t(\gamma, n)$  – таблична величина функції розподілу Стюдента.

У відповідності до існуючих критеріїв якості та надійності гідрогеологічного прогнозування, запропонована методика прогнозу зміни рівнів ґрунтових вод з використанням інтегрального показника може бути оцінена як “задовільна” і “добра” (для різних гідрогеологічних районів), що є допустимим для складання довгострокових прогнозів.

Незалежна перевірка якості методик екстраполяції часових рядів є одним із найважливіших завдань під час прогнозування. Часто з цією метою використовують алгоритм кросс-перевірки, який полягає в тому, що перед проведенням аналізу вихідний часовий ряд вкорочують на 7–10 %, закінчення ряду зберігають для подальшого аналізу. Після цього будують прогноз “скороченого” ряду, а результат порівнюють із відкладеними даними. Візуальній аналіз зі зміщенням прогнозу на декілька кроків назад не досить чіткий із математичної точки зору, але достатньо наглядний.

Під час проведення цього дослідження кросс-перевірка була здійснена зіставленням результатів екстраполяції рядів інтегральних показників і фактичних значень забезпеченості рівнів ґрунто-

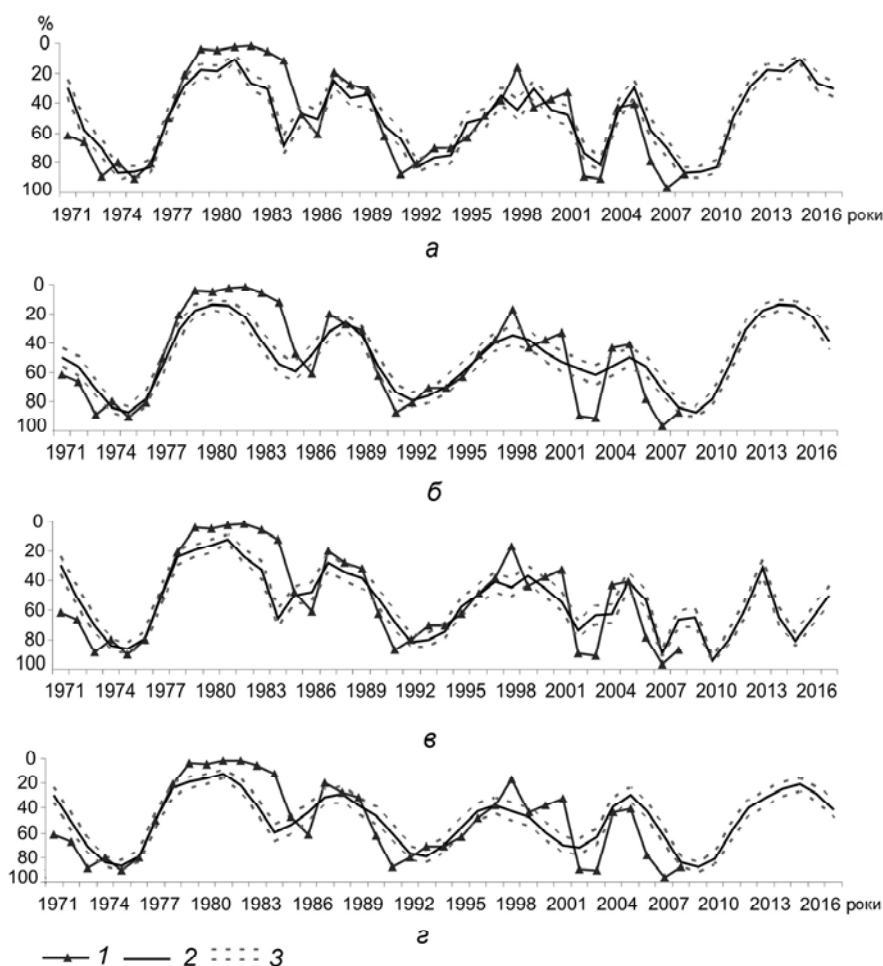


Рис. 3. Екстрапольовані ряди забезпеченості положення рівня ґрунтових вод для гідрогеологічного району І з використанням різних процедур екстраполяції: а – повним рядом Фур'є; б – основними гармонічними складовими ряду Фур'є; в – за допомогою функції predict; г – за допомогою нейронних мереж; *забезпеченість глибини залягання ґрунтових вод*: 1 – фактична, 2 – прогнозна; 3 – межі довірчого інтервалу прогнозу

вих вод у період 2003–2008 рр. Отримані прогнозні значення за характером збігаються із реальними даними, про що свідчить їх висока взаємна кореляція (табл. 6).

Результати крос-перевірки, а також той факт, що прогнозні ряди, побудовані за різними методами, збігаються між собою у ритмічності та істотності значень забезпеченості рівнів ґрунтових вод, доводять адекватність застосованих моделей і необхідність урахування результатів прог-

нозу, отриманих за різними процедурами продовження рядів.

Заключним етапом проведеного аналізу є візуалізація результатів довгострокового прогнозу через складання регіональних карт прогнозу забезпеченості глибини залягання рівнів ґрунтових вод з використанням засобів геоінформаційного моделювання (насамперед рангових картограм і картодіаграм) у середовищі інструментальної ГІС MapInfo.

Таблиця 6. Результати крос-перевірки якості екстраполяції часових рядів інтегральних показників

Метод екстраполяції	Коефіцієнти кореляції екстрапольованих рядів інтегральних показників із фактичними рівнями ґрунтових вод гідрогеологічних районів на інтервалі крос-перевірки (2003–2008)					
	I	II	III	IV	V	VI
Повний ряд Фур'є	0,82	0,82	0,87	0,78	0,78	0,85
Основні гармонічні складові ряду Фур'є	0,64	0,92	0,98	0,62	0,85	0,93
З використанням функції predict (середовище MathCAD)	0,77	0,93	0,84	0,59	0,51	0,73
За допомогою нейронної мережі (тришарового перцептрон) у середовищі Statistica	0,78	0,96	0,64	0,66	0,9	0,64

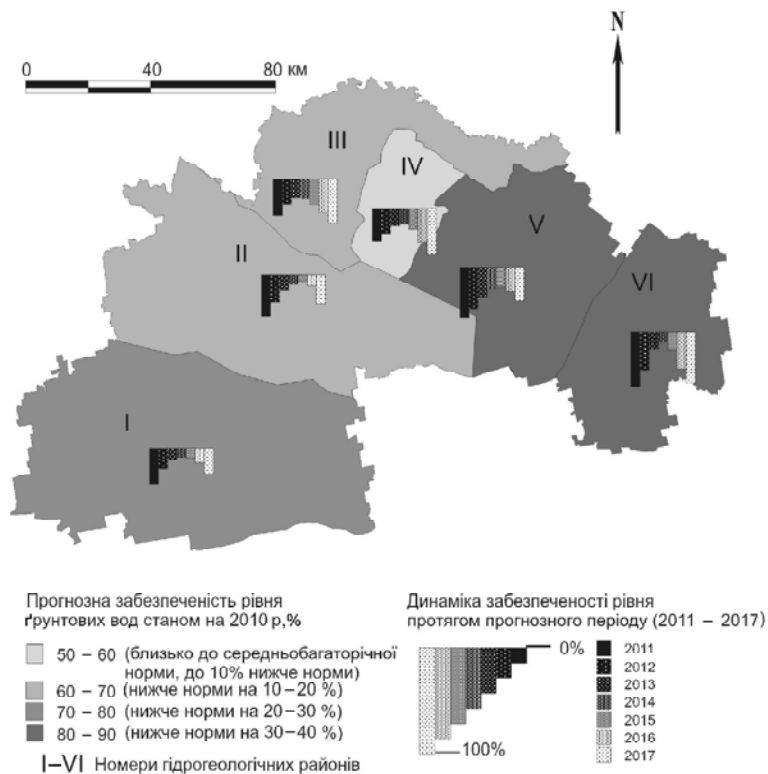


Рис. 4. Синтетична прогнозна модель багаторічної мінливості рівнів ґрунтових вод території Дніпропетровської області

Метод рангових картограм ґрунтується на класифікації виділених районів за заданим атрибутом (забезпеченістю рівнів ґрунтових вод). Райони, що належать до одного класу, виводять на карту однотипно (одним кольором або однаковим штрихуванням). Візуалізація за допомогою картограм природним чином розв'язує проблему зонування території, виділення груп районів із близькими значеннями прогнозного параметра. Картодіаграми відображають розподіл прогнозних даних за допомогою діаграм, локалізованих за виділеними одиницями територіального розподілу.

Побудова синтетичних картографічних моделей з використанням картограм і картодіаграм дає змогу відображати множину прогнозних характеристик на одній карті, а також показувати їх просторово-часовий взаємозв'язок [18]. Створена динамічна геоіконічна прогностична модель (рис. 4) дає наочне відображення територіального розподілу прогнозної забезпеченості рівнів ґрунтових вод станом на 2010 р. та її мінливості протягом визначеного часового інтервалу (2011–2017).

Нижче наведено прогнози гідрогеодинамічного режиму для території Дніпропетровської області:

- для району I після 2010–2011 рр., які характеризуються достатньо значними глибинами залягання рівня ґрунтових вод (20–40 % нижче від багаторічної норми), спостерігатиметься поступове піднімання рівнів до значень забезпеченості 20–40 % вище за норму у 2014–2015 рр., після чого ймовірно деяке зниження

- (до 10 %) положення рівнів у 2016–2017 рр. (до 10 % забезпеченості);

- для району II рівень ґрунтових вод знаходиться на значних глибинах (20–30 % нижче від норми) у 2010–2011 рр., після чого очікується поступове піднімання його до максимального положення у 2015 р. (до 40 % вище норми) та незначне спадання протягом 2016–2017 рр. на 10–20 % забезпеченості;
- для району III після 2010–2011 рр. із глибинами залягання рівнів на 20–30 % забезпеченості нижче норми передбачається незначне піднімання рівня протягом 2012–2014 рр. до глибин, близьких за значенням до середньобогаторічної норми, із подальшим збільшенням глибин залягання рівнів у 2015–2017 рр. до положення 80–95 % забезпеченості (на 30–45 % нижче від норми);
- для району IV прогнозні значення забезпеченості рівнів на 2010–2011 рр. близькі до середньобогаторічної норми (50 % забезпеченості); надалі спостерігатимуться піднімання рівнів (до 30 % забезпеченості) у 2012–2014 рр. і подальше їх спадання у 2015–2017 рр. до положення 60–70 % забезпеченості (10–20 % нижче норми);
- для району V прогнозна забезпеченість рівнів ґрунтових вод у 2010–2011 рр. становила 70–80 % (20–30 % нижче норми), у 2012–2015 рр. передбачається поступове піднімання до значень, що перевищуватимуть норму на 10–20 %, 2016–2017 рр. характеризуватимуться знижен-



ням рівнів до середньобогаторічного положення;

- для району VI період 2010–2011 рр. характеризувався максимальними глибинами (до 30–40 % нижче норми) залягання ґрунтових вод, надалі передбачається різке піднімання рівнів у 2012–2014 рр. до значень, які перевищуватимуть середньобогаторічне положення на 40 %, після чого прогнозується поступове зниження до значень, на 20 % нижчих від норми в 2017 р.

Наведені результати довгострокового прогнозу не суперечать фактичним даним і даним, отриманим за допомогою існуючих методик короткострокового прогнозування (із завчасністю до 1 року), щодо тенденцій зміни рівнів ґрунтових вод на території досліджуваного регіону на період 2008–2011 рр. [19–22], що також підтверджує адекватність побудованих прогностичних моделей.

Запропонована методика дає змогу визначити прогнозну забезпеченість рівня для територій гідрогеологічних районів із однорідним режимом багаторічних коливань рівнів ґрунтових вод екстраполяцією часових рядів інтегрального показника. За допомогою реалізованого алгоритму можна виконувати ретроспективний прогноз на будь-який час у минулому для оцінки його ефективності, проводити нарощування рядів спостережень за рівнем ґрунтових вод, якщо відсутні свердловини-аналоги та репрезентативні спостережні пункти.

**Висновки.** Запропоновано методичний спосіб дослідження часових рядів рівнів підземних вод і режимоутворювальних чинників та виконано його апробацію на прикладі окремих ділянок території Дніпропетровської області, які характеризуються синхронністю багаторічного режиму рівнів ґрунтових вод. Аналіз багаторічних закономірностей природного режиму коливань рівнів ґрунтових вод і режимоутворювальних чинників на території області показав наявність синхронно-зміщеної ритмічності та суттєвого зв'язку між досліджуваними параметрами. Для кожного району розраховано комплексні інтегральні показники. Наявність яскраво вираженої циклічності в рядах інтегральних показників, їх суттєва кореляція з рядами рівнів ґрунтових вод регіону дають змогу виконати екстраполяцію виявлених багаторічних тенденцій на перспективу та скласти довгостроковий прогноз забезпеченості рівнів. Перспективи подальших розробок у цьому напрямі полягають у розробці й створенні ГІС просторово-часового прогнозування та її адаптації для будь-яких територій із застосуванням запропонованого методичного способу досліджень.

1. Рубан С.А. Гідрогеологічні оцінки та прогнози режиму підземних вод України. Монографія / Рубан С.А., Шинкаревський М.А. – К.: УкрДГРІ, 2005. – 572 с.

2. Ковалевский В.С. Исследования режима подземных вод в связи с их эксплуатацией / Ковалевский В.С. – М.: Недра, 1986. – 198 с.
3. Шестопалов В.М. Водообмен в гидрогеологических структурах Украины. Водообмен в естественных условиях / [Шестопалов В.М., Дробноход Н.И., Лялько В.И. и др.]. – К.: Наук. думка, 1989. – 284 с.
4. Коноплянцев А.А. Прогноз и картирование режима ґрунтових вод / А. Коноплянцев, С. Семенов. – М.: Недра, 1974. – 216 с.
5. Методическое руководство по изучению режима подземных вод: [под ред. М.Е. Алтвского и А.А. Коноплянцева]. – М.: Госгеолтехиздат, 1954. – 196 с.
6. Коноплянцев А.А. Естественный режим подземных вод и его закономерности / Коноплянцев А.А., Ковалевский В.С., Семенов С.М. – М.: Госгеолтехиздат, 1963. – 231 с.
7. Давибида Л.І. Оцінка відповідності багаторічних закономірностей коливань рівнів підземних вод критеріям природності режиму (на прикладі спостережних свердловин Дніпропетровської області) / Л.І. Давибида // Збірник наукових праць УкрДГРІ. – 2011. – № 1. – С. 117–127.
8. Давибида Л.І. Дослідження геоінформаційної структури синхронності багаторічного природного режиму рівнів ґрунтових вод як основа підвищення вірогідності довгострокових прогнозів (на прикладі території Дніпропетровської області) / Л.І. Давибида, Е.Д. Кузьменко // Геоінформатика. – 2011. – № 2. – С. 68–80.
9. Ковалевский В.С. Условия формирования и прогнозы естественного режима подземных вод / Ковалевский В.С. – М.: Недра, 1976. – 152 с.
10. Горб А.С. Клімат Дніпропетровської області: Монографія / А. Горб, Н. Дук. – Дніпропетровськ: ВДНУ, 2006. – 204 с.
11. Герман Дж.Р. Солнце, погода и климат / Герман Дж.Р., Голдберг Р.А. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 319 с.
12. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика / [Гавич И.К., Ковалевский В.С., Язвин Л.С. и др.]. – Новосибирск: Наука, 1983. – 241 с.
13. Пігулевський П.Г. Результати моніторингу гідродинамічних параметрів підземних вод в асейсмічних регіонах України (Дніпропетровська область) / П.Г. Пігулевський, В.К. Свистун // Геодинаміка. – 2011. – № 2(11). – С. 241–244.
14. Кендзера А.В. Сейсмологический комплекс для наблюдения и прогнозирования локальных землетрясений в Днепропетровской области / А.В. Кендзера, П.И. Пигулевский, С.В. Щерба, В.К. Свистун // Геодинаміка. – 2011. – № 2(11). – С. 110–112.
15. Закономерная связь между величинами вероятностей возникновения и оползневой опасности при комплексном воздействии природно-техногенных факторов. Научное открытие. Диплом № 310 / Кузьменко Э.Д., Крыжановский Е.И., Карпенко А.Н., Журавель А.М. // Научные открытия: Сборник кратких описаний научных открытий, научных идей, научных гипотез-2006. – М.: МААНОИ, 2007. – С. 64–65.
16. Довгостроковий часовий прогноз розвитку карсту на Передкарпатті / Кузьменко Е.Д., Чепурний І.В., Козак П.І. // Геоінформатика. – 2008. – № 3. – С. 78–85.

17. *Довгостроковий* прогноз рівнів ґрунтових вод у питанні техногенно-екологічної безпеки трубопроводного транспорту / Давибіда Л.І. // *Безпека об'єктів нафтогазового комплексу: Матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. молод. учених і студентів, м. Івано-Франківськ, 5–7 жовт. 2011 р.* – Івано-Франківськ: Вид-во ІФНТУНГ, 2011. – С. 95–107.
18. *Саричева Л.В.* Комп'ютерний еколого-соціально-економічний моніторинг регіонів. Геоінформаційне забезпечення: Монографія / Саричева Л.В. – Дніпропетровськ: Вид-во Нац. гірн. ун-ту, 2003. – 174 с.
19. *Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2008 році.* – К.: ДП «Агентство «Чорнобильінформ»», 2009. – 257 с.
20. *Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2009 році.* – К.: ДП «Агентство «Чорнобильінформ»», 2010. – 252 с.
21. *Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів на території України за даними моніторингу ЕГП.* – К.: Держ. служба геології та надр України; Держ. наук.-виробн. підприємство «Держ. інформ. геол. фонд України», 2011. – 88 с.
22. *Прогноз рівнів ґрунтових вод на території України на 2011 рік.* – К.: Держ. служба геології та надр України, Держ. наук.-виробн. підприємство «Держ. інформ. геол. фонд України», 2010. – 43 с.

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна*

*Надійшла до редакції 26.01.2012 р.*

*Л.І. Давибіда, Е.Д. Кузьменко*

#### **ДОЛГОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИРОДНОГО РЕЖИМА УРОВНЕЙ ГРУНТОВЫХ ВОД НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ ДНЕПРОПЕТРОВСКОЙ ОБЛАСТИ**

Приведена методика исследования природного гидрогеодинамического режима. Осуществлена количественная оценка закономерностей многолетних колебаний уровней грунтовых вод и их связей с отдельными факторами формирования режима. Результаты положены в основу долгосрочного прогноза изменчивости уровней грунтовых вод для гидрогеологических районов исследуемой территории Днепропетровской области, характеризующихся синхронностью многолетнего гидрогеодинамического режима. Построена картографическая региональная модель прогнозной обеспеченности уровней.

**Ключевые слова:** грунтовые воды, факторы формирования режима, долгосрочный прогноз, интегральный показатель.

*L.I. Davybidia, E.D. Kuzmenko*

#### **LONG-TERM FORECASTING OF NATURAL MODE OF WATER-TABLE FLUCTUATION BY EXAMPLE OF THE TERRITORY OF DNIPROPETROVSK REGION**

Given in the paper is a method of research of natural hydrogeodynamic regime. It was made a quantitative estimation of regularity of perennial water-table fluctuations and their intercourses with some factors of mode formation. The results are assumed as a principle of time long-term prediction of water-table fluctuations for hydrogeology districts of explored territory of the Dnipropetrovsk region. They are characterized by synchronous perennial hydrogeodynamic regime. It was built a mapping regional model of forecast supply of the levels.

**Keywords:** groundwater, factors of mode formation, long-term forecast, integral indicator.