

ОЦІНКА ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКОСТІ АРТЕЗІАНСЬКОЇ ВОДИ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ СТАТИСТИЧНОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ

¹Ю. Д. Дрікер, ¹Т. Є. Мітченко, ²З. В. Малецький

¹НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», Київ, Україна.

²Норвезький університет природничих наук, Норвегія, Осло.

* Автор для листування: efim.driker@gmail.com

Реферат

Метою даної роботи є оцінка та прогнозування якості артезіанської води в залежності від глибини свердловини за допомогою дискретизації джерел водопостачання по глибині з подальшим статистичним аналізом. Проби підземних вод були відібрані в рамках проекту ВУВТ «WaterNet» «Карта якості води» в Київській області на протязі 2010-2020 років.

Для аналізу рівня забруднення підземних вод були обрані такі показники якості води як загальна жорсткість, солевміст, кольоровість, вміст заліза, марганцю і нітратів, які є індикаторними для даного регіону. Було виявлено, що такі забруднювачі, як залізо та марганець зустрічаються практично на будь-якій глибині в концентраціях, що перевищують норми для питної води. Проте такі показники якості як нітрати, жорсткість, кольоровість та солевміст перевищують норми тільки в певних діапазонах глибин. Також визначено, що концентрації цих забруднювачів зменшуються зі збільшенням глибини свердловини.

Так, найбільш ймовірно забруднення підземних вод з перевищенням нормативів питної води нітратами на глибині до 27,5 м і солями жорсткості на глибині до 45,5 м. Перевищення нормативу кольоровості води ймовірно на глибині до 12,5 м. А ймовірність надмірного солевмісту підземних вод є тільки на глибині до 27,5 метрів.

Отримані дані можуть бути використані для статистичного моделювання якості підземної води в залежності від глибини і географічних координат свердловини.

Також використання отриманої інформації дозволяє мінімізувати витрати на організацію децентралізованого джерела води питної якості з артезіанської свердловини в конкретному регіоні. Даний аналіз може бути застосовний до будь-якого іншого регіону в Україні, або за її межами.

Ключові слова: підземні води; глибина; нітрати; жорсткість; солевміст; залізо; марганець; Київська область.

Вступ

Україна – одна з найменш забезпечених водними ресурсами країн Європи. У ній на одного жителя припадає 1,2 тис. м³ прісної води в рік (World Bank Group, Renewable internal freshwater resources per capita, 2020), у той час як середній показник по Європі 8,6 тис. м³/рік/люд.

В Україні 75,6% жителів використовують централізоване водопостачання, джерелом якого можуть бути як поверхневі, так і підземні води. У той же час 24,4% населення мають доступ тільки до децентралізованого водопостачання, джерелом якого є виключно підземні води.

В Україні підземні води забезпечують близько 10,31% валових потреб у водних ресурсах (Міністерство розвитку громад та територій України, Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2018 р., 2019). При цьому в західних регіонах частка підземного водопостачання становить 48%, а в центральних 22% (Рис. 1).

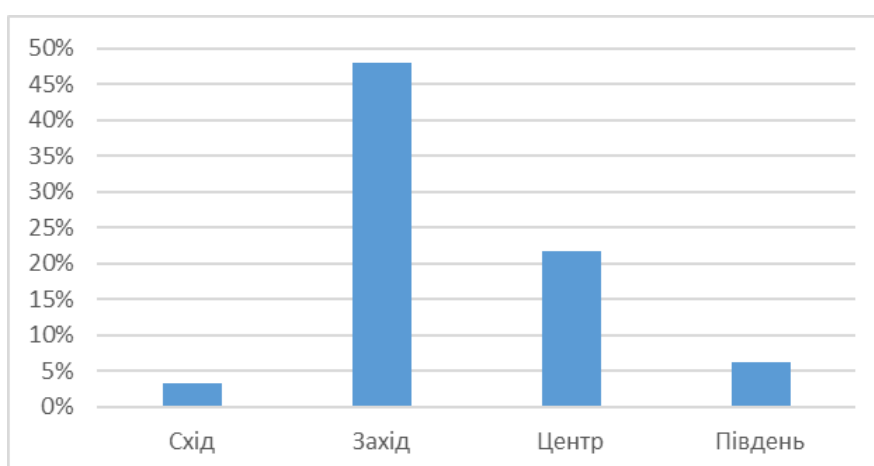


Рис. 1. Частка підземного водопостачання в різних регіонах України¹ (Міністерство розвитку громад та територій України, Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2018 р., 2019)

Загальні прогностичні ресурси підземних вод в Україні становлять 61,7 млн. м³/добу (Міністерство розвитку громад та територій України, Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2018 р., 2019). Розподілені ці ресурси по території країни нерівномірно (рисунок 2а), що визначає різний обсяг їх використання у водопостачанні (рисунок 2б).

¹ Регіони України: центр – Вінницька, Житомирська, Київська, Кіровоградська, Полтавська, Сумська, Хмельницька, Черкаська, Чернігівська області, захід – Волинська, Закарпатська, Івано-Франківська, Львівська, Рівненська, Тернопільська, Чернівецька області, схід – Дніпропетровська, Донецька, Запорізька, Луганська, Харківська області, південь – Миколаївська, Одеська, Херсонська області та АР Крим.

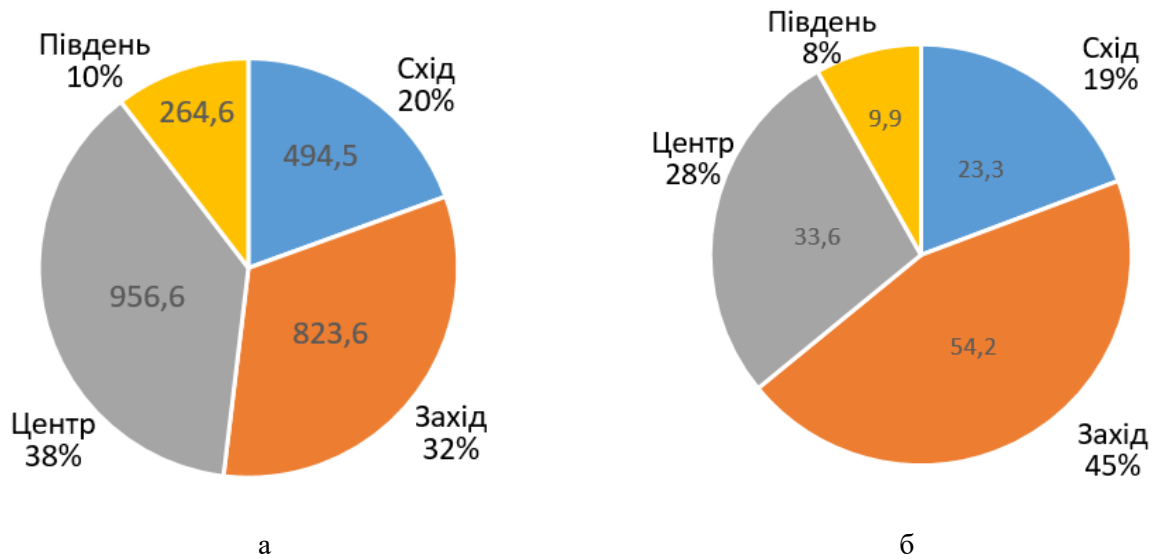


Рис. 2. Кількість і частка прогнозних ресурсів підземних вод (а) і використаних підземних вод (б) на квадратний кілометр території в різних регіонах України, м³/добу/км² (Міністерство розвитку громад та територій України, Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2018 р., 2019).

Так як частка підземного водопостачання суттєва у всіх регіонах, особливий інтерес представляє якість підземних вод і пошук параметрів, які на неї впливають.

В даний час моніторингом якості підземних вод в Україні займається громадська організація ВУВТ «WaterNet». З 2010 року, за допомогою незалежних лабораторій – партнерів проекту, було проведено аналіз близько 47 тисяч проб води з підземних джерел водопостачання.

Хімічний склад підземних вод різноманітний. На нього впливає геологічна природа ґрунту (Yevalla, 2020) і рівень антропогенного впливу на ґрунтові води (Lahermo, 1988), які в свою чергу залежать від глибини свердловини і її геолокації. При цьому, якщо на географічне розташування джерела ми, як правило, не в змозі значно вплинути, то глибина буріння свердловини – параметр, який може бути заданий.

У даній статті представлена оцінка і прогнозування якості артезіанської води в залежності від глибини свердловини за допомогою дискретизації джерел водопостачання по глибині з подальшим статистичним аналізом на прикладі обробки інформації про якість підземних вод Київської області.

Методи дослідження

Для аналізу рівня забруднення підземних вод були обрані такі показники якості води як загальна жорсткість, солевміст, кольоровість, вміст заліза, марганцю і нітратів, які є індикаторними для даного регіону. Всі проби були відібрані згідно ГОСТ 24481 "Вода питна. Відбір проб" в межах київської області, в період з 2010 по 2020 рік.

Аналізи проведені в лабораторіях, акредитованих за стандартами ДСТУ ISO/IEC 17025 та ДСТУ ISO 10012 відповідно до стандартних методів, що наведені в списку літератури (ГОСТ 18164, 1972, ГОСТ 18826, 1973, ГОСТ 3351, 1974, ГОСТ 4011, 1972, ГОСТ 4151, 1972, ГОСТ 4974, 1972).

Показники якості води за вказаними компонентами порівнювалися з вимогами, сформульованими в ДСанПіН 2.2.4-171-10.

Загальний розмір досліджуваної вибірки даних про склад підземних вод Київської області склав 2620, розміри вибірок за показниками представлені на рисунку 3.

Викиди були знайдені і відсіяні за допомогою оцінки коваріації (Рена, 2001). Задана частка викидів становить 2%.

Дані про досліджувані джерела були дискретизовані на 10 типів, в залежності від глибини залягання таким чином, щоб у кожній з груп була максимально близька кількість даних. Таким чином, період дискретизації не є постійним. Він варіюється від 7 до 20 метрів, в залежності від щільності даних.

Середні значення параметрів при різних глибинах залягання порівнювалися за допомогою методу одностороннього дисперсійного аналізу (ANOVA), з використанням рівня значущості 0,1% ($p < 0,001$). Результати статистичного аналізу наведені у вигляді Box-plots².

Статистичний аналіз проводився з використанням програмного забезпечення Orange версії 3.26.

² Box-plots – графік, який використовується в описовій статистиці, компактно зображає одномірний розподіл. Межами прямокутника служать перший і третій квартилі (25-й і 75-й відсоток вибірки), лінія в середині прямокутника – медіана (50-й відсоток). Кінці ліній над і під прямокутником – краї статистично значущої вибірки (без викидів).

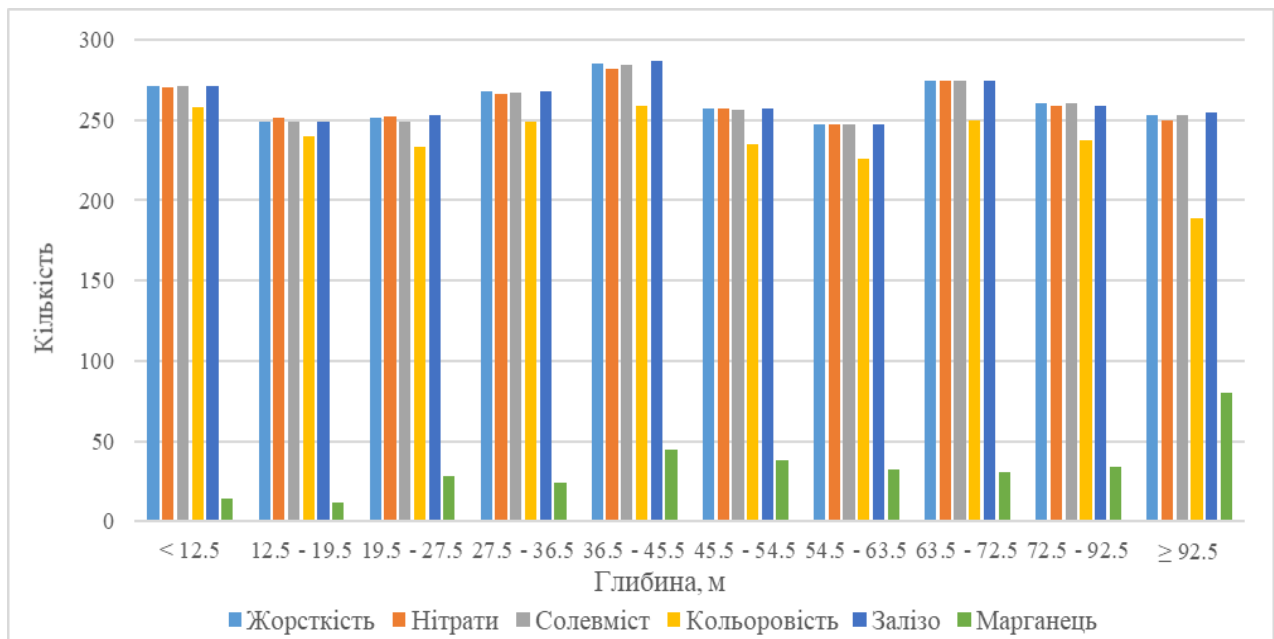



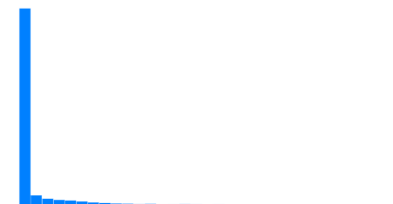
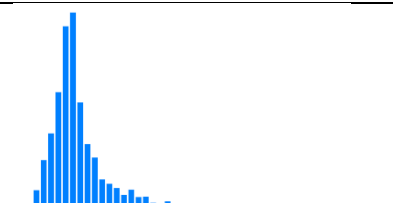
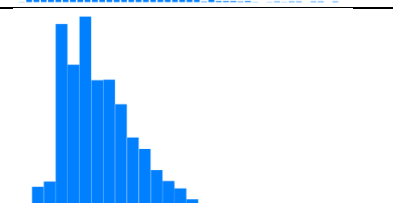
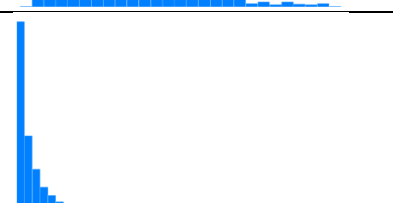
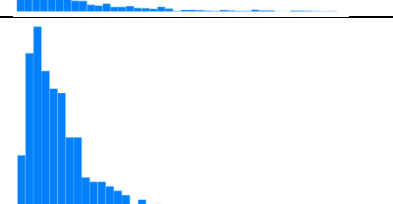
Рис. 3. Обсяг вибірки за різними показниками для різних проміжків глибини залягання свердловини.

Результати та обговорення

У таблиці 1 представлена описова статистика досліджуваних даних. Можемо відзначити, що тільки у деяких показників розподіл значень (на всьому діапазоні глибин) близький до нормального розподілу, а саме у жорсткості, загального солевмісту і, в меншій мірі, у кольоровості.

Як видно з рисунку 4 переважну частину даних складають проби води, відібрані з свердловин глибиною від 5 до 90 метрів. Максимальна глибина свердловини в представленому наборі даних становить 210 метрів.

Таблиця 1. Описова статистика досліджуваних даних

Показник	Розподіл даних	Дисперсія	Мінімум	Максимум
Жорсткість загальна, ммоль/дм ³		9,188	1,1	18,8
Нітрати, мг/дм ³		2141,2	0,6	277,0
Солевміст, мг/дм ³		63242	48,0	2176,0
Кольоровість, град.		63,85	1,1	53,6
Залізо загальне, мг/дм ³		1,807	0,010	8,140
Марганець, мг/дм ³		0,016	0,01	0,8

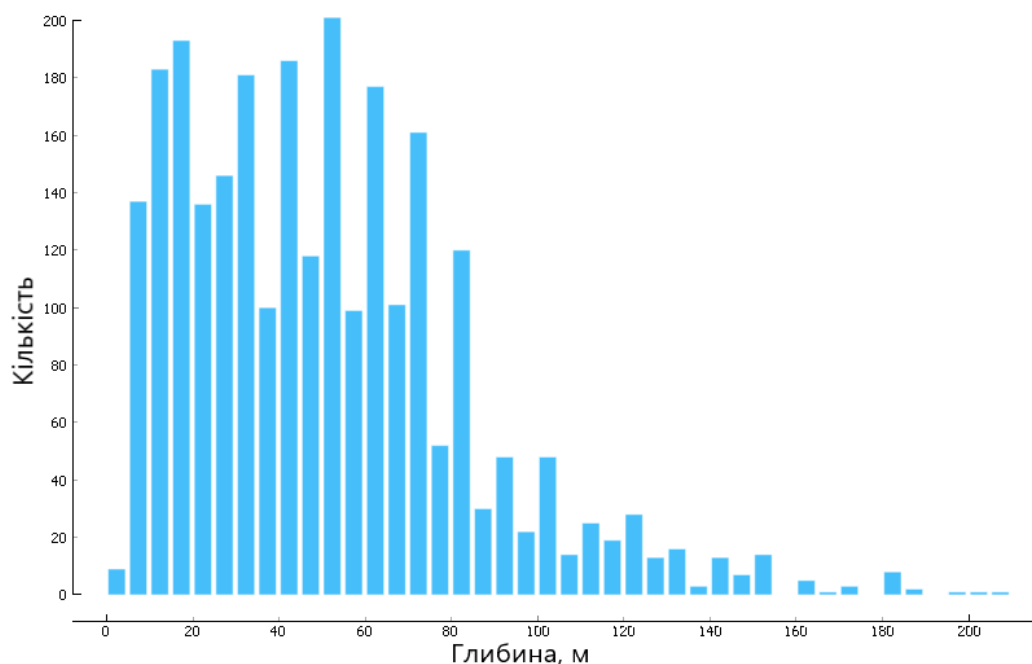


Рис. 4. Діаграма розподілу кількості джерел підземних вод по глибині.

Для аналізу взаємозв'язків між параметрами в досліджуваних даних наведемо крос-кореляцію (Таблиця 2). Як видно з таблиці 2 існує зв'язок між глибиною свердловини і показниками якості води. Найбільш тісний зв'язок між глибиною і змістом нітратів, загальною жорсткістю і солевмістом.

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів кореляції параметрів якості підземних вод і глибини свердловини

Показник	Глибина	Жорсткість	Солевміст	Кольоровість	Нітрати	Марганець	Залізо
Глибина	1	-0,26	-0,217	-0,125	-0,278	-0,094	-0,048
Жорсткість	-0,26	1	0,823	-0,041	0,684	0,029	-0,013
Солевміст	-0,217	0,823	1	0,001	0,646	0,016	-0,013
Кольоровість	-0,125	-0,041	0,001	1	-0,015	0,004	0,167
Нітрати	-0,278	0,684	0,646	-0,015	1	0,015	-0,093
Марганець	-0,094	0,029	0,016	0,004	0,015	1	0,079
Залізо	-0,048	-0,013	-0,013	0,167	-0,093	0,079	1

Таким чином дані таблиць 1 і 2 та рисунків 5-10 показують, що ми можемо оцінювати вплив глибини свердловини на показники якості, а також прогнозувати яким буде склад води на певній глибині залягання.

Самий вагомий вплив глибини залягання свердловини на якість підземних вод відстежується для такого параметра як вміст нітратів (Рис. 5). Якщо в неглибоких свердловинах (до 27,5 метрів) середнє значення вмісту нітратів перевищує норматив для питної води (50 мг/дм³), то вже нижче глибини 36,5 метрів всі значення концентрації нітратів не перевищують 15

мг/дм³. На всьому відрізку значень вміст нітратів знижується зі збільшенням глибини залягання свердловини, що підтверджує існуючі міркування про антропогенну природу даного забруднювача (Donoso, 1999).

Якщо говорити про показник «загальний солевміст», то він також має тенденцію до зменшення зі збільшенням глибини залягання свердловини (Рис. 6). Однак перевищення нормативу (1000 мг/дм³) спостерігається тільки в невеликій кількості статистично значимих значень в межах глибин до 27,5 метрів.

Жорсткість підземних вод також зменшується з глибиною залягання свердловини (Рис. 7). Якщо в діапазонах до 12,5; 12,5-19,5; 19,5-27,5 м. верхній кuartиль знаходиться на рівні до 10,5-11,5 ммоль/дм³, то нижче 45,5 метрів він знаходиться на рівні 7 ммоль/дм³ і нижче.

Кольоровість підземних вод зменшується в діапазоні до 27,5 метрів (Рис. 8). Уже після 12,5 метрів верхній кuartиль знаходиться нижче нормативну (20 град.).

Вміст заліза навпаки спочатку підвищується зі збільшенням глибини до 36,5 метрів, де спостерігаються максимальні його значення, а далі зменшується (Рис. 9). При цьому велика частина значень на всьому проміжку вимірювань значно перевищує встановлений норматив (0,2 мг/дм³).

Вміст марганцю також, як правило, перевищує норму (0,05 мг/дм³) на всьому діапазоні зміни глибини і також спочатку підвищується зі збільшенням глибини до 36,5 метрів, а далі знижується (Рис. 10).

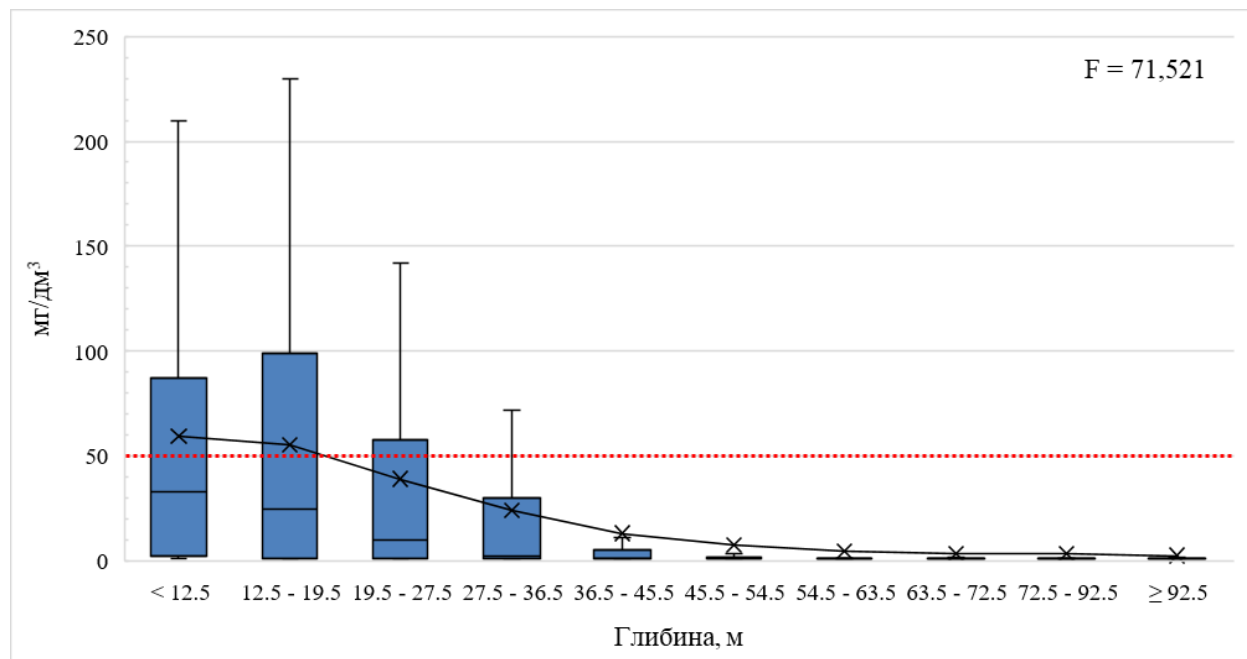


Рис. 5. Вміст нітратів в підземних водах на різній глибині.

... – нормативне значення згідно ДСанПіН 2.2.4-171-10;

F – значення критерію Фішера, розраховане за методом ANOVA.

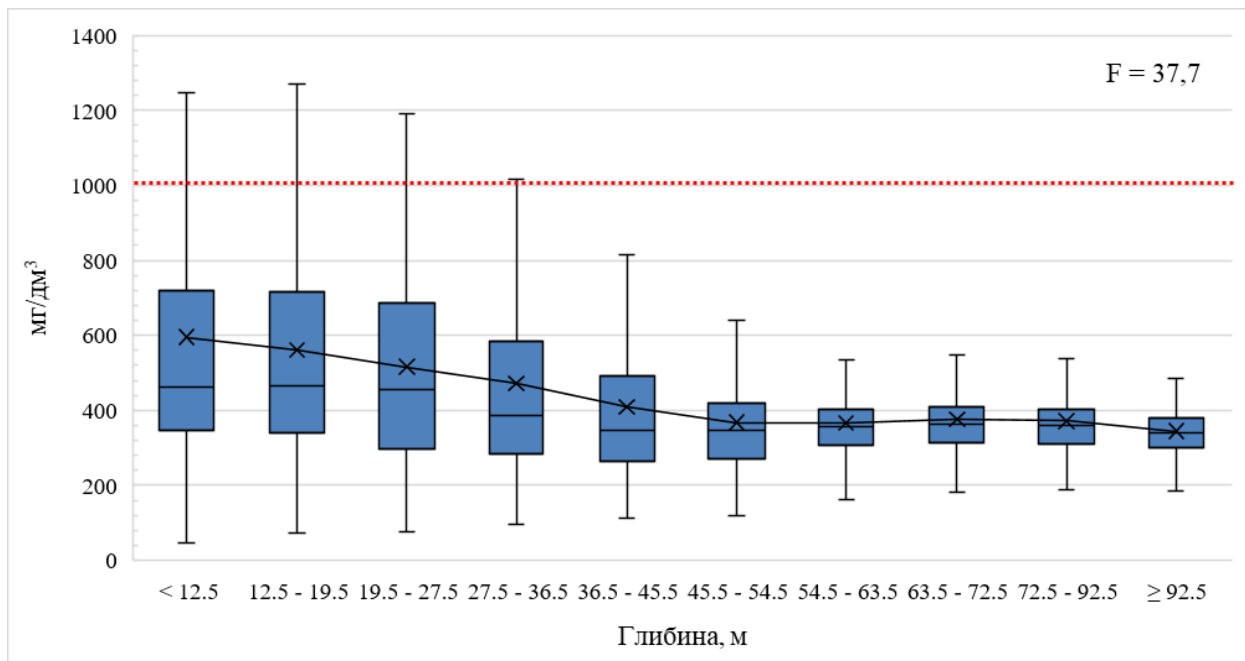


Рис. 6. Солевміст підземних вод на різній глибині.

... – нормативне значення згідно ДСанПіН 2.2.4-171-10;

F – значення критерію Фішера, розраховане за методом ANOVA.

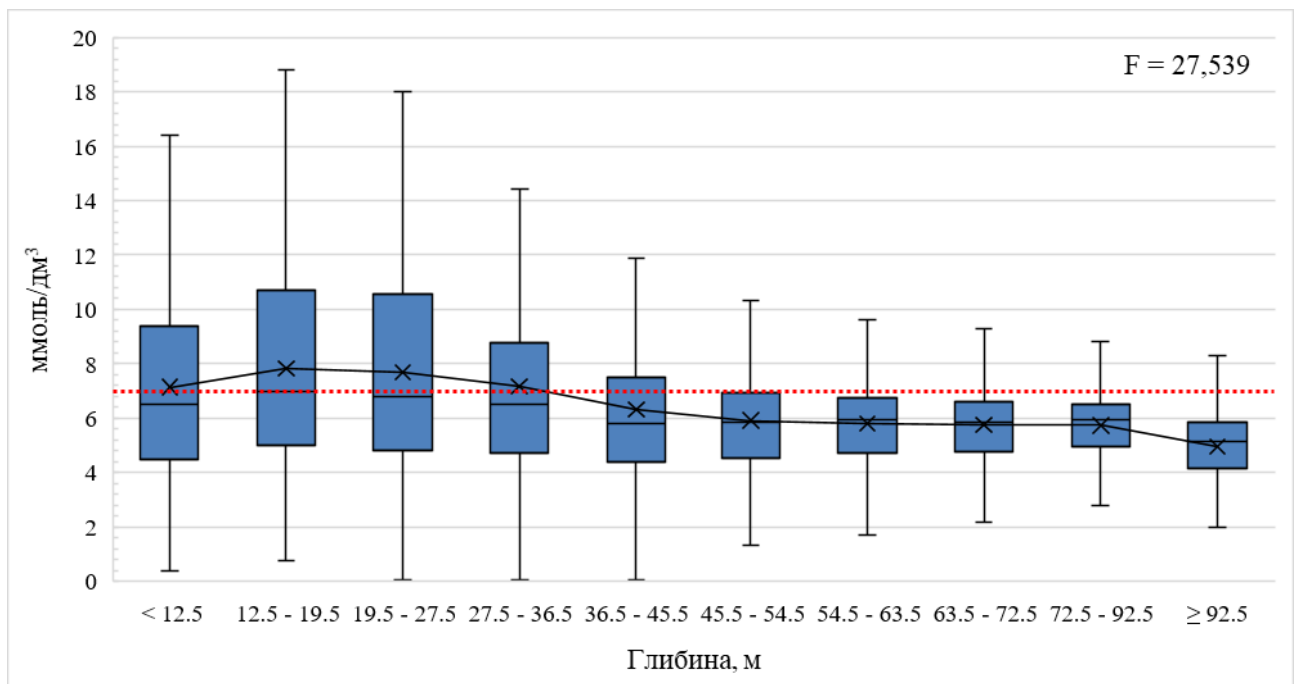


Рис. 7. Жорсткість підземних вод на різній глибині.

... – нормативне значення згідно ДСанПіН 2.2.4-171-10;

F – значення критерію Фішера, розраховане за методом ANOVA.

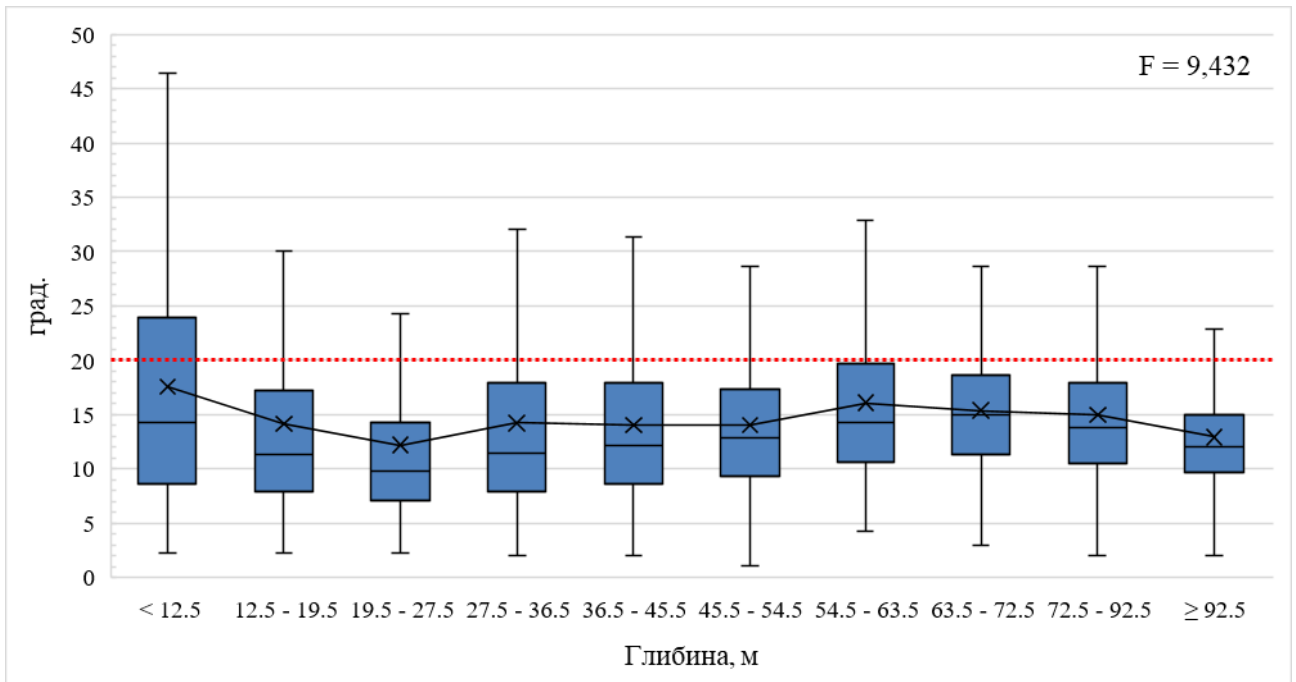


Рис. 8. Колірність підземних вод на різній глибині.

... – нормативне значення згідно ДСанПіН 2.2.4-171-10;

F – значення критерію Фішера, розраховане за методом ANOVA.

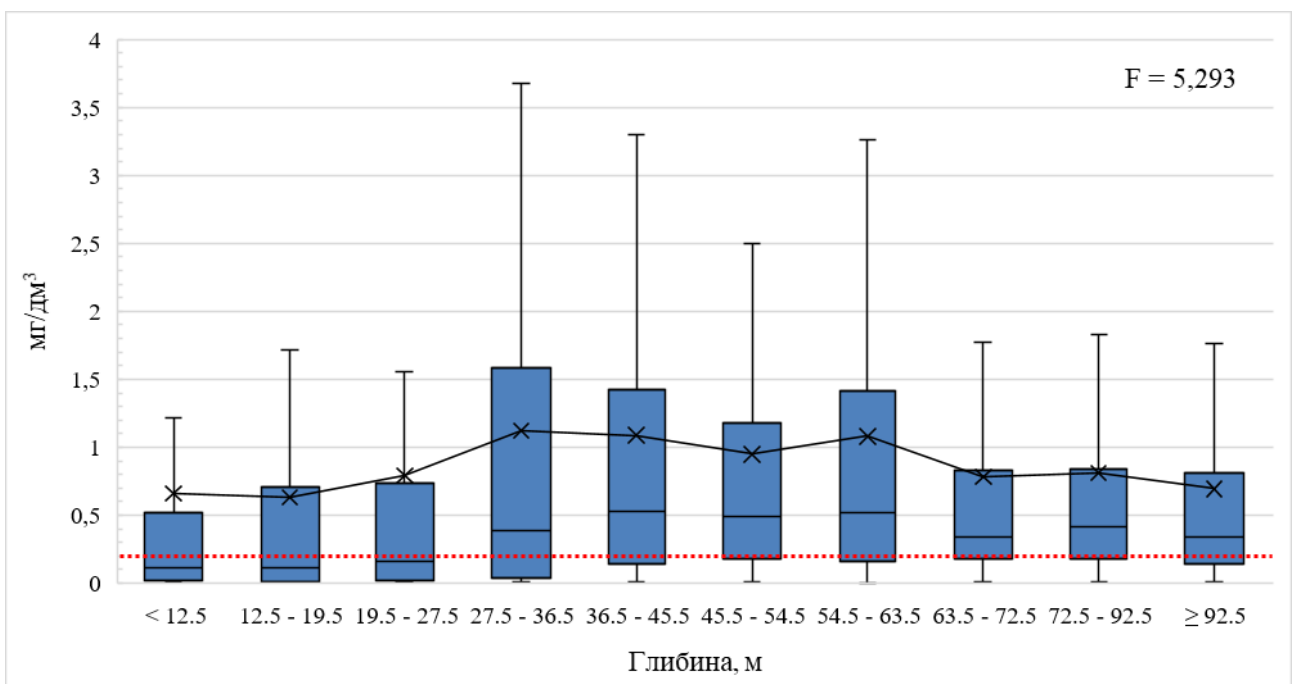


Рис. 9. Вміст заліза в підземних водах на різній глибині.

... – нормативне значення згідно ДСанПіН 2.2.4-171-10;

F – значення критерію Фішера, розраховане за методом ANOVA.

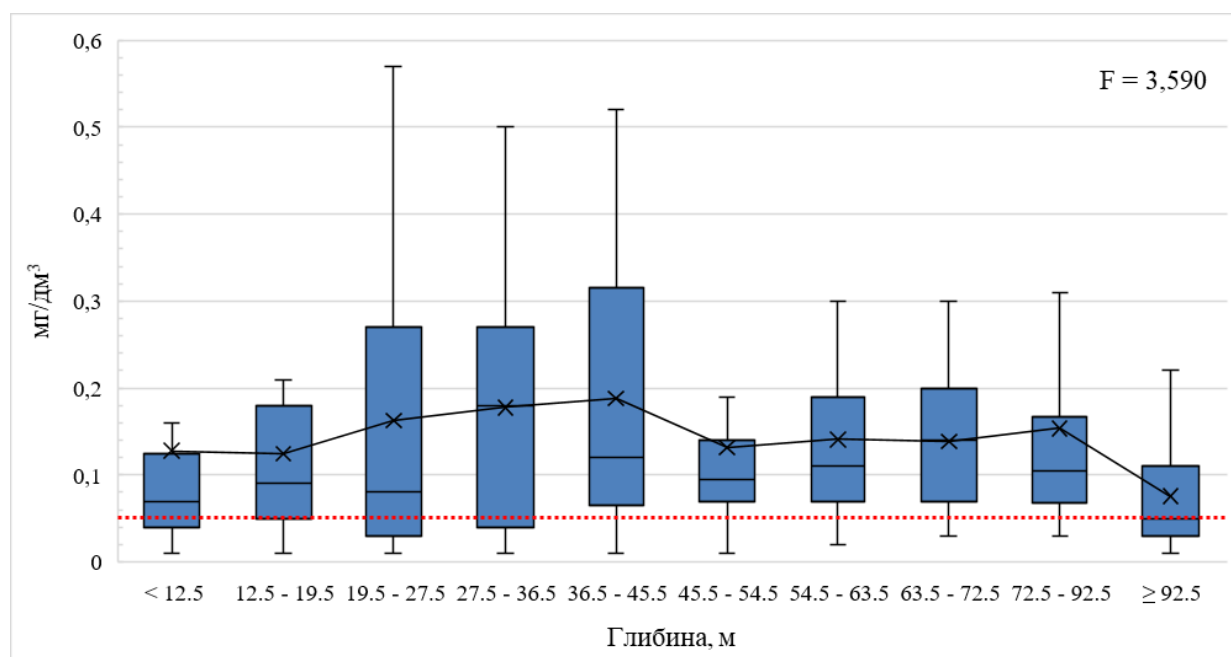


Рис. 10. Вміст марганцю в підземних водах на різній глибині.

... – нормативне значення згідно ДСанПіН 2.2.4-171-10;

F – значення критерію Фішера, розраховане за методом ANOVA.

Аналіз рисунків 5-10 показав, що якщо такі забруднювачі як залізо і марганець зустрічаються в концентраціях, що перевищують норми для питної води практично на будь-якій глибині, то інші досліджувані показники перевищують норми тільки в певних діапазонах глибин.

Таким чином, коли стоїть завдання знайти джерело максимально чистої і придатної для пиття води в конкретному регіоні, або ж мінімізувати експлуатаційні витрати на подальшу водопідготовку необхідно враховувати вплив глибини залягання свердловини на параметри якості підземної води.

Для диференціальної оцінки якості артезіанських вод на різній глибині ми пропонуємо бальну систему, яка представлена в таблиці 3.

Таблиця 3. Бальна система диференціальної оцінки забруднення підземних вод

Бал	Характеристика
0	100% значень показника якості нижче норми для питної води
1	75-100% значень показника якості нижче норми
2	50-75% значень показника якості нижче норми
3	25-50% значень показника якості нижче норми
4	0-25% значень показника якості нижче норми
5	100% значень показника якості вище норми

Таким чином сума балів за всіма показниками на певній глибині (Таблиця 4) характеризує загальну якість артезіанської води на даній глибині за всіма показниками і чим нижче значення цієї величини, тим якість води вище.

Таблиця 4. Диференціальна оцінка забруднення підземних вод на різній глибині

Показник	Глибина, м									
	< 12.5	12.5	19.5	27.5	36.5	45.5	54.5	63.5	72.5	≥ 92.5
		-	-	-	-	-	-	-	-	
		19.5	27.5	36.5	45.5	54.5	63.5	72.5	92.5	
Нітрати	2	2	2	1	0	0	0	0	0	0
Солевміст	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Кольоровість	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Жорсткість	2	3	2	2	2	1	1	1	1	1
Марганець	3	4	3	3	4	4	4	4	4	2
Залізо	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
Загальна оцінка	12	13	11	11	10	9	9	9	9	7

Відповідно до результатів наших досліджень використання артезіанської води з будь-якого рівня залягання в якості питної передбачає її обов'язкове очищення до встановлених вимог на локальних установках. Стадійність, а отже, і ціна установок очищення залежить від ступеня забруднення води. При цьому для очищення води, якість якої оцінюється 11-13 балами, необхідно використовувати 3-х стадійну установку очищення води, що включає стадію іонного обміну, для видалення нітратів та стадії часткової демінералізації зворотньоосмотичним методом і очищення від іонів жорсткості, заліза і марганцю на комплексній фільтруючому завантаженні Екомікс. У той же час вода з оцінкою 7-10 балів може бути очищена до рівня питної на одностадійній установці Екомікс, що істотно зменшує як капітальні, так і експлуатаційні витрати.

Аналіз даних, представлених в таблиці 4, показав, що в київській області оптимальна якість води спостерігається при глибині залягання свердловини – 45,5 метрів і нижче. Подальше збільшення глибини не призводить до поліпшення якості води аж до 92,5 метрів, проте буріння свердловини на велику глибину призводить до істотного зростання капітальних витрат і може бути нераціональним. У той же час підготовка води, що надходить з більш високих рівнів, вимагає великих витрат.

Висновки

Підземні води – значний потенційний ресурс для розвитку децентралізованого водопостачання в Україні, освоєний всього на 4,8% за станом на 2019 рік. Хімічний склад підземних вод залежить від географічного розташування і глибини свердловини, а також обумовлює вибір методів кондиціонування з метою доведення їх якості до вимог нормативів питного водопостачання. Таким чином, в рамках певної території, глибина свердловини є фактором, що чинить вирішальний вплив на собівартість підготовки питної води з підземних джерел.

На прикладі Київської області нами показана можливість оцінки якості підземної води в залежності від глибини свердловини. Нами визначені ймовірності забруднення підземних вод нітратами, солями жорсткості, заліза і марганцю, а також перевищення нормативів за показниками кольоровості і загального солемісту на різній глибині. Так, найбільш ймовірно забруднення підземних вод з перевищенням нормативів питної води нітратами на глибині до 27,5 м і солями жорсткості на глибині до 45,5 м. Забруднення підземних вод солями заліза і марганцю має високу вірогідність в межах всього дослідженого діапазону глибин свердловин – до 210 м. Перевищення нормативу кольоровості води ймовірно на глибині до 12,5 м. Загальний солеміст підземних вод не перевищує нормативу в межах всього вивченого діапазону глибин свердловин.

Отримані дані можуть бути використані для статистичного моделювання якості підземної води в залежності від глибини і географічних координат свердловини.

Також використання отриманої інформації дозволяє мінімізувати витрати на організацію децентралізованого джерела води питної якості з артезіанської свердловини в конкретному регіоні. Даний аналіз може бути застосовний до будь-якого іншого регіону в Україні, або за її межами.

Список літератури

- A. Gonzalez, E. Romero, Fast Transmission of Nitrates into a Detritic Aquifer (Lepe, Huelva, Spain), *Water Science & Technology*, Volume 24, Issue 11, 1991, Pages 211-219. doi: 10.2166/wst.1991.0354
- D. Pena, F. J. Prieto, Multivariate Outlier Detection and Robust Covariance Matrix Estimation, *Technometrics*, Volume 43, Issue 3, 2001, Pages 286-310, doi: 10.1198/004017001316975899

G. Donoso, J. Cancino, A. Magri, Effects of agricultural activities on water pollution with nitrates and pesticides in the Central Valley of Chile, *Water Science & Technology*, Volume 39, Issue 3, 1999, Pages 49–60. doi: 10.2166/wst.1999.0134

P. W. Lahermo, Atmospheric, Geological, Marine and Anthropogenic Effects on Groundwater Quality in Finland. *Water Science & Technology*, Volume 20, Issue 3, 1988, Pages 33-39. doi: 10.2166/wst.1988.0078

World Bank Group, Renewable internal freshwater resources per capita, <https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.INTR.PC> (accessed Sep 1, 2020)

Yevalla, G. et al. Constructing a 3D geological model from geophysical data for groundwater modelling and management in the Kribi-Campo sedimentary sub-basin, Cameroon, *Water Practice and Technology*, Volume 15, Issue 1, 2020, Pages 105-119. doi:10.2166/wpt.2020.004

ГОСТ 18164 "Вода питьевая. Метод определения содержания сухого остатка"

ГОСТ 18826 "Вода питьевая. Методы определения содержания нитратов"

ГОСТ 3351 "Вода питьевая. Методы определения вкуса, запаха, цветности и мутности"

ГОСТ 4011 "Вода питьевая. Методы измерения массовой концентрации общего железа"

ГОСТ 4151 "Вода питьевая. Метод определения общей жесткости"

ГОСТ 4974 "Вода питьевая. Методы определения содержания марганца"

Міністерство розвитку громад та територій України, Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2018 р., 2019, с. 351

References

A. Gonzalez, E. Romero, Fast Transmission of Nitrates into a Detritic Aquifer (Lepe, Huelva, Spain), *Water Science & Technology*, Volume 24, Issue 11, 1991, Pages 211-219. doi: 10.2166/wst.1991.0354

D. Pena, F. J. Prieto, Multivariate Outlier Detection and Robust Covariance Matrix Estimation, *Technometrics*, Volume 43, Issue 3, 2001, Pages 286-310, doi: 10.1198/004017001316975899

G. Donoso, J. Cancino, A. Magri, Effects of agricultural activities on water pollution with nitrates and pesticides in the Central Valley of Chile, *Water Science & Technology*, Volume 39, Issue 3, 1999, Pages 49–60. doi: 10.2166/wst.1999.0134

GOST 18164 "Voda pitevaya. Metod opredeleniya sodержaniya suhogo ostatka" [in Russian]

GOST 18826 "Voda pitevaya. Metodyi opredeleniya sodержaniya nitratov" [in Russian]

GOST 3351 "Voda pitevaya. Metodyi opredeleniya vkusa, zapaha, tsvetnosti i mutnosti" [in Russian]

GOST 4011 "Voda pitevaya. Metodyi izmereniya massovoy kontsentratsii obschego zheleza" [in Russian]

GOST 4151 "Voda pitevaya. Metod opredeleniya obschey zhestkosti" [in Russian]

GOST 4974 "Voda pitevaya. Metodyi opredeleniya sodержaniya margantsa" [in Russian]

Ministerstvo rozvytku gromad ta terytorij Ukrayiny, Nacionalna dopovid proyakist pytnoyi vody ta stan pytnogo vodopostachannya v Ukrayini u 2018 r., 2019, p. 351 [in Ukrainian]

P. W. Lahermo, Atmospheric, Geological, Marine and Anthropogenic Effects on Groundwater Quality in Finland. *Water Science & Technology*, Volume 20, Issue 3, 1988, Pages 33-39. doi: 10.2166/wst.1988.0078

World Bank Group, Renewable internal freshwater resources per capita, <https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2O.INTR.PC> (accessed Sep 1, 2020)

Yevalla, G. et al. Constructing a 3D geological model from geophysical data for groundwater modelling and management in the Kribi-Campo sedimentary sub-basin, Cameroon, *Water Practice and Technology*, Volume 15, Issue 1, 2020, Pages 105-119. doi:10.2166/wpt.2020.004

Received 21.08.2020

Revised 22.09.2020

Accepted 28.09.2020

ASSESSMENT AND FORECASTING OF ARTESIAN WATER QUALITY USING MODERN METHODS OF STATISTICAL DATA PROCESSING

¹*Yu. D. Driker, ¹T. Ye. Mitchenko, ²Z. V. Maletskyi

¹ National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv city, 03056, Ukraine

²Norwegian University of Life Sciences, Norway, Oslo

*Corresponding author: efim.driker@gmail.com

Abstract

The purpose of this study is to assessment and forecasting of artesian water quality, depending on well depth. This was done by discretization water supply sources by depth, followed by statistical analysis. Samples of groundwater were selected by the project Ukrainian Water Society «WaterNet» «Map of water quality» in the Kiev region for the years 2010-2020.

For analysis of the groundwater pollution level were selected following water quality as a total hardness, the salt content, chromaticity, iron, manganese and nitrates. Pollutants such as iron and manganese have been found to occur at virtually any depth in concentrations that exceed the standards for drinking water. However, such quality indicators as nitrates, hardness, color and salt content exceed the norms only in certain ranges of depths. It has also been determined that the concentrations of these pollutants decrease with increasing well depth.

So, the most probable contamination of groundwater with exceeding the standards of drinking water nitrates at a depth of 27.5 m and hardness salts at a depth of 45.5 m. Exceeding the standard of water chromaticity is presumably at a depth of 12.5 m. The probability of excessive salinity of groundwater is only at a depth of 27.5 meters.

Key words: groundwater; depth; nitrates; hardness; salt content; iron; manganese; Kiev region.