УДК 556.3, 556.11, 556.114

Аналіз придатності підземних вод для іригаційних цілей в зоні впливу Каховського водосховища на прикладі Нікопольського району

Романюк І.М., *https://orcid.org/0009-0005-1378-0012, romaniuk@hydrosafe.kiev.ua;*
Колябіна І.Л., *кандидат геол. наук, старший дослідник, https://orcid.org/0000-0002-6120-449, kolira_igns@i.ua;*
Корнієнко Д.І., *danyakornienko2003@gmail.com;*
Інститут геологічних наук Національної Академії Наук України, Київ, Україна,

Метою даної роботи було оцінити придатність підземних вод різних водоносних горизонтів та комплексів для іригаційних цілей в зоні впливу Каховського водосховища на прикладі території Нікопольського району, яка знаходиться в безпосередній близькості від місця підриву та може максимально відчути наслідки руйнування дамби. Для оцінки придатності вод використані найбільш поширені показники *Na%, SAR, MH, PS, K* і *Ka*. Результати показали, що для вод комплексу у неогенових відкладах спостигається скупчення вод низької якості вище за течією біля м. Марганець та нижче за течією від м. Нікополь за такими критеріями: коефіцієнт магнієвої небезпеки *MH*; потенційна солоність *PS*; коефіцієнт шкідливості *K*; іригаційний коефіцієнт *Ka*. Оскільки у дослідженні використані дані, на час початку експлуатації водосховища і вони часткового включають дані що до його створення, то отримані оцінки можуть слугувати базисом для порівняння впливу варіантів стратегій його відновлення (або не відновлення). Для цього необхідно повторити оцінку для даних, отриманих перед підривом дамби та, хоча б частково, на сучасних даних. Води однієї свердловини одного водоносного комплексу за одними критеріями є придатними, за іншими – непридатними. Остаточне рішення щодо придатності має прийматися з урахуванням особливостей сільськогосподарських культур, типу ґрунтів, температурного режиму. Необхідно шукати узагальнений показник, що планується робити у подальшому.

Ключові слова: Каховське водосховище, підземні води, придатність для іригації, іригаційні коефіцієнти

Analysis of Groundwater Suitability for Irrigation in the Kakhovka Reservoir Impact Zone: A Case Study of Nikopol District

Romaniuk Ihor, *https://orcid.org/0009-0005-1378-0012, romaniuk@hydrosafe.kiev.ua;*
Koliabina Iryna, *PhD, Senior Researcher, https://orcid.org/0000-0002-6120-449, kolira_igns@i.ua;*
Korniienko Daniil, *danyakornienko2003@gmail.com;*
Institute of Geological Sciences of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

This study evaluated groundwater suitability for irrigation in the Kakhovka Reservoir impact zone, focusing on Nikopol District - an area near the detonation site highly vulnerable to the dam's destruction. The most commonly used coefficients - *Na%, SAR, MH, PS, K,* and *Ka* - were used to assess water suitability. Results showed that Neogene aquifer waters near Marhanets (upstream) and Nikopol (downstream) accumulated poor-quality water, based on magnesium hazard (*MH*), potential salinity (*PS*), toxicity coefficient (*K*), and irrigation coefficient (*Ka*). As these estimates rely on early and pre-reservoir data, they provide a baseline for comparing recovery (or non-recovery) strategies. However, this assessment must be updated using pre-breach and recent data. Groundwater suitability within a single borehole varies across criteria; thus, final decisions must consider crop, soil, and thermal conditions. Future work will focus on developing a unified composite index.

Keywords: Kakhovka Reservoir, Groundwater, Suitability for irrigation, Irrigation coefficients

Вступ. На території дослідження (а саме в зоні впливу зруйнованого Каховського водосховища) інтенсивно ведеться сільськогосподарська діяльність (як на великих підприємства, так і у приватних садибах), успіхи якої безпосередньо залежать від наявності води для зрошування. Раніше джерелом та гарантом наявності доволі якісної води для зрошування було водосховище. Після його руйнації слід розглянути можливість використання з іригаційною метою саме підземних вод. Особливо це стосується приватних домогосподарств. Для цього необхідно оцінити придатність підземних вод для зрошування. Якість зрошувальної води може впливати на вегетацію, тим самим знижуючи ефективність сільськогосподарського виробництва (Xu et al., 2019; Snousy et al., 2022; Samy et.al. 2023 та

ін.). Метою даної роботи було оцінити придатність підземних вод різних водоносних горизонтів та комплексів для іригаційних цілей в зоні впливу Каховського водосховища на прикладі території Нікопольського району, яка знаходиться в безпосередній близькості від місця підриву та може максимально відчути наслідки руйнування дамби.

Об'єкти та методи дослідження. Основним джерелом даних був звіт (Капинос Н.Н. и др., 1962). Використано дані щодо складу вод 360 свердловин, пробурених на різні водоносні горизонти та комплекси: 182 набори даних для комплексу у четвертинних відкладах (Q_e + Q_{ed}); 77 наборів даних для комплексу у неогенових відкладах (N_2P + N_1S); 20 наборів даних для комплексу у палеогенових відкладах (Pg_3hr + Pg_2b); та 81 набір даних для горизонту у кристалічних породах. Дані включали концентрації основних катіонів (кальцію, магнію, калію та натрію) та основних аніонів (хлоридів, сульфатів, гідрокарбонатів). У цьому дослідженні не використовувались для аналізу величини pH та концентрації потенційних забруднювачів (нітратів, нітритів та ін). У дослідженні використано дані, опубліковані у 1962 році, тобто на час початку експлуатації водосховища і вони, частково, відображають умови його створення, тому отримані оцінки можуть слугувати базисом для порівняння впливу варіантів стратегій відновлення (або не відновлення) водосховища.

Проблема оцінки придатності використання підземних вод для зрошення гостро постає в аридних регіонах, таких як Іран (наприклад, Aghazadeh et al., 2017 та ін.), Нігерія (наприклад, Ikpi et al., 2024 та ін.), Індія (наприклад, Raju, 2007 та ін.), Єгипет (наприклад, Samy et al., 2022 та ін.), Китай (наприклад, Xu et al., 2019 та ін.).З цією метою було розроблено та успішно використовується значна кількість коефіцієнтів (Xu et al., 2019; Samy et al., 2022; Ikpi et al., 2024): *Na%, SAR, RSC, MH, PI, KR, PS* та інші. У даному дослідженні використані лише деякі з них, а саме N*a%* (відсоток натрію, percent sodium), *SAR* (коефіцієнт адсорбції натрію, Sodium Adsorption Ratio,), *PS* (потенційна солоність, potential salinity), *MH* (коефіцієнт магнієвої небезпеки (Magnesium Ratio, Magnesium Hazard), *K* (Коефіцієнт шкідливості, Synthetic Harmful Coefficient) і *Ka* (Іригаційний коефіцієнт, Irrigation Coefficient). Більш детальний опис цих коефіцієнтів та критеріїв оцінки за ними наведені нижче. У подальших викладеннях концентрації всіх компонентів води, які використовуються для обчислення критеріїв використовуються у розмірності мекв/л.

Результати та обговорення. Важливими параметрами для оцінки придатності підземних вод для сільськогосподарського використання є такі показники, як коефіцієнт поглинання натрію (*SAR*), відсоток натрію (*%Na*).

Висока концентрація Na у воді є небажаною через адсорбцію Na на катіонообмінних центрах компонентів ґрунтів , дисперсію ґрунтових агрегатів та зниження проникності ґрунту (Aghazadeh et al., 2017; Xu et al., 2019; Snousy et al., 2022 та ін.). У даному дослідженні для оцінки натрієвої загрози використані два показники: відсоток натрію (percent sodium, %Na) та коефіцієнт адсорбції натрію (Sodium Adsorption Ratio, SAR).

Відсоток натрію (percent sodium, %Na)

Відсоток натрію (*%Na*) обчислюється за формулою (Xu et al., 2019; Snousy et al., 2022; Samy et.al. 2023 та ін.):

$$\%Na = \frac{Na^+ + K^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \times 100$$

Для оцінки якості вод за допомогою коефіцієнту *%Na* використовують наступні критерії (Xu et al., 2019; Snousy et al., 2022; Samy et.al. 2023 та ін.): $\%Na < 20$ – чудова; $20 < \%Na < 40$ – гарна; $40 < \%Na < 60$ – придатна; $60 < \%Na < 80$ – сумнівна; $\%Na > 80$ – непридатна.

Як видно з рис.1(а). більшість вод усіх водоносних комплексів (за винятком водоносного комплексу у палеогенових відкладах, де переважають води сумнівної якості) відносяться до класів «чудова», «гарна» та «придатна», причому два останні класи домінують.

Коефіцієнт адсорбції натрію (Sodium Adsorption Ratio, SAR)

Коефіцієнт адсорбції натрію *SAR* обчислюється за формулою (Xu et al., 2019; Snousy et al., 2022; Samy et.al. 2023 та ін.):

$$SAR = \frac{Na^{+}}{\sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+} / 2)}}$$

Для оцінки якості вод за допомогою коефіцієнту *SAR* використовують наступні критерії (Xu et al., 2019; Snousy et al., 2022; Samy et.al. 2023 та ін.): *SAR* < 10 – чудова; 10 < *SAR* < 18 – гарна; 18 < *SAR* < 26 – сумнівна; *SAR* > 26 – непридатна.

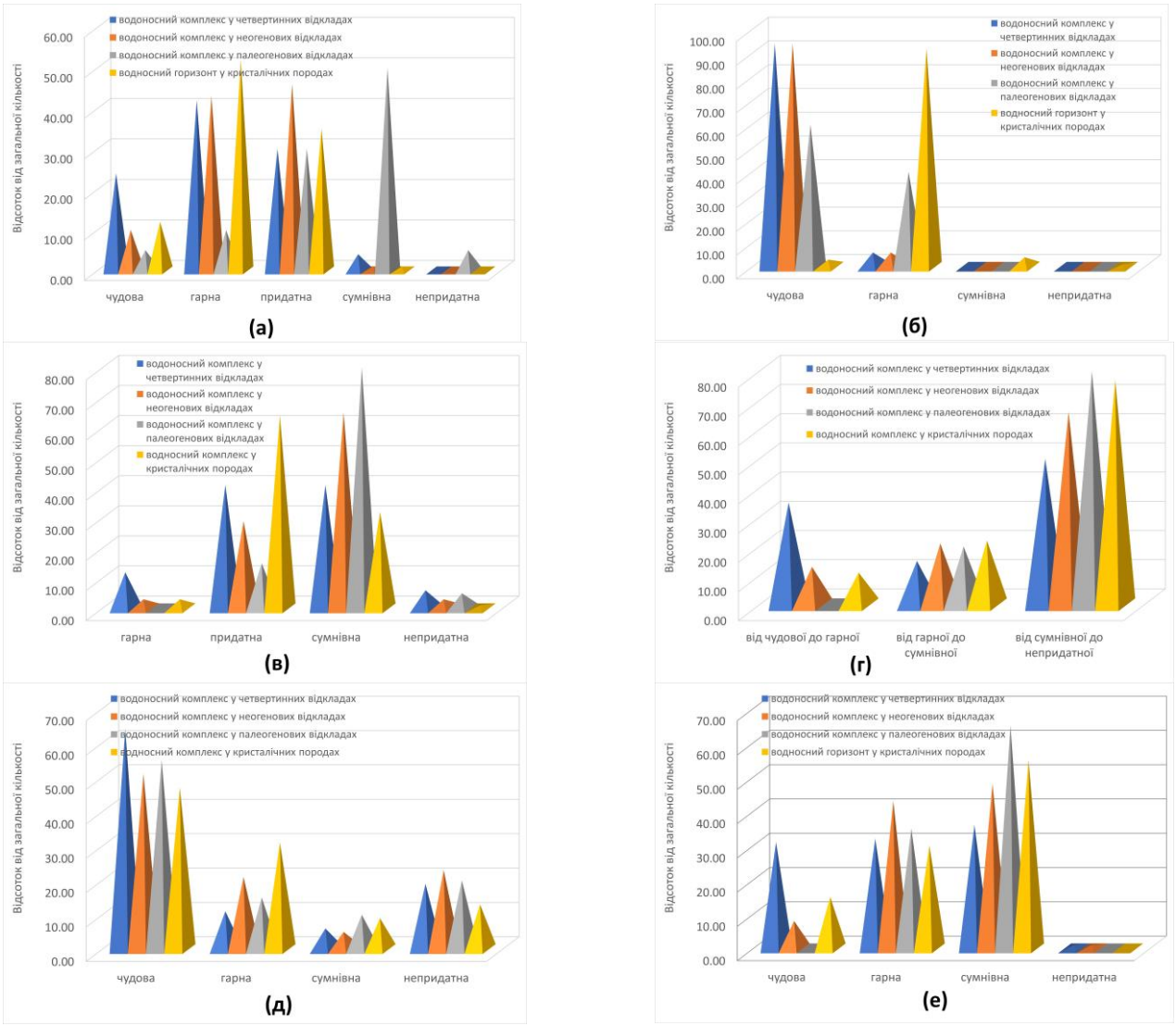


Рис. 1. Розподіл вод водоносних комплексів за якістю: (а) за коефіцієнтом *%Na*; (б) за коефіцієнтом *SAR*; (в) за коефіцієнтом *MH*; (г) за коефіцієнтом *PS*; (д) за коефіцієнтом *K*; (е) за коефіцієнтом *Ka*

Як видно з рис.1(б), більшість вод водоносних комплексів у четвертинних та неогенових відкладах відносяться до класу «чудова». Води водоносного комплексу у палеогенових відкладах відносяться до класів «чудова» та «гарна, а води у кристалічних породах – до класу «гарна».

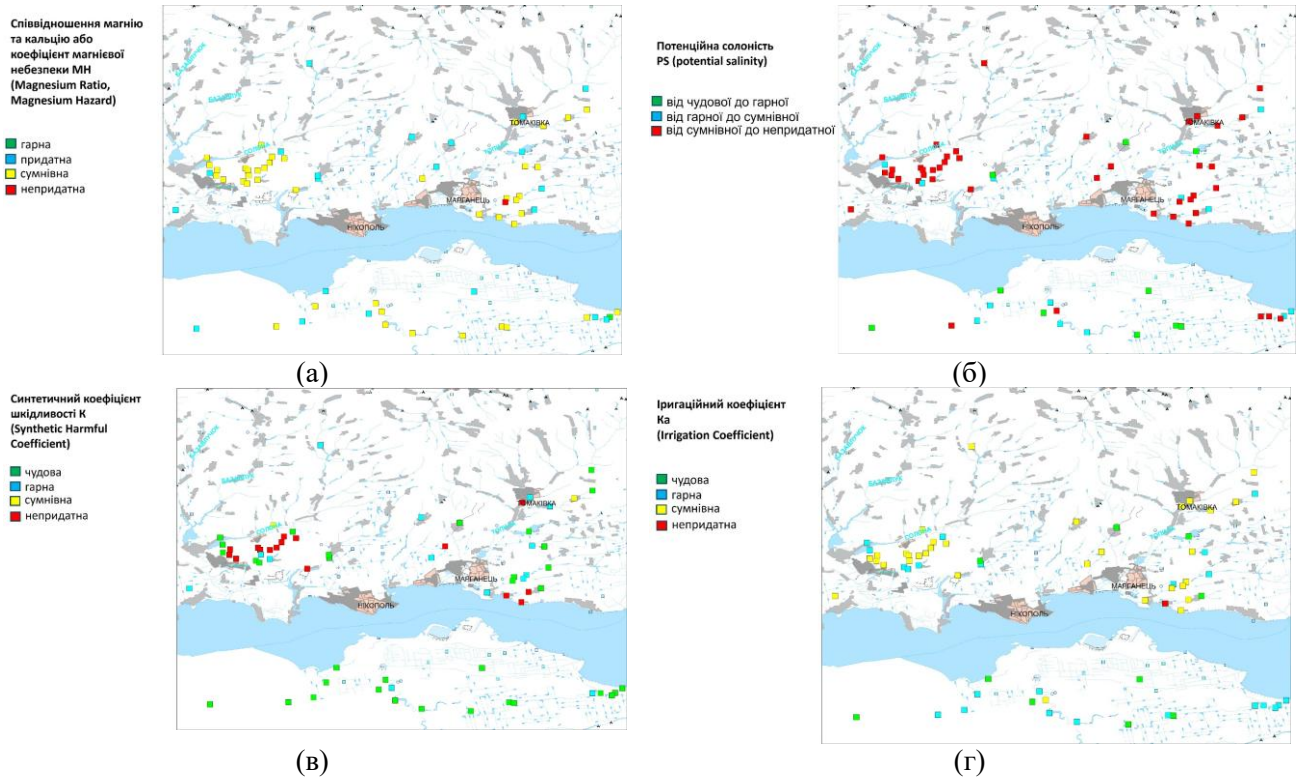
Коефіцієнт магнієвої небезпеки MH (Magnesium Ratio, Magnesium Hazard)

Коефіцієнт *MH* допомагає визначити домінуючий лужноземельний елемент у воді. Зазвичай, кальцій і магній у більшості вод перебувають у стані динамічної рівноваги. При порушенні цієї рівноваги надлишок магнію негативно впливає на врожайність. *MH* вказує на потенційний ступінь пошкодження структури ґрунту, спричиненого магнієм у зрошувальній воді. Високі концентрації Mg^{2+} у ґрунтових водах призводять до збільшення лужності ґрунту. Крім того, велика кількість води адсорбується між частинками магнію та глини, що призводить до зниження проникності ґрунту, а це негативно впливає на врожайність сільськогосподарських культур (Snousy et al., 2022). Коефіцієнт *MH* обчислюється за формулою (Xu et al., 2019; Snousy et al., 2022; Samy et.al. 2023 та ін.):

$$MH = \frac{Mg^{2+}}{Mg^{2+}+Ca^{2+}} \cdot 100$$

Для оцінки якості вод за допомогою коефіцієнту *MH* використовують наступні критерії (Xu et al., 2019; Snousy et al., 2022; Samy et.al. 2023 та ін.): *MH* < 25 – гарна; 25 < *MH* < 50 – придатна; 50 < *MH* < 75 – сумнівна; *MH* > 75 – непридатна.

Як видно з рис.1(в), води гарної якості практично відсутні в усіх розглянутих водоносних комплексах. Основним класами є води придатної та сумнівної якості. У всіх водоносних комплексах є незначна кількість вод непридатної якості (за винятком вод у кристалічних у породах). Аналіз просторового розподілу вод за цим критерієм показав, що для комплексів у четвертинних відкладах та у кристалічних породах не можна виділити чіткої зональності розподілу різних класів вод. Для вод комплексу в неогенових відкладах (рис. 2(а)) спостерігається певне скупчення вод сумнівної якості на правому березі водосховища вище за течією біля м. Марганець та нижче за течією від м. Нікополь.



(а) (б)

(в) (г)

Рис. 2. Просторовий розподіл вод водоносного комплексу у неогенових відкладах: (а) за критерієм *MH*; (б) за критерієм *PS*; (в) за критерієм *K*; за критерієм K_a

Потенційна солоність PS (potential salinity)

Збільшення потенційної солоності (*PS*) є функцією розчиненого хлориду та сульфату (мекв/л) у воді для зрошення. Підвищення величин PS вказує на можливе збільшення осмотичного тиску у ґрунті, що значно впливає на поглинання корінням рослин води з ґрунту та пошкоджує кореневу систему (Xu et al., 2019; Snousy et al., 2022; Samy et.al. 2023 та ін.). *PS* обчислюється наступним чином:

$$PS = Cl^- + 0{,}5 \cdot SO_4^{2-}$$

Для оцінки якості вод за допомогою коефіцієнту потенційної солоності *PS* використовують наступні критерії (Xu et al., 2019; Snousy et al., 2022; Samy et.al. 2023 та ін.).: *PS* < 3.0 – від чудової до гарної; 3.0 < *PS* < 5.0 – від гарної до сумнівної; *PS* > 5.0 – від сумнівної до непридатної.

Як видно з рис.1(г), більшість вод усіх водоносних комплексів відноситься до класу «від сумнівної до не приданої». Ця закономірність дещо порушується у водах четвертинного комплексу, помітна частка яких (35%) відноситься до класу «від чудової до гарної». Аналіз просторового розподілу вод за цим критерієм показав (рис.2(б), що для водоносного комплексу у неогенових відкладів спостерігається певне скупчення вод поганої якості на

правому березі водосховища вище за течією біля м. Марганець та нижче за течією від м. Нікополь. Аналогічний просторовий розподіл спостерігається і для вод у четвертинних відкладах. Для вод горизонту у кристалічних породах закономірності не простежуються.

Коефіцієнт шкідливості K (Synthetic Harmful Coefficient)

Коефіцієнт шкідливості K одночасно враховує сольову та лужну небезпеку (Xu et al., 2019). Він був запропонований Zhou із співавторами у 2009 році та за обчислюється за формуловю:

$$K = 12.4TDS + SAR$$

Де: TDS – загальна концентрація розчинених речовин (total dissolved solids).

Для оцінки якості вод за допомогою синтетичного коефіцієнту шкідливості K використовують наступні критерії (Xu et al., 2019): $K < 25$ – чудова; $25 < K < 36$ – гарна; $36 < K < 44$ – сумнівна; $K > 44$ – непридатна.

Слід зазначити, що результати оцінки за цим методом слід розглядати як консервативні, оскільки він дещо покращує показник якості води (Xu et al., 2019).

Як видно з рис.1(д), більшість вод усіх водоносних комплексів відноситься до класів «чудова» та «гарна». Проте, доволі суттєвий внесок (від 13 до 23%) мають води класу «непридатна», хоча ця оцінка розуміє під собою максимально лояльну оцінку якості. Аналіз просторового розподілу вод показав, що води високої якості зосереджені на лівому березі водосховища. На правому березі більш високої якості води четвертинного водоносного комплексу та комплексу у кристалічних породах більше зосереджені вздовж берегової лінії водосховища. Для комплексу у неогенових відкладах спостигається скупчення вод дуже низької якості вище за течією біля м. Марганець та нижче за течією від м. Нікополь (рис.2(в)).

Іригаційний коефіцієнт Ka (Irrigation Coefficient)

Іригаційний коефіцієнт K_a був запропонований Zhou із співавторами у 2009 році на основі результатів дослідження впливу лужних розчинів та натрієвої солі на 40 видів сільськогосподарських культур (Xu et al., 2019) та обючислюється за формулою:

$$K_a = \begin{cases} \dfrac{288}{5 \times Cl^-} & \text{якщо } Cl^- < Na^+ \\ \dfrac{288}{Na^+ + 4 \times Cl^-} & \text{якщо } Cl^- < Na^+ < Cl^- + 2 \times SO_4^{2-} \\ \dfrac{288}{10 \times Na^+ - 5 \times Cl^- - 9 \times SO_4^{2-}} & \text{якщо } Na^+ > Cl^- + 2 \times SO_4^{2-} \end{cases}$$

Для оцінки якості вод за допомогою іригаційного коефіцієнту K_a використовують наступні критерії (Xu et al., 2019): $K_a > 18$ – чудова; $6 < K_a < 18$ – гарна; $1{,}2 < K_a < 6$ – сумнівна; $K_a > 1{,}2$ – непридатна.

Як видно з рис.1(е), більшість вод усіх водоносних комплексів відноситься до класів «сумнівна» (36-65%) та «гарна» (0-31%). Води непридатної якості в усіх водоносних комплексах відсутні. Аналіз просторового розподілу вод показав, що води високої якості за критеріями K та K_a зосереджені на лівому березі водосховища. На правому березі більш високої якості води четвертинного водоносного комплексу та комплексу у кристалічних породах більше зосереджені вздовж берегової лінії водосховища. Для комплексу у неогенових відкладах спостигається скупчення вод дуже низької якості вище за течією біля м. Марганець та нижче за течією від м. Нікополь (рис.2(в), 2(г)).

Висновки. Встановлено, що для комплексу у неогенових відкладах спостигається скупчення вод низької якості вище за течією біля м. Марганець та нижче за течією від м. Нікополь за такими критеріями: коефіцієнт магнієвої небезпеки *MH* , потенційна солоність *PS*, коефіцієнт шкідливості *K*; іригаційний коефіцієнт K_a. Оскільки у дослідженні використані дані, на час початку експлуатації водосховища і вони часткового включають дані що до його створення, то отримані оцінки можуть слугувати базисом для порівняння впливу варіантів стратегій його відновлення (або не відновлення). Для цього необхідно повторити оцінку для даних, отриманих перед підривом дамби та, хоча б частково, на сучасних даних. Води однієї свердловини одного водоносного комплексу за одними критеріями є придатними, за іншими – непридатними. Остаточне рішення щодо придатності має прийматися з урахуванням особливостей сільськогосподарських культур, типу ґрунтів,

температурного режиму. Необхідно шукати узагальнений показник, що планується робити у подальшому.

Подяки

Робота виконана в рамках договору «Дослідження впливу руйнування Каховської ГЕС та знищення Каховського водосховища на водогосподарський баланс басейну Дніпра».

Список використаних джерел

Капинос Н.Н. Отчёт о геологогидрогеологической съёмке листа L-36-V (Никополь) масштаба 1:200000. Днепропетровск. 1962. (ДНВП "Геоінформ України" Ф. 22361

Aghazadeh, N., Chitsazan, M., & Golestan, Y. (2017). Hydrochemistry and quality assessment of groundwater in the Ardabil area, Iran. *Appl Water Sci.*, 7, 3599–3616. https://doi.org/10.1007/s13201-016-0498-9

Ikpi, G.E., Nganje, T.N., Edet, A., Adamu, C.I., & Eyong, G.A. (2024). Investigation of hydrochemical characteristic, water quality and associated health risks of metals and metalloids in water resources in the vicinity of Akamkpa quarry district, southeastern, Nigeria. *Geochem Trans*., 12, 25(1). https://doi.org/10.1186/s12932-024-00090-y

Raju, N.J. (2007). Hydrogeochemical parameters for assessment of groundwater quality in the upper Gunjanaeru River basin Cuddapah District Andhara Pradesh South India. *Environ Geol*., 52, 1067–1074. https://doi.org/10.1007/s00254-006-0546-0

Samy, A., Eissa, M., & Shahen, S. S. (2024). Solute transport and geochemical modeling of the coastal quaternary aquifer, Delta Dahab Basin, South Sinai, Egypt. *Acta Geochim*., 43, 16–39. https://doi.org/10.1007/s11631-023-00637-3

Snousy, M.G., Wu, J., & Su, F. (2022). Groundwater Quality and Its Regulating Geochemical Processes in Assiut Province, Egypt. *Expo Health*., 14, 305–323. https://doi.org/10.1007/s12403-021-00445-1

Xu, P., Feng, W., Qian, H., Zhang, Q. 2019. Hydrogeochemical Characterization and Irrigation Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Central-Western Guanzhong Basin, China. *Int J Environ Res Public Health*., 16(9), 1492. https://doi.org/10.3390/ijerph16091492

References

Kapinos, N.N. Report on the Geological and Hydrogeological Survey of Sheet L-36-V (Nikopol) at a scale of 1:200,000. Dnipropetrovsk. 1962. (Dnipropetrovsk State Enterprise "Geoinform of Ukraine," File No. 22361) (in Russian)

Aghazadeh, N., Chitsazan, M., & Golestan, Y. (2017). Hydrochemistry and quality assessment of groundwater in Aghazadeh, N., Chitsazan, M., & Golestan, Y. (2017). Hydrochemistry and quality assessment of groundwater in the Ardabil area, Iran. *Appl Water Sci.*, 7, 3599–3616. https://doi.org/10.1007/s13201-016-0498-9

Ikpi, G.E., Nganje, T.N., Edet, A., Adamu, C.I., & Eyong, G.A. (2024). Investigation of hydrochemical characteristic, water quality and associated health risks of metals and metalloids in water resources in the vicinity of Akamkpa quarry district, southeastern, Nigeria. *Geochem Trans*., 12, 25(1). https://doi.org/10.1186/s12932-024-00090-y

Raju, N.J. (2007). Hydrogeochemical parameters for assessment of groundwater quality in the upper Gunjanaeru River basin Cuddapah District Andhara Pradesh South India. *Environ Geol*., 52, 1067–1074. https://doi.org/10.1007/s00254-006-0546-0

Samy, A., Eissa, M., & Shahen, S. S. (2024). Solute transport and geochemical modeling of the coastal quaternary aquifer, Delta Dahab Basin, South Sinai, Egypt. *Acta Geochim*., 43, 16–39. https://doi.org/10.1007/s11631-023-00637-3

Snousy, M.G., Wu, J., & Su, F. (2022). Groundwater Quality and Its Regulating Geochemical Processes in Assiut Province, Egypt. *Expo Health*., 14, 305–323. https://doi.org/10.1007/s12403-021-00445-1

Xu, P., Feng, W., Qian, H., Zhang, Q. (2019). Hydrogeochemical Characterization and Irrigation Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Central-Western Guanzhong Basin, China. *Int J Environ Res Public Health*., 16(9), 1492. https://doi.org/10.3390/ijerph16091492