

МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ ПОЛИВНОЇ ВОДИ ИНГУЛЕЦЬКОЇ ЗРОШУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ В 2021 РОЦІ

МОРОЗОВ О.В. – доктор сільськогосподарських наук, професор
<https://orcid.org/0000-0002-5617-0813>

Херсонський державний аграрно-економічний університет

МОРОЗОВ В.В. – кандидат сільськогосподарських наук, професор
<https://orcid.org/0000-0002-2594-883X>

Херсонський державний аграрно-економічний університет

КОЗЛЕНКО Є.В. – кандидат сільськогосподарських наук
<https://orcid.org/0000-0003-3001-8220>

Інститут зрошувального землеробства

Національної академії аграрних наук України

Постановка проблеми. Ингулецька зрошувальна система (ІЗС) є унікальною за багатьох ознак, у тому числі за технологією формування якості води. На відміну від більшості інших зрошувальних систем, джерело зрошення (річка Ингулець) забруднено внаслідок багаторічного впливу промислових підприємств міста Кривого Рогу. Тому для забезпечення якості поливної води, придатної для зрошення, необхідно здійснювати додаткові інженерно-технічні та меліоративні заходи. З 2011 року необхідна якість поливної води формується шляхом проведення щорічних промивок річки Ингулець водою з Карачунівського водосховища (що поповнюється своєю чергою водою річки Дніпро) з квітня (березня) по серпень (липень).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам якості води Ингулецької зрошувальної системи, її формуванню та придатності для зрошення присвячені дослідження О.М. Алмазова, В.Г. Ткачук, В.В. Морозова, Є.В. Козленка, О.В. Морозова, В.М. Нежлукченка, Є.Г. Волочнюка, П.І. Ковальчука, Р.Ю. Коваленка, В.К. Хільчевського, Р.Л. Кравчинського, О.В. Чунарьова та ін. [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9].

Мета роботи – виявити закономірності та отримати моделі формування мінералізації та гідрохімічного складу зрошувальної води Ингулецького магістрального каналу за 2021 рік.

Матеріали та методика досліджень. У розвідці використані дані досліджень авторів статті, матеріали Управління каналів Ингулецької зрошувальної системи Державного агентства водних ресурсів України.

Методи досліджень: польовий експеримент, лабораторні аналізи води за стандартними методиками, регресійний і кореляційний аналіз, системний підхід і системний аналіз, узагальнення даних, порівняння.

Умови досліджень. Повернення підземних (шахтних) вод, що утворилися внаслідок видобутку залізної руди у Криворізькому басейні, з господарської ланки кругообігу води в природні ланки здійснюється за допомогою технічних споруд і засобів штучно створеного ставка – накопичувача шахтних вод у балці Свистунова шляхом їх скиду у р. Ингулець. Для випусків зворотних вод з оперативним

регулюванням витрат умови скиду зворотних вод встановлюються у формі індивідуальних оперативних регламентів з урахуванням вимог щодо якості води у водному об'єкті у контрольних створах нижче скиду зворотних вод.

Необхідність розробки щорічного індивідуального регламенту скиду зумовлена періодичним характером скиду надлишків зворотних вод (листопад–лютий), зміною обсягів скиду залежно від водогосподарської ситуації на гірничорудних підприємствах, витрат та джерел для розбавлення зворотних вод, фактичної гідрологічної та гідрохімічної ситуації в басейні р. Ингулець тощо.

У разі прийняття рішень щодо регламентованого (дозованого) скидання надлишків зворотних вод у поверхневі водойми слід керуватись критеріями, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності у сфері використання і охорони вод відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України від 27.12.2008 р. № 1139 «Про затвердження критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності у сфері використання і охорони вод та відтворення водних ресурсів і визначається періодичність проведення планових заходів, пов'язаних з державним наглядом (контролем)». Саме до суб'єктів господарювання з високим ступенем ризику належать підприємства з видобування, первинного збагачення та переробки руд, яким належать гідротехнічні споруди (хвостосховища, накопичувачі тощо), господарська діяльність на яких може призвести до аварій на об'єктах підвищеної небезпеки.

Прийняття рішення про регламентоване (дозоване) скидання надлишків зворотних вод у поверхневі водойми потрібно обґрунтувати за такими принципами, як:

– принцип виправданості: зазначений попереджувальний захід повинен бути виправданим, тобто отримана користь для суспільства від відвернутої цим заходом екологічної та економічної шкоди повинна бути більша, ніж сумарний збиток, пов'язаний з його проведенням;

– принцип неперевищення: повинні бути застосовані всі можливі заходи для обмеження негативного впливу на рівні, нижчому за поріг припустимих впливів;

– принцип оптимізації: режим регламентованого (дозованого) скидання надлишків зворотних вод (або комбінація декількох контрзаходів, наприклад часткове розбавлення зворотних вод під час їх скиду), його масштаби та тривалість повинні вибиратися таким чином, щоб різниця між сумарною користю та сумарним збитком була не тільки додатною, але і максимальною.

Об'єктивною підставою, яка будується на наведених принципах, є реальна потреба в проведенні випереджувального регульованого (дозованого) скиду надлишків зворотних вод у міжвегетаційний період у р. Інгулець з метою недопущення переповнення ставка-накопичувача, що, зважаючи на історичний досвід його наповнення, вже призводило до аварійних витоків шахтної води через ложе ставка, задля недопущення припинення відкачки підземних вод у Кривбасі, аварій і надзвичайних ситуацій на об'єктах підвищеної техногенної небезпеки, зупинки роботи шахт і гірничо-збагачувальних комбінатів, втрати значних запасів залізних руд та виникнення низки некерованих техногенних катастроф у регіоні (зсуви, провалля, підняття рівня підземних вод тощо), пов'язаних із затопленням відпрацьованого простору та підземних гірничих виробіток.

На виконання пункту 2 розпорядження Кабінету Міністрів України (КМУ) від 28.12.2020 року № 1670-р «Про запобігання виникненню аварійної ситуації на ставку-накопичувачу, розташованому на території Криворізького району Дніпропетровської області», на підставі гідрологічного прогнозу щодо весняної повені у 2021 році у басейні р. Інгулець, а також протоколу засідання Міжвідомчої комісії з узгодження режимів водосховищ та водогосподарських систем р. Інгулець суббасейну нижнього Дніпра у 2021 році Держводагентством України було затверджено «Регламент промивання русла та екологічного оздоровлення р. Інгулець у 2021 році».

Чинним регламентом передбачалось здійснити промивання річки Інгулець (табл. 1).

Результати досліджень. З метою виявлення особливостей і закономірностей формування гідрохімічного складу зрошувальної води Інгулецького магістрального каналу (ІМК) у 2021 році виконано кореляційний і регресійний аналізи даних.

Модель формування аніонного складу зрошувальних вод. Кореляційно-регресійним аналізом встановлено, що наявний сильний функціональний зв'язок між мінералізацією зрошувальної води та іонами хлору ($r = 0,99$) та сульфат іонами ($r = 0,99$); слабкий – між мінералізацією зрошувальної води та гідрокарбонат-іонами ($r = 0,47$).

Встановлено, що в міру підвищення мінералізації зрошувальної води пропорційно зростає вміст іонів хлору та сульфат-іонів, гідрокарбонат-іони відіграють другорядну роль у формуванні гідрохімічного складу зрошувальної води Інгулецького магістрального каналу. Рівняння регресії, коефіцієнти кореляції наведені на рис. 1.

Аналіз моделі формування гідрохімічного складу зрошувальної води свідчить, що для запобігання перевищенню іонів хлору 350 мг-екв/дм³ та сульфат-іонів 500 мг-екв/дм³ мінералізація зрошувальної води не повинна перевищувати 1500 мг/дм³.

Модель формування катіонного складу зрошувальних вод. Кореляційно-регресійним аналізом встановлено сильний функціональний зв'язок між мінералізацією зрошувальної води та іонами кальцію ($r = 0,92$) та іонами магнію ($r = 99$); слабкий – між мінералізацією зрошувальної води та іонами натрію і калію ($r = 0,02$).

У міру підвищення мінералізації зрошувальної води пропорційно буде зростати вміст іонів магнію та кальцію, іони натрію та кальцію відіграють другорядну роль у формуванні гідрохімічного складу зрошувальної води ІМК. Рівняння регресії, коефіцієнти кореляції наведені на рис. 2.

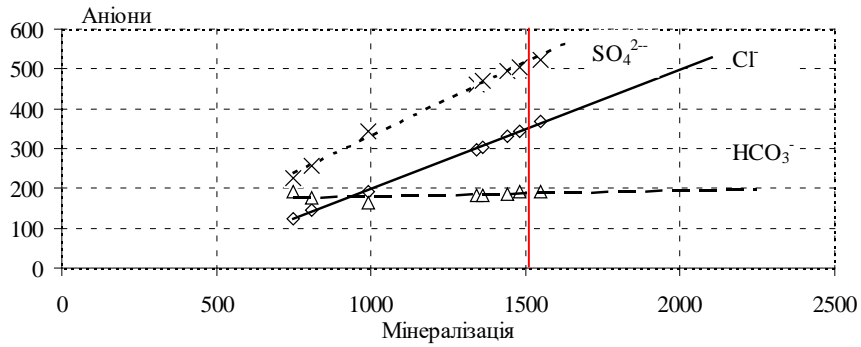
Використовуючи графіки, наведені на рис. 1 та рис. 2 щодо мінералізації поверхневих вод, визначеної за допомогою експрес-аналізу (наприклад, солеміру), можна оперативним чином визначати гідрохімічний склад зрошувальної води в Інгулецькій зрошувальній системі.

В умовах Регламенту промивання русла та екологічного оздоровлення р. Інгулець у 2021 році виявлено особливості і закономірності формування вмісту хлоридів у поверхневих водах р. Інгулець залежно від витрат води (рис. 3, 4).

За результатами кореляційного та регресійного аналізів даних отримана модель формування вмісту

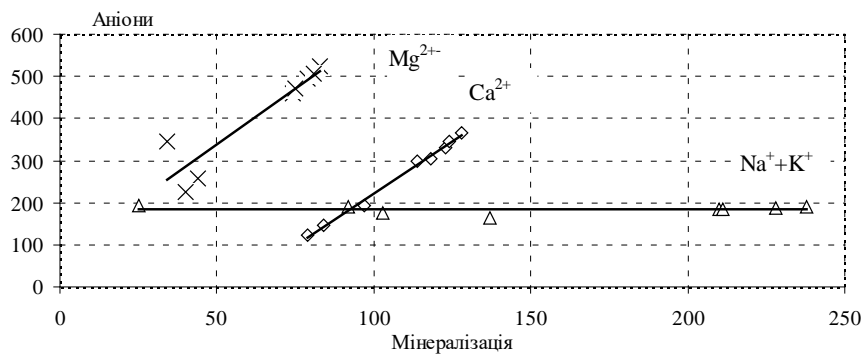
Таблиця 1 – План промивання р. Інгулець та фактичне промивання у 2021 році

Промивання р. Інгулець	
План	Факт
20 березня – поступове збільшення попусків до 20 м ³ /с;	20 березня – поступове збільшення попусків до 20 м ³ /с;
21 березня–13 квітня – 20 м ³ /с;	21 березня–13 квітня – 20 м ³ /с;
14 квітня–31 травня – 11 м ³ /с;	з 25.05. – 9 м ³ /с
1 червня–31 липня – 10 м ³ /с;	
1 серпня–12 вересня – 7 м ³ /с.	
Екологічне оздоровлення р. Інгулець	
13 вересня–20 жовтня – 3,5 м ³ /с.	
Загальний обсяг скиду з Карачунівського водосховища для промивання русла р. Інгулець становитиме 148 млн м ³ .	
Загальний обсяг для екологічного оздоровлення – 12 млн м ³ .	
Загальна розрахункова потреба подачі води становитиме близько 160 млн м ³ .	



Аніони	Рівняння регресії	Коефіцієнт детермінації	Коефіцієнт кореляції
Cl ⁻	$Y = 0,3x - 101,65$	$R^2 = 0,9992$	$r = 0,99$
SO ₄ ²⁻	$Y = 0,3706x - 40,292$	$R^2 = 0,9935$	$r = 0,99$
HCO ₃ ⁻	$Y = 0,0138x + 167,0$	$R^2 = 0,2171$	$r = 0,47$

Рис. 1. Залежність мінералізації та аніонного складу зрошувальної води Інгулецької зрошувальної системи (2021 рік)



Катіони	Рівняння регресії	Коефіцієнт детермінації	Коефіцієнт кореляції
Mg ²⁺	$Y = 5,2704x + 74,012$	$R^2 = 0,8521$	$r = 0,92$
Ca ²⁺	$Y = 4,9546x - 274,08$	$R^2 = 0,9933$	$r = 0,99$
Na ⁺ +K ⁺	$Y = -0,0026x + 184,15$	$R^2 = 0,0004$	$r = 0,02$

Рис. 2. Залежність мінералізації та катіонного складу зрошувальної води Інгулецької зрошувальної системи (2021 рік)

хлоридів у зрошувальній воді залежно від витрат води р. Інгулець (рис. 4). Встановлено сильний функціональний зв'язок між вмістом хлоридів у поверхневих водах р. Інгулець та витратами води (коефіцієнт кореляції (r) 0,85, коефіцієнт детермінації (R^2) 0,728).

У міру збільшення витрат води з Карачунівського водосховища пропорційно зменшується вміст іонів хлору. Для запобігання перевищенню іонів хлору більше 350 мг-екв/дм³ витрати води із Карачунівського водосховища повинні бути не менш ніж 10,0 м³/с (рис. 4).

За результатами кореляційного та регресійного аналізів даних отримана модель формування жорсткості води зрошувальної води залежно від витрат води р. Інгулець (рис. 4, 5).

У міру збільшення витрат води із каналу пропорційно зменшується вміст іонів хлору. Для формування допустимої жорсткості води витрати води із каналу повинні бути не менше ніж 10,0 м³/с (рис. 5, 6).

Добова динаміка хлоридів у р. Інгулець та Інгулецькому магістральному каналі представлена на рис. 7.

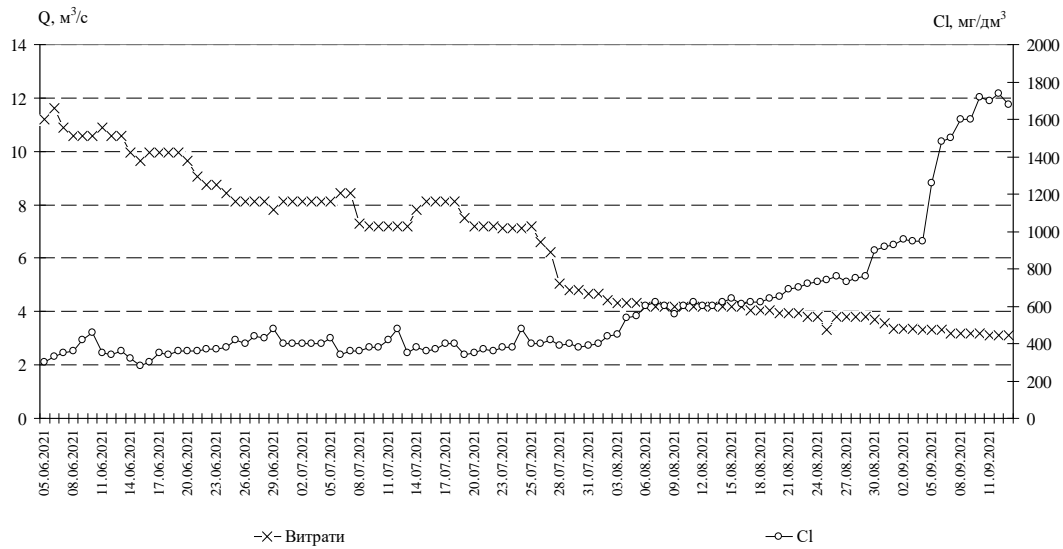


Рис. 3. Добова динаміка витрат води та вмісту хлоридів у поверхневих водах р. Інгулець (гідропост Андріївка, 2021 р.)

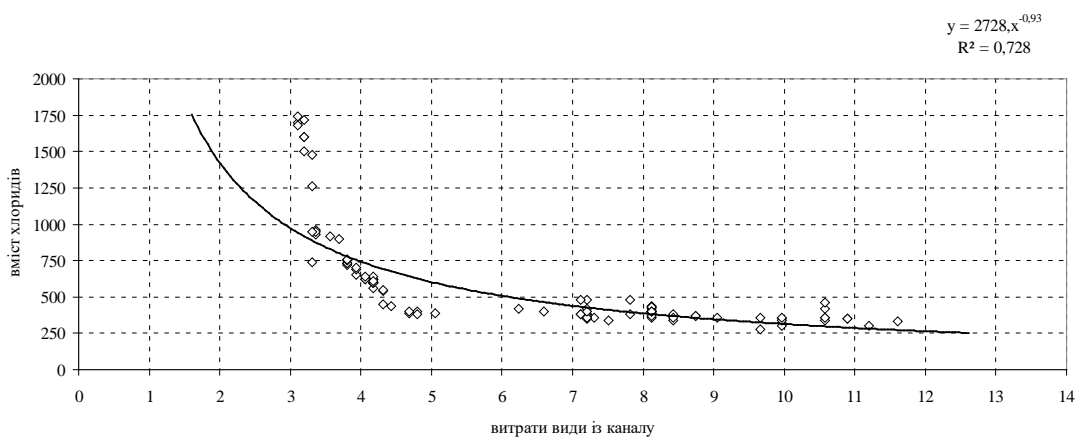


Рис. 4. Залежність вмісту хлоридів від витрат води р. Інгулець (гідропост Андріївка, 2021 р.)

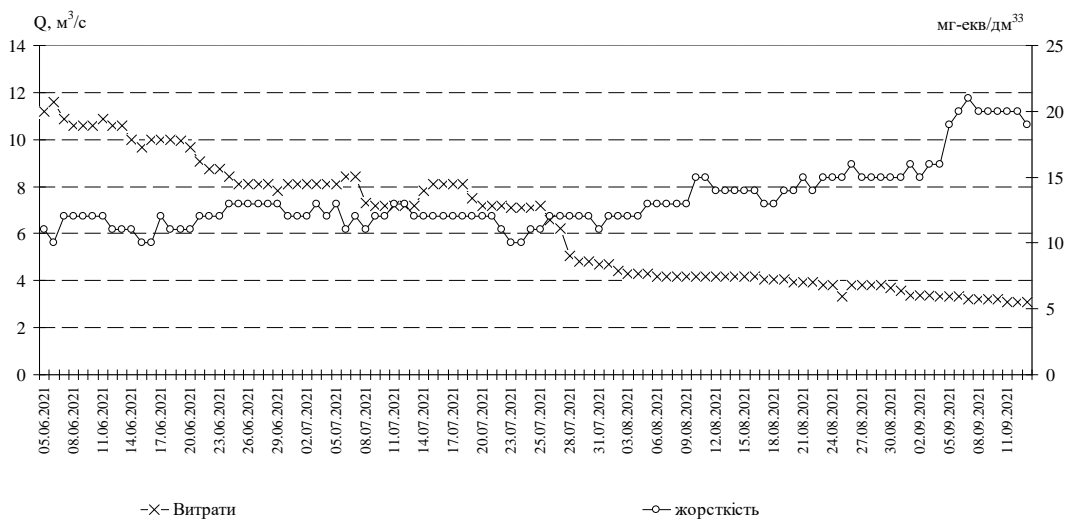


Рис. 5. Добова динаміка витрати води та жорсткості води р. Інгулець (гідропост Андріївка, 2021 р.)

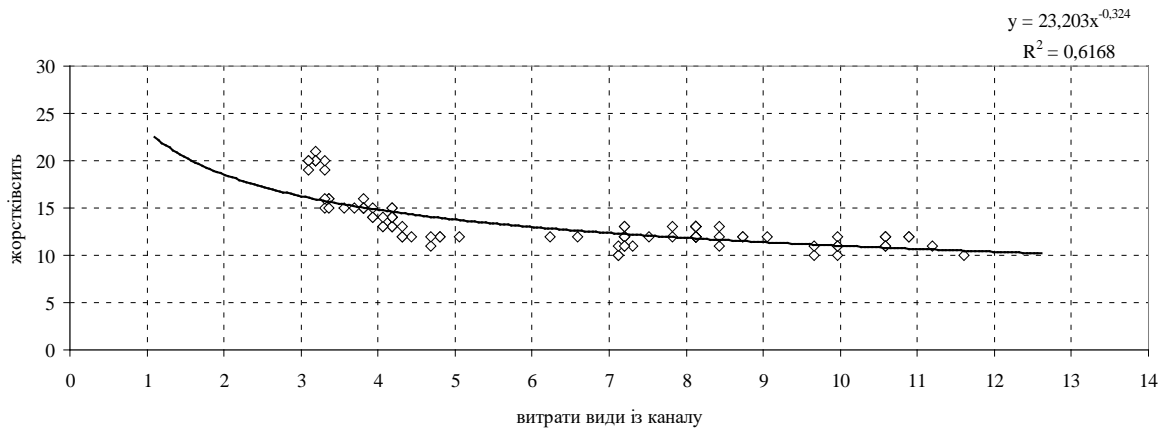


Рис. 6. Залежність жорсткості води від витрат води у р. Інгулець (гідропост Андріївка, 2021 р.)

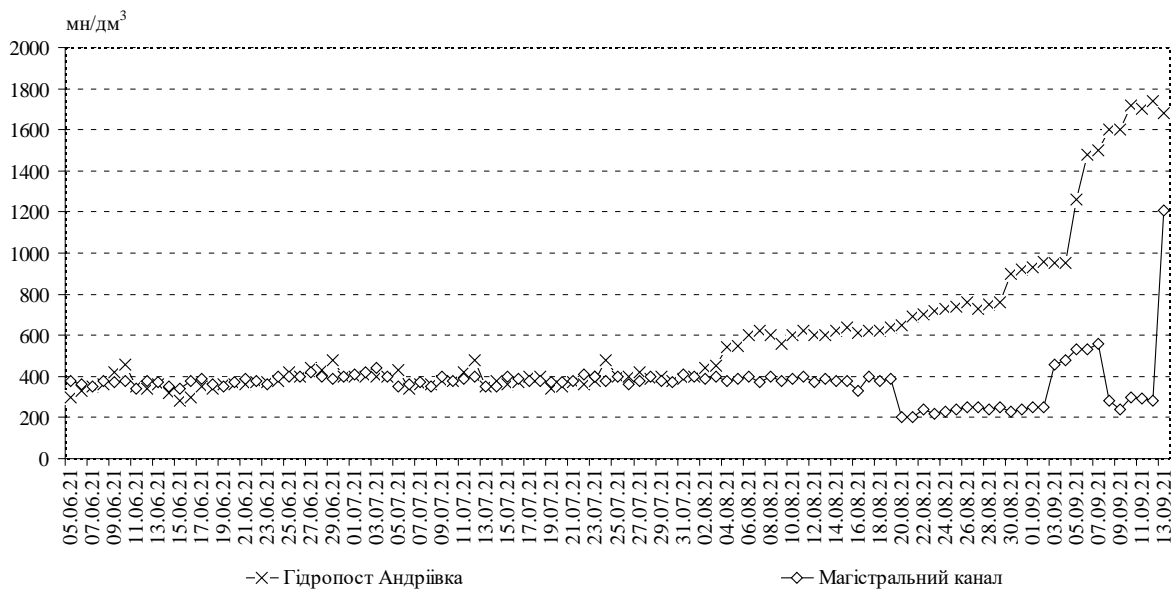


Рис. 7. Добова динаміка хлоридів у р. Інгулець та Інгулецькому магістральному каналі

Зменшення вмісту хлоридів у зрошувальній воді у серпні–вересні пояснюється тим, що у другій половині серпня внаслідок сприятливих умов по руслу р. Інгулець до гирла Головної насосної станції (ГНС) «антирічкою» була підтягнута дніпровська вода. Але така ситуація не відбувається щорічно, це окремий випадок. При цьому для формування більш-менш задовільної якості води у разі застосування технології «антирічка» необхідна постійна цілодобова робота не менш ніж чотири агрегати Головної насосної станції (ГНС), але і це не забезпечить постійну стабільну задовільну якість води [4].

Висновки.

1. Методами регресійного і кореляційного аналізів отримані моделі формування мінералізації та гідрохімічного складу зрошувальної води Інгулецького магістрального каналу за 2021 рік. У міру підвищення мінералізації зрошувальної води пропорційно зростатиме вміст іонів хлору, магнію, кальцію та сульфат-іонів. Гідрокарбонат-іони та іони натрію і калію відіграють другорядну роль у фор-

муванні гідрохімічного складу зрошувальної води Інгулецького магістрального каналу.

2. За поливний період 2021 р. мінералізація зрошувальної води Інгулецького магістрального каналу коливалася від 1550 мг/дм³ (станом на 26.06.) до 750 мг/дм³ (станом на 25.08.). Середня мінералізація зрошувальної води становила 1215 мг/дм³. Зменшення мінералізації та відповідно вмісту хлоридів у зрошувальній воді у серпні–вересні пояснюється тим, що у другій половині серпня внаслідок сприятливих умов по руслу р. Інгулець до гирла ГНС «антирічкою» була підтягнута дніпровська вода. Але така ситуація не відбувається щорічно, це окремий випадок. При цьому для формування більш-менш задовільної якості води у разі застосування технології «антирічка» необхідна постійна цілодобова робота не менш ніж чотири агрегати ГНС, але і це не забезпечить постійну стабільну задовільну якість води.

3. В умовах Регламенту промивання русла та екологічного оздоровлення р. Інгулець у 2021 році виявлено особливості і закономірності формування

вмісту хлоридів у поверхневих водах р. Інгулець залежно від витрат води. Встановлено сильний функціональний зв'язок між вмістом хлоридів у поверхневих водах р. Інгулець та витратами води (коефіцієнт кореляції (r) 0,85, коефіцієнт детермінації (R^2) 0,728). У міру збільшення витрат води із Карачунівського водосховища пропорційно зменшується вміст іонів хлору. Для запобігання перевищенню іонів хлору більше 350 мг-екв/дм³ витрати попусків води із Карачунівського водосховища повинні бути не менш ніж 10,0 м³/с.

4. Дослідженнями встановлені динаміка і закономірності формування жорсткості води у поверхневих водах р. Інгулець залежно від витрат води. Виконано кореляційний і регресійний аналізи даних. Встановлено сильний функціональний зв'язок між жорсткістю води в р. Інгулець та витратами води (коефіцієнт кореляції (r) 0,78, коефіцієнт детермінації (R^2) 0,6168). У міру збільшення витрат води із Карачунівського водосховища пропорційно зменшується вміст іонів хлору. Для формування допустимої жорсткості води витрати попусків води із Карачунівського водосховища повинні бути не менш ніж 10,0 м³/с.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Алмазов А.М. Прогноз химического состава воды для орошения и обводнения правобережных ингулецких земельных массивов и водоснабжения г. Николаева. Киев. 1957. 32 с.
2. Изменение мелиоративно-гидрогеологических условий водораздельных массивов под влиянием орошения : монография / В.Г. Ткачук и др. Киев : Урожай, 1970. 248 с.
3. Землі Інгулецької зрошувальної системи: стан та ефективно використання / за наук. ред. В.О. Ушкаренка, Р.А. Вожегової. Київ : Аграр. наука, 2010. 352 с.
4. Морозов В.В., Козленко Є.В. Інгулецька зрошувальна система: покращення якості поливної води : монографія. Херсон : ПП «ЛТ-Офіс», 2015. 210 с.
5. Козленко Є.В., Морозов О.В., Морозов В.В. Новий варіант технології формування якості води Інгулецької зрошувальної системи при відновленні проектної площі зрошення. *Таврійський науковий вісник. Сільськогосподарські науки*. Херсон, 2021. № 119. С. 43–51.
6. Морозов В.В., Нежлукченко В.М., Волочнюк Є.Г. Формування якості зрошувальної води на Інгулецькому масиві. Херсон : Колос, 2004. 228 с.
7. Козленко Є.В., Морозов О.В., Морозов В.В. Інгулецька зрошувальна система: стан, проблеми та перспективи розвитку : монографія / за ред. О.В. Морозова. Херсон : Айлант, 2020. 204 с.
8. Коваленко Р.Ю., Ковальчук П.І. Аналіз методів управління якістю води для зрошення при промивках русла р. Інгулець дніпровською водою. *Індуктивне моделювання складних систем*. Київ, 2014. Випуск 6. С. 90–96.
9. Хільчевський В.К., Кравчинський Р.Л., Чунарьов О.В. Гідрохімічний режим та якість води Інгульця в умовах техногенезу. Київ : Ніка-Центр, 2012. 180 с.

REFERENCES:

1. Almazov A.M. (1957). Prognoz himicheskogo sostava vodyi dlya orosheniya i obvodneniya pravoberezhnih inguletskih zemelnih massivov i vodosnabzheniya g. Nikolaeva [Forecast of the chemical composition of water for irrigation and watering of the right-bank Ingulets land massifs and water supply for the city of Nikolaev]. Kiev [in Russian].
2. Izmenenie meliorativno-gidrogeologicheskikh usloviy vodorazdelnykh massivov pod vliyaniem orosheniya: monografiya [Change of meliorative-hydrogeological conditions of watersheds under the influence of irrigation: monograph] / V.G. Tkachuk et al. 1970. Kiev: Urozhay [in Russian].
3. Zemli Inhuletskoi zroshivalnoi systemy: stan ta efektyvne vykorystannia [Lands of the Ingulets irrigation system: condition and effective use] / for science. ed. V.O. Ushkarenka, R.A. Vozhehovoii. 2010. Kyiv: Ahrar. nauka [in Ukrainian].
4. Morozov V.V., Kozlenko Ye.V. (2015). Inhuletska zroshivalna systema: pokrashchennia yakosti polyvnoi vody: monografiia [Ingulets irrigation system: improving the quality of irrigation water: monograph]. Kherson: PP "LT-Ofis" [in Ukrainian].
5. Kozlenko Ye.V., Morozov O.V., & Morozov V.V. (2021). Novyi variant tekhnologii formuvannia yakosti vody Inhuletskoi zroshivalnoi systemy pry vidnovlenni proektnoi ploshchi zroshennia [A new variant of the technology of water quality formation of the Ingulets irrigation system during the restoration of the design area of irrigation]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Silskohospodarski nauky – Taurian Scientific Bulletin. Agricultural sciences*, 119, 43–51 [in Ukrainian].
6. Morozov V.V., Nezhlukchenko V.M., & Volochniuk Ye.H. (2004). Formuvannia yakosti zroshivalnoi vody na Inhuletskomu masyvi [Formation of irrigation water quality on the Ingulets massif]. Kherson: Kolos [in Ukrainian].
7. Kozlenko Ye.V., Morozov O.V., & Morozov V.V. (2020). Inhuletska zroshivalna systema: stan, problemy ta perspektyvy rozvytku: monografiia [Ingulets irrigation system: state, problems and prospects of development: monograph]. Kherson: Ailant [in Ukrainian].
8. Kovalenko R.Iu., Kovalchuk P.I. (2014). Analiz metodiv upravlinnia yakistiu vody dlia zroshennia pry promyvках rusla r. Inhulets dniprovskoiu vodoiu [Analysis of water quality management methods for irrigation during washing of the Ingulets riverbed with Dnieper water]. *Induktyvne modeliuвання skladnykh system – Inductive modeling of complex systems*, 6, 90–96 [in Ukrainian].
9. Khilchevskiy V.K., Kravchynskiy R.L., & Chunarov O.V. (2012). Hidrokhimichnyi rezhym ta yakist vody Inhultsia v umovakh tekhnogenezu [Hydrochemical regime and water quality of Ingulets in the conditions of technogenesis]. Kyiv: Nika-Tsentr [in Ukrainian].