

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202001-219>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/219>

УДК 001.891.54-024.84+658.5:556:332.(081)

СИСТЕМНА МОДЕЛЬ ІНТЕГРОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ВОДНИМИ РЕСУРСАМИ Р. ІНГУЛЕЦЬ ЗА БАСЕЙНОВИМ ПРИНЦИПОМ

П.І. Ковальчук¹, докт. техн. наук, Р.Ю. Коваленко², канд. техн. наук, М.В. Яцюк³, канд. геогр. наук, В.П. Ковальчук⁴, докт. техн. наук, О.С. Демчук⁵, канд. техн. наук, Г.А. Балихіна⁶, канд. техн. наук.

¹ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0003-1424-6995>, e-mail: kovalchuk.pavlo.ivanovich@gmail.com

² Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-6185-577X>, e-mail: romchik89@ukr.net

³ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-5535-715X>, e-mail: mv_yatsiuk@ukr.net

⁴ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0001-7570-1264>, e-mail: volokovalchuk@gmail.com

⁵ Національний університет водного господарства і природокористування, Рівне, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-8318-5009>, e-mail: ldem1997@ukr.net

⁶ Національна академія аграрних наук України, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-5571-3556>, e-mail: maslova-anna@ukr.net

Анотація. Розроблена системна модель для інтегрованого управління водними ресурсами басейну р. Інгулець, що відповідає вимогам Водної рамкової Директиви ЄС про встановлення економічно ефективного водокористування із забезпеченням доброго або відмінного екологічного стану річок. Структурно-функціональна схема системної моделі включає підсистеми: подачі води каналом Дніпро-Інгулець; промивки р. Інгулець з Карачунівського водосховища та витіснення призми солоних вод в р. Дніпро; екологічної безпеки при скидах забруднень у р. Інгулець; подачі води на зрошення в Інгулецьку зрошувальну систему, попередження засолення та осолонцювання ґрунтів. Розроблено систему технологічних, економічних та екологічних критеріїв оцінки інтегрованого управління за басейновим принципом. Технологічні критерії визначають підтримання рівнів води у водосховищах. Екологічні критерії включають витіснення призми солоних вод та обмеження на якість води, забезпечення доброго екологічного стану річки. Економічно ефективне водокористування оцінюється за критерієм динаміки витрат водних ресурсів на промивку річки та на зрошення. Інтегроване управління здійснюється за підсистемами, за видами управління та за системою критеріїв. Система інтегрованого управління в басейні р. Інгулець включає оперативне управління водними ресурсами та управління структурою. Для вибору оптимальної структури системи управління пропонується сценарний аналіз. Проводиться імітаційне моделювання варіантів сценаріїв на основі оперативного управління. Для цих цілей формалізовано балансові різницеві рівняння водообміну у водосховищах, двошарову модель динаміки водних мас, відповідно поширення, змішування забруднюючих речовин при промивках річок із водосховищ. Оптимізація варіантів сценаріїв здійснюється за принципом Парето. Наводиться приклад оцінювання ефективності запропонованої системи управління і її порівняння з існуючим регламентом промивки р. Інгулець.

Ключові слова: балансові різницеві рівняння, водообмін, інтегроване управління, критерії оцінки, промивка річок, системна модель.

Постановка проблеми. Басейн річки, як складна система, належить до найважливіших об'єктів системного управління в природокористуванні. В роботах [1, 2] обґрунтовано впровадження басейнового принципу управління, за якого річковий басейн виступає як основна одиниця управління і який є «системою з усталеними екологічними, соціальними та економічними зв'язками» [3]. Особливість таких систем полягає в тому, що вони описують об'єкти, які мають принципово

нові властивості, а саме: ієрархічність, структурну організованість, адаптивність, керованість в умовах невизначеності та ризику, багатокритеріальність в оцінках функціонування. Це означає, що управління цією системою не можна здійснити окремими аналітичними чи статистичними методами, а слід розглядати її як цілісну соціо-еколого-економічну систему [4], узгодження управлінських рішень якої досягається застосуванням методології системного управління [5]. Відповідно до

Директиви ЄС розробка планів управління річковим басейном забезпечує встановлення економічно ефективного водокористування з досягненням доброго або відмінного екологічного стану річок.

Актуальність дослідження. Для інтегрованого управління водними ресурсами в басейнах річок в Україні наявна правова база [6]. Проте відсутній інструментарій системного моделювання та вибору структури управління в басейні ріки за екологічними й економічними критеріями, що відповідає створенню систем управління водними ресурсами за умов сталого розвитку. Отже актуальним завданням є розробка системної моделі інтегрованого управління водними ресурсами басейну р. Інгулець.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Важливою особливістю системного управління водними ресурсами за басейновим принципом є наявність інтегрованих підходів [7]. Виділено кілька таких підходів, зокрема інтегроване управління за рівнями ієрархії та за видами управління, інтегрування за водними, земельним та технологічними ресурсами [8]. Адаптація інтегрованих підходів повинна базуватися на положеннях Директиви ЄС [9], в якій передбачено інтегрування за економічними та екологічними цілями, що обумовлено парадигмою сталого розвитку [10]. Екосистемний підхід [7] передбачає вдосконалення моніторингових досліджень аналізу якості води за методикою екологічної оцінки [11] за нормативами для питного водопостачання [12] та для зрошення [13, 14] із використанням нейронної мережі.

Екологічне оздоровлення річок досягається промивкою з водосховищ їх русел від забруднення, а також водообміном у водосховищах [15]. Наведено екосистемний метод оцінювання якості води р. Ельби в результаті промивки під час повені [16]. Відомі промивки річок від малярійних комарів [17], від забруднення солоними водами океанів [18], екологічне оздоровлення річок [19, 20, 21].

Мета досліджень – створити системну модель інтегрованого управління водними ресурсами р. Інгулець, за якою проводиться сценарне моделювання варіантів технологічних рішень, їх оцінювання та оптимізація економічних критеріїв ефективного водокористування за екологічних обмежень і критеріїв досягнення доброго або відмінного екологічного стану річкового басейну.

Матеріали і методи. В системній моделі застосовується як інструментарій метод декомпозиції басейну ріки на підсистеми, аналіз підсистем і композиції їх у цілісну модель інтегрованого управління за басейновим принципом. Для вдосконалення моніторингу пропонуються телекомунікаційні методи передачі даних [22]. Застосовується метод сценарного аналізу, який на першому рівні ієрархії здійснює імітаційне моделювання перспективних сценаріїв управління, на другому рівні – варіанти оцінюються за критеріями економічно ефективного водокористування із забезпеченням екологічних цілей та нормативних обмежень. Для імітаційного моделювання формалізується система балансових різницевоїх рівнянь динаміки водних мас, змішування та поширення забруднень у річках і водосховищах. Розроблена система комбінованого управління басейном річки за застосування імпульсного методу промивки русел річок [23]. Багатокритеріальна оптимізація варіантів структури управління здійснюється за принципом Парето [24].

1. Методологія і моделі

1.1. Структурно функціональний підхід. Системний аналіз, як інструментарій, дозволяє застосувати структурно-функціональний підхід для інтегрованого управління басейном річки. Проте кожен басейн має свою специфіку і підсистеми, які повинні відобразити модель інтегрованого управління (рис. 1).

Розроблено структурно-функціональну схему системної моделі р. Інгулець, виділені структурні підсистеми, такі як (рис. 2): I – підсистема подачі води каналом Дніпро-Інгулець, подача води по руслу річки і наповнення Карачунівського водосховища; II – підсистема промивки р. Інгулець із Карачунівського водосховища з витісненням призми солоних вод в р. Дніпро; III – підсистема екологічної безпеки (при скидах стоків підприємствами-забруднювачами у р. Інгулець); IV – підсистема подачі води на зрошення в Інгулецьку зрошувальну систему, попередження засолення та осолонцювання ґрунтів.

Функціональні підсистеми включають: формалізацію критеріїв управління та системи моніторингу, систему оперативного управління та балансові моделі; сценарне моделювання та вибір оптимальних варіантів структури управління за принципом Парето (рис. 2).

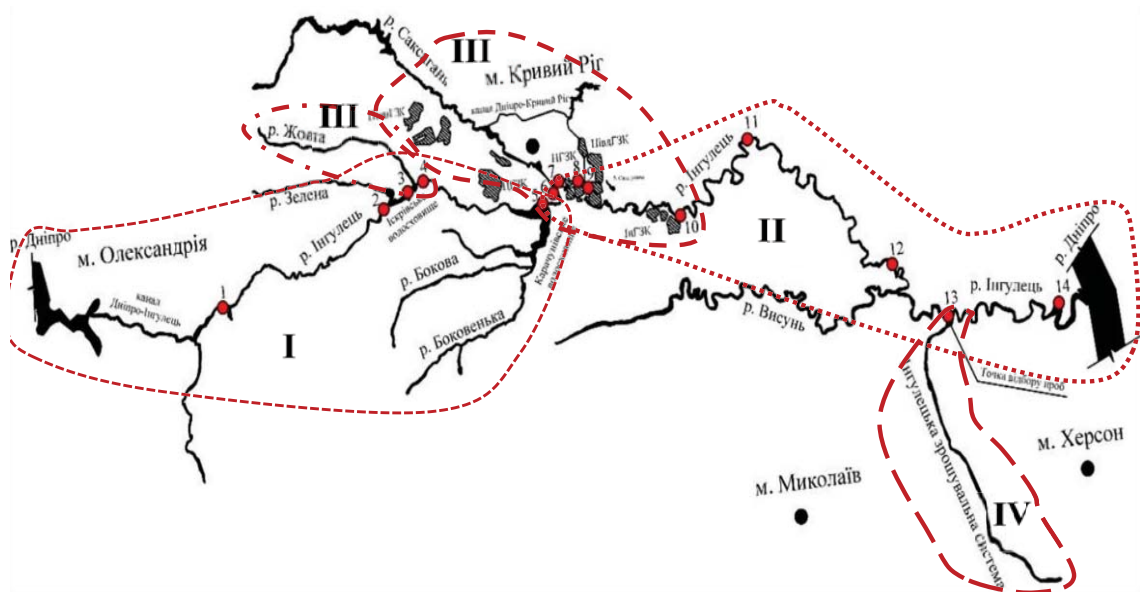


Рис. 1. Структурна схема басейну р. Інгулець за виділеними підсистемами

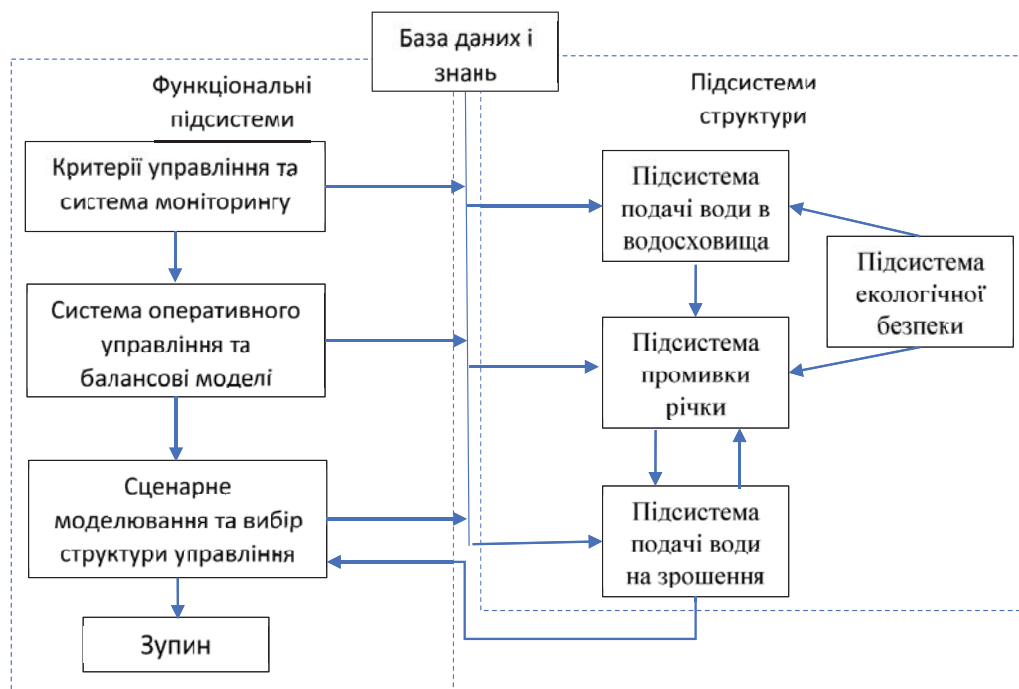


Рис. 2 Структурно-функціональна блок-схема басейну р. Інгулець

1.2. Критерії управління та система моніторингу

Критерії управління. Технологічний критерій $F_1(x, t)$ визначає підтримання рівня води у водосховищі в заданих межах:

$$H_2(t) \leq F_1(x, t) \leq H_1(t), \quad (1)$$

де $H_1(t), H_2(t)$ – нижній та верхній рівні води в процесі її використання.

Економічні критерії $F_{2i}(T)$ математично визначаються як сумарні витрати води за час T на подачу водоспоживачам або на промивку річки:

$$F_{2i}(T) = \int_0^T Q_i(x_i(t), U_i(t)) dt, \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

де Q_i – нелінійна функція витрат води для об'єкта $x_i(t) \in X$, управління $U_i(t) \in U$ в момент часу $t \in (0; T)$.

Екологічний критерій $F_{31}(x(t), Q(t))$ виражає міру ризику виносу забруднюючих речовин на заплаву в деякій точці $x(t)$ при витратах $Q(t)$ в момент часу t :

$$F_{31}(x(t), Q(t)) = R(x(t), Q(t)), \quad (3)$$

де R – деяка функція міри ризику, що залежить від витрат води з водосховища $Q(t)$.

Формалізуються також екологічні попуски $Q(t) \geq C(x, t)$, що перевищують деяку величину стоку річки. Для оздоровлення річок визначаються витрати води при промивках, що забезпечують неповернення призми солоних вод до водозаборів. До того ж враховують також екологічні цілі, задані як обмеження на якість води або як критерії досягнення доброго екологічного стану річки:

$$F_{4j}(x, t) \leq C_j, \quad j = 1, \dots, k, \quad (4)$$

де $F_{4j}(x, t)$ – екологічні критерії, C_j обмеження на показники якості води за чинними нормативами в моменти $t \in [0; T]$ в точках вимірювання x .

Враховуючи, що якість води для зрошення характеризується згідно з нормативними документами за екологічними та агрономічними критеріями, а класи за цими критеріями визначаються на основі обмежень у вигляді нерівностей (порогових елементів), то логіко-математичну модель нейрона для разових концентрацій показника можна представити:

$$A(S_{ij}) = \begin{cases} \text{І клас} - \text{"Придатна"}, \text{ якщо } P_{ij}^1 \leq S_{ij} \leq P_{ij}^2, \\ \text{ІІ клас} - \text{"Обмежено придатна"}, \text{ якщо } P_{ij}^2 < S_{ij} \leq P_{ij}^3, \\ \text{ІІІ клас} - \text{"Непридатна"}, \text{ якщо } P_{ij}^3 < S_{ij} \leq P_{ij}^4, \end{cases} \quad (5)$$

де $i=1, 2$ оцінки відповідно за екологічними або агрономічними критеріями;

$j \in [1; n_1] \cup [1; n_2]$ – порядковий номер екологічних або агрономічних критеріїв, n_1, n_2 відповідна їх кількість;

$P_{ij}^1, \dots, P_{ij}^4$ – обмеження для класифікації показників; $A(S_{ij})$ – визначає клас показника, R – вирішуючі функції у вигляді векторів.

Реалізація екосистемного підходу здійснюється на основі нейронної мережі (рис. 3)

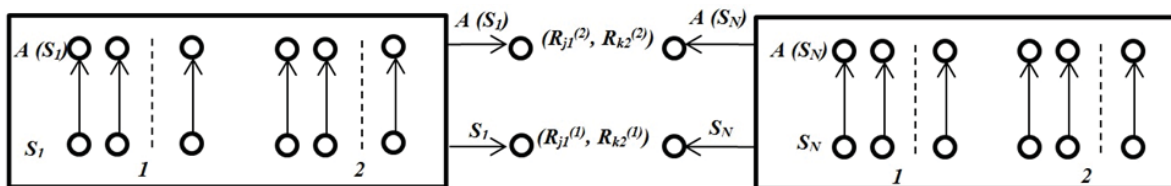


Рис. 3. Оцінювання якості води для зрошення за ансамблем нейронів

через вимірювання в просторі і часі значень показників, послідовним їх графічним аналізом уздовж русла річки [6].

1.1. Система управління басейном річки. Для вибору оптимальної структури системи управління пропонується сценарний аналіз. Проводиться імітаційне моделювання сценаріїв на основі систем оперативного управління водними ресурсами. Оптимізація варіантів систем управління здійснюється за економічними та екологічними критеріями за використання принципу Парето.

У підсистемі подачі води каналом Дніпро-Інгулець здійснюється управління рівнем води і наповнення Карачунівського водосховища за критерієм підтримки рівнів води (1). Промивка потрібна для витіснення в р. Дніпро призми солоних вод, яка утворюється внаслідок забруднень підприємствами між греблею водосховища та с. Андріївка (рис. 1). Результатом промивки має бути досягнення доброго екологічного стану річки за критеріями (3)–(4) та подача води задовільної якості на Інгулецьку зрошувальну систему.

Як показує практика, промивка в системі комбінованого управління здійснюється витісненням призми високомінералізованих вод без значного їх перемішування. Якщо призма мінералізованих вод витіснена за пункт відбору, то через один-два дні вода набуває нормативної якості. В таких випадках імпульс із великими витратами води можна скоротити на певне число діб, що призводить до економії водних ресурсів. Завдяки економії певної кількості води визначається розімкнута лінія управління. Це позиційна складова (рис. 4), яка задається плануванням послідовності в часі імпульсів із їх витратами з водосховища і корегується в процесі управління.

Прийняття рішень про черговий імпульс приймається за функцією, що оцінює управляючі впливи на основі вхідних і вихідних значень одночасно, тобто використовується обернений зв'язок:

$$Q(x, t_{n+1}) = F(V_i(t_n), S_i(t_n), V_j(t_n), S_j(t_n), Q(x, t_n)), \quad (6)$$

де $Q(x, t_{n+1})$ – витрати (імпульс) у наступний $n+1$ момент часу;

V_j, S_j – концентрації хлору у верхньому і нижньому шарах у пункті перед водозабором;

V_i, S_i – концентрації у верхньому і нижньому шарах у пункті водозабору;

$Q(x, t_n)$ – витрати в попередній момент часу з водосховища;

F – функція, що визначає алгоритм прийняття рішень;

B – водосховище;

q_1, q_2, \dots, q_n – неконтрольовані витрати води з дифузних та точкових джерел;

P_1, P_2 – значення концентрацій в пунктах відбору проб перед водозабором та біля головної насосної станції;

ЗС – пункт забору води на зрошувальну систему чи для промислових потреб;

СПМВ – стан призми мінералізованих вод;

БППР – блок підтримки прийняття рішень;

А – позиційна складова комбінованої системи управління;

УкД-І – управління каналом Дніпро-Інгулець.

Система управління басейном р. Інгулець передбачає створення диспетчерського пункту при заборі води на Інгулецьку зрошувальну систему. Виникає необхідність оперативного збору і передачі даних на основі застосування телекомунікаційних технологій [22]. Для реалізації алгоритму БППР використовують дані про подачу води каналом Дніпро-Інгулець, рівні води в Карачунівському водосховищі та витрати води з водосховища, якість водних ресурсів у пунктах забору с. Андріївка та при подачі на Інгулецьку зрошувальну систему, стан призми мінералізованих вод (рис. 4).

При виборі сценаріїв управління басейном річок застосовують інтегрований підхід за екологічними та економічними цілями [7]. Вибір варіантів структури в системі управління передбачає оптимізацію економічних цілей:

$$\left\{ \int_0^T F_1(X(t+1), U(t)) dt, \dots, \int_0^T F_n(X(t+1), U(t)) dt \right\} \rightarrow \max, \quad (7)$$

де F_1, \dots, F_n – економічні критерії, які визначаються як сумарні витрати на інтервалі T , для оцінювання кількості та якості водних ресурсів;

$X(t)$ та $U(t)$ – відповідно стани системи та управління в момент t .

До того ж, безумовно, на інтервалі керування T враховують екологічні цілі, задані як обмеження або як критерії досягнення доброго екологічного стану системи басейну річки:

$$\begin{cases} F_{n+1}(X(t+1), U(t)) \leq C_{n+1}(t); \\ F_p(X(t+1), U(t)) \leq C_p(t), \end{cases} \quad (8)$$

де F_{n+1}, \dots, F_p – екологічні критерії, $C_{n+1}(t), C_p(t)$ – обмеження в моменті $t \in [0; T]$ для досягнення доброго або відмінного екологічного стану.

1.4. Моделювання руху води та поширення забруднень. Для імітаційного моделювання сценаріїв управління пропонуються балансові моделі, що базуються на рівнянні динаміки та збереження мас води і забруднюючих речовин. Водообмін у водосховищі відбувається так, що частина

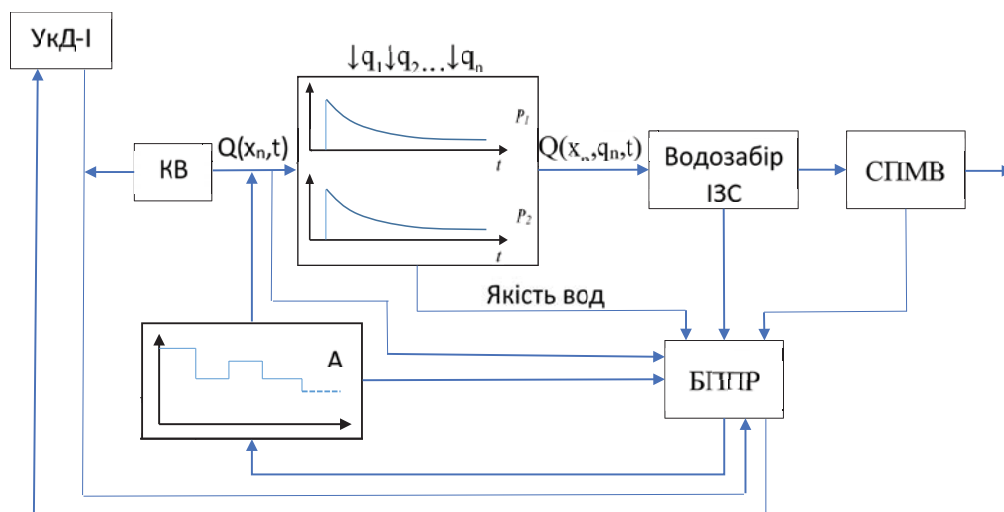


Рис. 4. Схема системи управління басейном р. Інгулець

забрудненої води витісняється потоком води з каналу:

$$W_i^{n+1} = W_i^n + q_i^n - p_i^n - E_i^n, n=1, \dots, N \quad (9)$$

де W_i^{n+1} , W_i^n – об'єм водних ресурсів у водосховищі в $n+1$ -й і n -й моменти часу в i -й комірці;
 q_i^n – об'єм водних ресурсів, що надходять з каналу та приток у водосховище;
 p_i^n – об'єм водних ресурсів, що відбираються з водосховища;
 E_i^n – випаровування з водної поверхні;
 i – кількість комірок.

Концентрація речовини в n -й момент часу в i -й комірці в результаті змішування визначається за формулою:

$$U_i^{n+1} = \frac{w_i^n u_i^n + q_i^n c_i^n - p_i^n s_i^n}{W_i^{n+1}}, \quad (10)$$

де $w_i^n u_i^n$ – об'єм водних ресурсів w_i^n з концентрацією u_i^n , що знаходяться в i -й комірці в n -й момент часу;
 $q_i^n c_i^n$ – об'єм водних ресурсів q_i^n , що надходять із каналу у водосховище з певною концентрацією c_i^n в i -й комірці та n -й момент часу;
 $p_i^n s_i^n$ – об'єм водних ресурсів p_i^n , що відбирають із водосховища, з певною концентрацією s_i^n в i -й комірці та n -й момент часу.

В результаті промивки взаємодіють процеси витіснення забруднених вод та процеси перемішування води верхнього шару з нижнім. Для адекватного відображення неусталеного повільно змінюваного руху водного потоку у відкритих руслах (з урахуванням швидкостей руху різних шарів води та підйомної сили потоку у верхньому шарі) розглянуто двошарову різницеву модель, яка описує рух води у верхньому шарі потоку (де рух відбувається зі значною швидкістю) та динаміку потоку в придонному шарі (де відбувається рух повільно змінюваного потоку).

Використовуються балансові рівняння [6] потоку води у верхньому шарі, що визначає нерозривність потоку, у вигляді:

$$W_i^{n+1} = r(W_i^n + q_i^n) + (1-r)(W_{i-1}^n + q_{i-1}^n), \quad (11)$$

$$0 \leq r \leq 1; i = 1, \dots, N,$$

де W_i^n , W_{i-1}^n – об'єми води в n -й момент часу в i -й та $i-1$ -й комірці;
 q_i^n , q_{i-1}^n – об'єми води в n -й момент часу в i -й та $i-1$ -й комірці, що надходять із бічного притоку або фільтруються з ґрунтовими водами; W_i^{n+1} – водні ресурси в i -й комірці в $n+1$ -й момент часу;

r – коефіцієнт, що залежить від швидкості потоку (при $r=0$, водні маси з i -й комірки переходять за визначений момент часу цілком в $i+1$ -у комірці, при $r=1$ – повністю стояча вода);

N – кількість комірок (для р. Інгулець взято $N = 336$).

Очевидно, що при $0 < r < 1$ – частина води залишається в i -й комірці, інша частина надходить з $i-1$ -й комірки. В сценарії 1 взято $r = 0,02$

Балансові рівняння потоку води в нижньому шарі задаються у вигляді:

$$D_i^{n+1} = D_i^n \mu + p_i^n \mu + (1-\mu)(D_{i-1}^n + p_{i-1}^n), 0 \leq \mu \leq 1 \quad (12)$$

де D_i^n , D_{i-1}^n – водні ресурси, що надходять з i -ї та $i-1$ -ї комірок нижнього шару;
 D_i^{n+1} – водні ресурси в i -й комірці в $n+1$ -й момент часу;
 p_i^n , p_{i-1}^n – водні ресурси, які надходять у нижній шар із приток або фільтруються з ґрунту;
 μ – коефіцієнт швидкості руху води (при $\mu = 1$ – стояча вода;
 $\mu = 0$ – все надходить з $i-1$ -ої комірки).

Неусталений рух води задається за допомогою змінних у часі граничних умов у верхньому шарі. Цим же способом задається інтенсивність імпульсу промивки при послідовності імпульсів.

Балансові рівняння динаміки та збереження мас забруднюючих речовин побудовані так, що здійснюється перемішування нижнього та верхнього шару з певною інтенсивністю λ , підняття водних мас із нижнього шару у верхній з певною концентрацією забруднень у нижньому шарі та опускання відповідних водних мас з верхнього шару в нижній з концентрацією забруднень, які знаходяться у верхньому шарі.

Результуюча модель передбачає, що концентрація в $n+1$ -й момент часу в i -й комірці, в результаті змішування у верхньому шарі визначається за формулою:

$$U_i^{n+1} = \frac{rW_i^n U_i^n + r q_i^n C_{q_i}^n + (1-r)W_{i-1}^n U_{i-1}^n + (1-r)q_{i-1}^n C_{q_{i-1}}^n + \lambda D_i^n S_i^n - \lambda D_i^n U_i^n}{W_i^{n+1}}, \quad (13)$$

де $rW_i^n U_i^n$ – водні ресурси rW_i^n з концентрацією U_i^n в i -й комірці (в n -й момент часу);
 $r q_i^n C_{q_i}^n$ – водні ресурси $r q_i^n$, які поступили з притоки чи з ґрунтових вод із концентрацією $C_{q_i}^n$ в i -ту комірці;

$(1-r)W_{i-1}^n U_{i-1}^n$ – водні ресурси $(1-r)W_{i-1}^n$ із концентрацією U_{i-1}^n в i -й комірці; $(1-r)q_{i-1}^n C_{q_{i-1}}^n$ – водні ресурси $(1-r)q_{i-1}^n$, що надійшли з $i-1$ -ої комірки в дану комірку з притоки чи з ґрунтових вод із концентрацією $C_{q_{i-1}}^n$. Між верхнім і нижнім шаром іде водообмін: із нижнього шару надходять у верхній шар водні ресурси λD_i^n із концентрацією S_i^n і опускаються в нижній шар водні ресурси $-\lambda D_i^n$ з концентрацією U_i^n . Величина λ характеризує інтенсивність водообміну між верхнім та нижнім шаром.

Концентрація в $n+1$ -й момент часу в i -й комірці нижнього шару визначається за формулою:

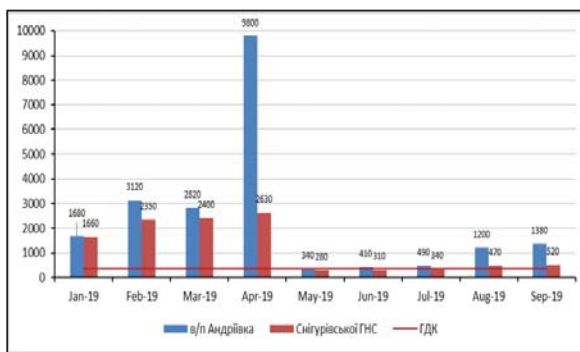
$$S_i^{n+1} = \frac{\mu D_i^n S_i^n + \mu p_i^n R_i^n + (1-\mu) D_{i-1}^n S_{i-1}^n + (1-\mu) p_{i-1}^n R_{i-1}^n - \lambda D_i^n S_i^n + \lambda D_i^n U_i^n}{D_i^{n+1}}, \quad (14)$$

де $\mu D_i^n S_i^n$ – водні ресурси μD_i^n із концентрацією S_i^n , що залишились в i -й комірці; $\mu p_i^n R_i^n$ – водні ресурси μp_i^n із концентрацією R_i^n , що надходять із ґрунту з ґрунтовими водами або з притоку річки (μ – коефіцієнт, при $\mu \rightarrow 0$, швидкість потоку зростає, при $\mu \rightarrow 1$, швидкість потоку зменшується до нуля); $(1-\mu) D_{i-1}^n S_{i-1}^n$ – водні ресурси, що надійшли з $i-1$ -ї комірки з концентрацією S_{i-1}^n ; $(1-\mu) p_{i-1}^n R_{i-1}^n$ – водні ресурси $(1-\mu) p_{i-1}^n$ з концентрацією R_{i-1}^n , що надходять в $i-1$ -ї комірку з притоку або з ґрунтових вод; $-\lambda D_i^n S_i^n$ – водні ресурси $-\lambda D_i^n$ з концентрацією S_i^n , що надходять ввєрх, у верхній шар (знак «мінус» означає убування з нижнього шару); $\lambda D_i^n U_i^n$ – водні ресурси, що надходять із верхнього шару в нижній з концентрацією U_i^n .

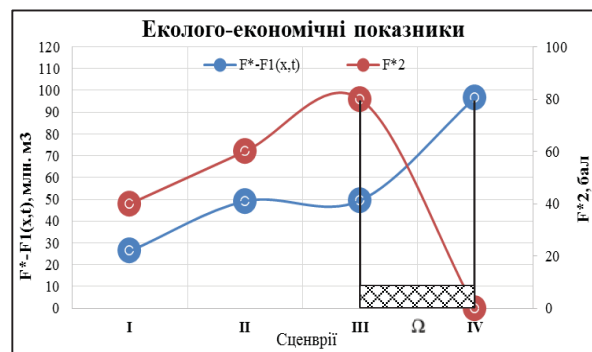
2. Моделювання управління та результати аналізу. Для реалізації системної моделі інтегрованого управління водокористуванням вибрано басейн р. Інгулець (рис. 1). Рівень води в Карачунівському водосховищі підтримується за рахунок поповнення води з каналу Дніпро-Інгулець та природнього стоку річки. Якість води у водосховищі задовільна, відбір здійснюється для питних потреб м. Кривий ріг та промивки річки. Промивка потрібна для витіснення в р. Дніпро призми солоних вод, яка утворюється внаслідок забруднень підприємствами між греблею водосховища та с. Андріївка (рис. 1). Результатом промивки повинно бути також досягнення доброго екологічного стану річки та подача води задовільної якості на Інгулецьку зрошувальну систему.

Проте існуючий метод управління без оберненого зв'язку не забезпечує в окремі періоди задовільну якість води на зрошення (рис. 5, а), є економічно затратним. Проведено сценарний аналіз варіантів [6] інтегрованого управління промивкою річки за системою критеріїв (рис. 5, б).

Вибрано, за принципом Парето, оптимальний сценарій III, що передбачає оперативне управління промивкою річки за вмістом токсичних іонів аніон-хлору (рис. 6) для запобігання негативного процесу засолення ґрунту в умовах зрошення. За даним сценарієм вдосконалюється екологічна складова промивки так, що на першому етапі протягом 7 днів подається невеликий імпульс із наростаючою витратою від 5 до 20 м³/с. Це забезпечує промивку русла без виходу штучного паводка на заплаву. Для оперативного управління використовується імпульсний метод. При цьому задається план імпульсів промивки, який корегується контуром оберне-

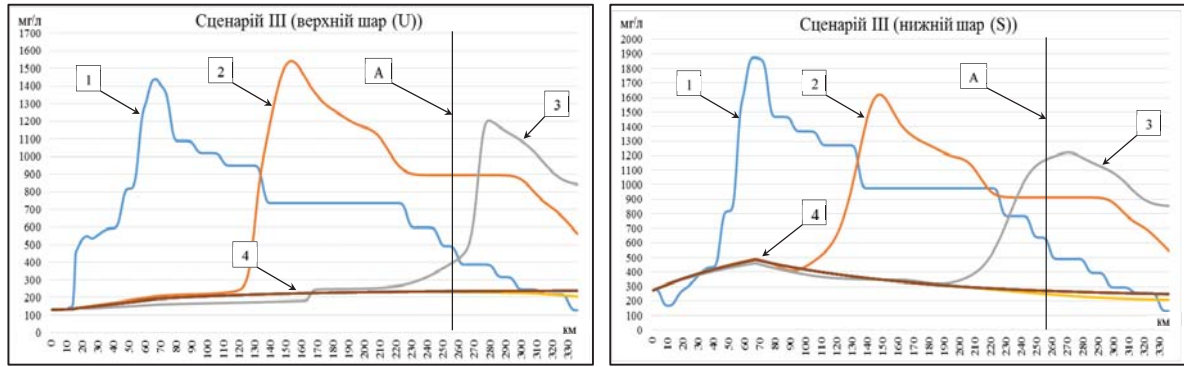


а)



б)

Рис. 5. Якість води за показником аніон-хлору пункт с. Андріївка та перед водозабором на Інгулецьку ЗС у 2019 р. (а), принцип вибору оптимальних за Парето варіантів управління (б)



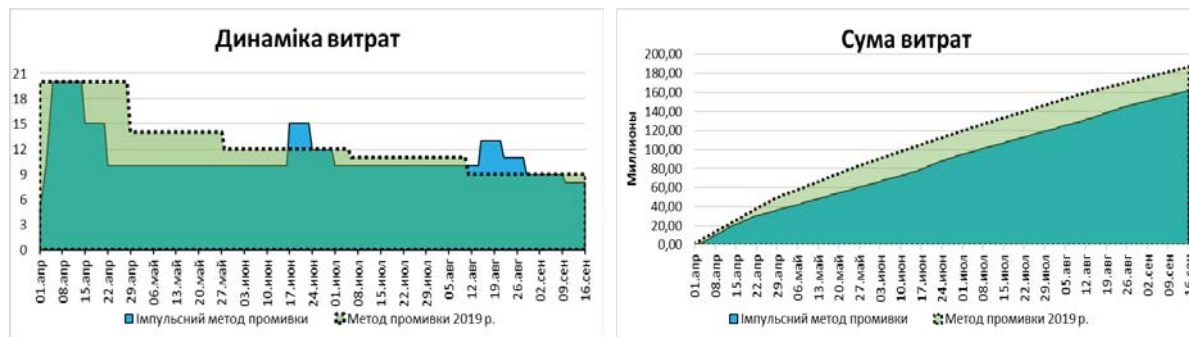
а) б)

Рис. 6. Динаміка забруднень Si^- у верхньому (а), нижньому (б) шарах в процесі промивки при сценарії III в різні моменти часу: 1 – 1-й день; 2 – 7-й день; 3 – 15-й день; 4 – 30-90-і дні (усталений режим)

ного зв'язку в системі комбінованого управління за результатами вимірювань якості води в пункті с. Андріївка та в точці її відбору на Інгулецьку зрошувальну систему. Сценарій управління враховує середньодакдні об'єми заборів води на зрошення.

Порівняно з існуючим у 2019 р. способом промивки без оберненого зв'язку в системі комбінованого управління якості води залишається в межах ГДК. За економічним крите-

рієм запропонована система комбінованого управління використовує лише 160 млн. м куб. води для промивки річки, а існуюча система значно більше – 190 млн. м. куб (рис. 7). Рекомендується збільшити термін промивки з 1 квітня по 15 вересня. Порівняльний аналіз двох методів промивки показав більшу ефективність методу з оберненим зв'язком за екологічними критеріями та за величиною відборів води на промивку і зрошення (рис. 7).



а) б)

Рис. 7 Динаміка витрат води (а) та об'ємів (б) води при різних методах управління промивкою

Висновки. Найповніше інтегроване управління водними ресурсами за басейновим принципом дозволяє здійснити системна модель. Структурно-функціональна схема моделі передбачає поділ басейну річки Інгулець на підсистеми, взаємозв'язок між якими забезпечує цілісний розгляд такої системи для прийняття управлінських рішень. Формалізована система критеріїв інтегрованого управління дозволяє підтримувати баланс води у водосховищах за технологічними показниками, за еколо-

гічними – контролювати витрати води для промивки річки, проведення екологічних попусків та підтримки задовільної якості води в точках водозаборів, за економічними критеріями – проводити оцінювання і вибір оптимальних сценаріїв управління.

Модель сценарного аналізу дозволяє вибрати найбільш ефективний за екологічними та економічними критеріями варіант промивки річки. Імпульсний метод у системі управління є інструментарієм для реалізації найбільш ефективного сценарію за економічними

критеріями витрат водних ресурсів, забезпечуючи добрий екологічний стан та оздоровлення річки за якістю води.

Рекомендується застосовувати інтегрований підхід для вибору структури управління водними ресурсами в басейні річки за системою технологічних, економічних та екологічних критеріїв, вибирати систему управління промивкою річки на основі сценарного екосистемного аналізу варіантів,

визначати оптимальний варіант за принципом Парето.

Порівняльний аналіз запропонованого методу промивки з оберненим зв'язком у системі комбінованого управління, на відміну від існуючого в 2019 р. способу промивки, показав економію 30 млн. м куб. води та можливість забезпечити потрібну якість водних ресурсів (не перевищення ГДК) протягом вегетаційного періоду.

Бібліографія

1. Dukhovny, V., Sokolov, V., Manthrilake, H.: *Integrated Water Resources Management: Putting Good Theory into Real Practice. Central Asian Experience. SIC ICWC, Tashkent* (2009).
2. Шашук В., Яцик А. Україна на шляху до басейнового принципу управління водними ресурсами // *Водне господарство України*, 2007. № 4. С. 6–10.
3. Климчик О.М., Пінкіна Т.В., Пінкін А.А. Впровадження системи інтегрованого управління водними ресурсами за басейновим принципом // *Scientific Journal «ScienceRise»*. 2018. № 4(45). С. 36–40
4. Ковальчук П.І., Ковальчук В.П. Системне управління як розвиток інтегрованого управління водним режимом меліорованих територій // *Вісник НУВГП*. 2015. Вип. 3(71). Сер. Технічні науки.
5. Згуровський М.З., Панкратова Н.Д. *Основи системного аналізу*. Київ: Видавнича група ВНУ, 2007. 544 с.
6. Закон України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо впровадження інтегрованих підходів в управлінні водними ресурсами за басейновим принципом» від 4 жовтня 2016 року № 1641-VIII
7. Системне моделювання і управління водо- і землекористуванням: Монографія / Ковальчук П.І., Матяш Т.В., Ковальчук В.П., Демчук О.С., Балихіна Г.А., Герус А.В., Пендак Н.В. Київ: Аграрна наука, 2019. 608 с.
8. Ковальчук П.І., Коваленко Р.Ю., Балихіна Г.А. Методологічні особливості концепції системного управління водними ресурсами за басейновим принципом // *Меліорація і водне господарство*. Київ. 2018, № 1(107). С. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg201801-115>
9. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy // *Official Journal of the European Communities*. 22.12.2000, ENL327/1.
10. Національна парадигма сталого розвитку України; за заг. ред. акад. НАН України, д-ра техн. наук, проф. Б.Є. Патона. Вид. 2-ге, перероб. і доп. Київ: Державна установа «Інститут економіки природокористування та сталого розвитку Національної академії наук України», 2016. 72 с.
11. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями / Романенко В.Д. та ін. Київ: Символ-Т. 1988. 28 с.
12. ДСТУ 4808:2007 Джерела централізованого питного водопостачання. Гігієнічні та екологічні вимоги щодо якості води і правила вибирання. К.: Держспоживстандарт України, 2007.
13. ДСТУ 7286:2012 Якість природної води для зрошення. Екологічні критерії. Київ: Мінекономрозвитку України, 2013. 14 с. (Національний стандарт України).
14. ДСТУ 2730:2015. Якість природної води для зрошення. Агрономічні критерії. Київ: ДП «УкрНДНЦ» України. 2016. 14 с. (Національний стандарт України).
15. Kovalchuk, P., Rozhko, V., Kovalchuk, V., Balykhina, H., & Demchuk, O. (2019, September). Optimization of integrated water exchange management technologies in territorial systems for conditions of sustainable development. In 2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) (Vol. 1, pp. 80–83). IEEE.
16. Keller I., Schwartz R. “Instrument of the integrated pollutant/sediment management in the Elbe catchment area”, International Conference RIVER BASINS 2015. Monitoring, Modelling & Management of Pollutants. June 24th and 25th 2015. Germany, Karlsruhe – 2015, pp. 67–74.
17. «Environmental assessment accelerated Mahaweli development program» in US Agency for International Development, New York: TAMS, pp. 389, (1980).

18. «Investigation of Options to increase the flood mitigation performance of Wivenhoe Dam», Final Report. Brisben: GHD, pp. 146 (2011).
19. Бабій П.О., Лисюк О.Г. Рукотворна повінь на р. Рось // Водне господарство України. 2010. № 5. С. 4–6.
20. Бурлака В.О. Промивка р. Інгулець у 2011 році // Водне господарство України. 2011. № 5. С. 17–18.
21. Kovalchuk Pavlo, Balykhina Hanna, Kovalenko Roman, Demchuk Olena, & Rozhon Viacheslav (2018). Information technology of the system control of water use within river basins. *Advances in Computer Science for Engineering and Education*, 123–132. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_13
22. Войтович О.П., Ковальчук В.П. Розвиток моніторингових досліджень вологості ґрунту для забезпечення керування зрошенням експериментально-розрахунковим методом // Меліорація і водне господарство. Київ. 2019, Том 2. С. 113–120.
23. Ивахненко А.Г., Пека П.Ю., Востров Н.Н. Комбинированный метод моделирования водных и нефтяных полей. Киев: Наук. думка. 1984. 151 с.
24. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. Москва: Наука, 1982. 253 с.

References

1. Dukhovny, V., Sokolov, V., & Manthrilake, H. (2009). *Integrated Water Resources Management: Putting Good Theory into Real Practice. Central Asian Experience. SIC ICWC*, Tashkent
2. Stashuk, V.A. & Yatsyk, A.V. (2007). *Ukraine na shlyahu do baseynovoho pryntsyru upravlinnia vodnymy resursamy* [Ukraine is on the way toward the basin principle of water resources management]. *Vodne gospodarstvo Ukrainy*, 4, 6–10. [in Ukrainian].
3. Klymchuk, O. M., Pinkina, T. V. & Pinkin, A. A. (2018). *Vprovadzhennia systemy integrovanoho upravlinnia vodnymy resursamy za baseynovym pryntsepom* [Adaptation of the integrated water resources management system based on the basin principle]. *Scientific Journal Science Rise*, 4(45), 36–40. [in Ukrainian].
4. Kovalchuk, P.I. & Kovalchuk V.P. (2015). *Systemne upravlinnia yak rozvytok integrovanoho upravlinnia vodnym rezhymom meliorovanyh terytorii* [System management as the integrated management development of the water regime of the reclaimed area]. *Visnyk NUVGP*, 3(71), 19–23. [in Ukrainian].
5. Zghurovs'kyi, M.Z., & Pankratova, N.D. (2007). *Osnovy systemnoho analizu* [Fundamentals of system analysis]. Kyiv: Vydavnycha grupa VNV. [in Ukrainian].
6. *Zakon Ukrainy «Pro vnesennia zmin do deiakyh zakonodavchyh aktiv Ukrainy shchodo vprovadzhennia integrovanyh pidhodiv v upravlinni vodnymy resursamy za baseynovym pryntsepom» vid 4 zhovtnia 2016 roky № 1641-VIII*. [The Law of Ukraine «On Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine on Implementation of Integrated approaches to the of Water Resources Management based on basin principle» of October 4, 2016, No. 1641-VIII]. [in Ukrainian]
7. Kovalchuk, P.I., Matiash, T.V., Kovalchuk, V.P., Demchuk, O.S., Balykhina, H.A., Gerus, A.V., & Pendak, N.V. (2019). *Systemne modeliuвання i upravlinnia vodo- i zemlekorystuvanniam: Monohrafiia*. Kyiv: Ahrarna nauka. [in Ukrainian]
8. Kovalchuk, P., Kovalenko, R., & Balykhina, H. (2018). *Methodological features of the concept of water use system management using basin principle*. *Land Reclamation and Water Management*, 107(1), 17–23. <https://doi.org/10.31073/mivg201801-115>. [in Ukrainian].
9. *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*. (2000). *Official Journal of the European Communities*, ENL327/1.
10. *Institute of Environmental Economics and Sustainable Development of the National Academy of Sciences of Ukraine» (2016). National paradigm of sustainable development for Ukraine*. Kyiv. [in Ukrainian].
11. Romanenko, V.D. (1988). *Metodyka ekolohichnoi otsinky yakosti poverkhnevyykh vod za vidnovidnyimi kategoriyami*. [The methodology of ecological assessment of surface water quality according to the relevant categories] Kyiv: Symvol-T, 28. [in Ukrainian].
12. *Dzherela tsentralizovanoho pytnoho vodopostachannia. Hihienichni ta ekolohichni vymohy shchodo yakosti vody i pravyla vybyrannia*. [Sources of centralized drinking water supply. Hygienic

and environmental requirements for water quality and selection rules]. (2007). DSTU 4808:2007. Natsionalnyi standart Ukrainy. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. [in Ukrainian]

13. Yakist pryrodnoi vody dlia zroshennia. Ekolohichni kryterii. [Water quality for an irrigation. Ecological criteria]. (2012). DSTU 7286:2012. Natsionalnyi standart Ukrainy. Kyiv: Minekonomrozvytku Ukrainy. [in Ukrainian]

14. Yakist pryrodnoi vody dlia zroshennia. Ahronomichni kryterii [Water quality. Agronomic criteria]. (2015). DSTU 2730:2015. Natsionalnyi standart Ukrainy Kyiv: DP «UkrNDNTs» Ukrainy. [in Ukrainian]

15. Kovalchuk, P., Rozhko, V., Kovalchuk, V., Balykhina, H., & Demchuk, O. (2019). Optimization of integrated water exchange management technologies in territorial systems for conditions of sustainable development. 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies, Vol. 1, 80–83.

16. Keller, I., & Schwartz, R. (2015) Instrument of the integrated pollutant/sediment management in the Elbe catchment area. International Conference RIVER BASINS 2015: Monitoring, Modelling & Management of Pollutants. Germany, Karlsruhe, 67–74.

17. Environmental assessment accelerated Mahaweli development program. (1980). US Agency for International Development, New York: TAMS.

18. Investigation of Options to increase the flood mitigation performance of Wivenhoe Dam. (2011). Final Report. Brisben: GHD.

19. Babiy, P.O., & Lisyuk, O.G. (2010). Man-made flood on the river Ros. Water management of Ukraine, 5, 4–6. [in Ukrainian]

20. Burlaka, B. (2011). The flushing Inhulets river in 2011. Water Management of Ukraine, 5, 17–18. [in Ukrainian]

21. Kovalchuk, P., Balykhina, H., Kovalenko, R., Demchuk, O., & Rozhon, V. (2018). Information technology of the system control of water use within river basins. Advances in Computer Science for Engineering and Education, 123–132. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_13

22. Voitovich, O., & Kovalchuk, V. (2019). Monitoring research of field soil moisture to provide irrigation management on the base of an experimental and calculation method. Land Reclamation and Water Management, 2, 113–120. doi: <https://doi.org/10.31073/mivg201902-179>

23. Ivakhnenko, A., Peka, Y., & Vostrov, N. (1984). The Combined Method of Modeling Water and Oil Fields. Naukova Dumka, Kyiv. [in Russian]

24. Podinovsky, V., Noghin, V. (1982). «Pareto optimal solution for multicriterion problems» Nauka, Moscow. [In Russian]

**П.И. Ковальчук, Р.Ю. Коваленко, М.В.Яцюк,
В.П. Ковальчук, О.С.Демчук, А.А. Балыхина**

Системная модель интегрированного управления водными ресурсами р. Ингулец по бассейновому принципу

***Аннотация.** Разработана системная модель для интегрированного управления водными ресурсами бассейна р. Ингулец, что соответствует требованиям Водной рамочной директивы ЕС об установлении экономически эффективного водопользования с обеспечением хорошего или отличного экологического состояния рек. Структурно-функциональная схема системной модели включает подсистемы: подсистема подачи воды каналом Днепр-Ингулец; подсистема промывки р. Ингулец с Карачуновского водохранилища и вытеснения призм солёных вод в р. Днепр; подсистема экологической безопасности при сбросах загрязнений в р. Ингулец; подсистема подачи воды на орошение в Ингулецкую оросительную систему, предупреждения засоления почв. Разработана система технологических, экономических и экологических критериев оценки интегрированного управления по бассейновому принципу. Они включают поддержание уровня воды в водохранилищах, обеспечение экологического состояния реки, динамику расходов водных ресурсов. Формализованная система интегрированного управления в бассейне р. Ингулец включает оперативное управление водными ресурсами и управление структурой. Интегрированное управление осуществляется по подсистемам, видам управления и системой критериев. Для оперативного управления формализованы балансовые разностные уравнения водообмена в водохранилищах. Используется двухслойная модель динамики водных масс, распространения и смешивания загрязняющих веществ при промывках рек из водохранилищ. Приводится пример оценивания эффективности предложенной системы и ее сравнение с существующим регламентом промывки р. Ингулец.*

***Ключевые слова:** балансовые разностные уравнения, водообмен, интегрированное управление, критерии оценки, промывка рек, системная модель.*

P.I. Kovalchuk, R.Yu. Kovalenko, M.V. Yatsyuk,
V.P. Kovalchuk, O.S. Demchuk, H.A. Balykhina

**System model of integrated management of the water resources
of the Ingulets River by a basin principal**

Abstract. System model of integrated management of the water resources of the Ingulets River was developed according to the requirements of the EU Water Framework Directive on providing cost-effective water use with ensuring good or excellent ecological status of rivers. The structural-functional diagram of the system model includes next subsystems: water supply by the Dnipro-Ingulets canal; flushing of the Ingulets River from the Karachunivske reservoir and the displacement of the salt water prism to the Dnipro River; environmental safety during pollution discharges into the Ingulets River; water supply for the Ingulets irrigation system, prevention of soil salinization. The system of technological, economic and environmental criteria for the assessment of integrated management by a basin principle was developed. It includes maintaining water level in reservoirs, ensuring good ecological condition of the river, and the dynamics of water consumption. The formalized system of integrated management for the Ingulets River basin includes water resource operative control and structure control. Integrated management is carried out by subsystems, types of management and criteria system. Balance differential equations of water exchange in reservoirs are formalized for operative control. Two-layer model for dynamics of water masses, distribution and mixing of pollutants during river flushing is used. Assessment of the efficiency of the proposed system and its comparison with the existing Ingulets River flushing schedule are demonstrated as an example.

Key words: balance difference equations, water exchange, integrated management, assessment criteria, river flushing, system model.