

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ВОДНИХ ПРОБЛЕМ І МЕЛІОРАЦІЇ

ISSN 2616-5562 (Online)

ISSN 2616-5643 (Print)

МЕЛІОРАЦІЯ І ВОДНЕ ГОСПОДАРСТВО

№ 2 • 2021

журнал

(випуск 114)

Київ
2021

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102>

Засновник – Інститут водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук України. Свідоцтво про державну реєстрацію – серія КВ № 24001-13841Р.

Журнал включено до «Переліку наукових фахових видань України» (категорія «Б») у галузі сільськогосподарських (спеціальність 201 – Агронімія) та технічних наук (спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія) на підставі наказу Міністерства освіти і науки України від 17.03.2020 р. № 409.

У журналі відображено результати теоретичних та експериментальних досліджень із пріоритетних напрямів: агроресурси, водні ресурси, зрошення, осушення, гідрологія, екологія, гідротехніка, агроінженерія тощо. Журнал розрахований та буде корисним для науковців, фахівців водного та сільського господарства. Два видання журналу за рік публікують оригінальні наукові статті, а також огляди, пов'язані з профілем журналу.

Журнал включено до міжнародних та національних інформаційних та наукометричних баз, репозитаріїв і пошукових систем:

*The International System
for Agricultural Science
and Technology (FAO)*



*Research Bib Journal
Database (Японія)*



*BASE – Bielefeld
Academic Search
Engine (Німеччина)*



*CrossRef
(США)*



DOAJ

*(Directory of Open
Access Journals)*

РИНЦ (Російська Федерація)

РОССИЙСКИЙ ИНДЕКС
НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ

Science Index



Національна бібліотека України
імені В. І. Вернадського

DOAJ
DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS

*Open Ukrainian Citation
Index (OUCI) (Україна)*



*Scientific Indexing
Services (США)*



*Google Scholar
(США)*



*CIARD RING
(Італія)*



Пристатейний список літератури продубльовано відповідно до вимог міжнародних систем транслітерації (зокрема наукометричної бази SCOPUS)

Рекомендовано до друку вченою радою Інституту водних проблем і меліорації НААН 17 грудня 2021 року (протокол № 12).

Адреса редакції:

Інститут водних проблем і меліорації НААН
вул. Васильківська, 37, Київ, 03022
Тел. (044) 257-40-30, 067 791 67 11
<http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg>

ISSN 2616-5562 (Online)
ISSN 2616-5643 (Print)

© Інститут водних проблем і меліорації НААН, 2021

JOURNAL
“LAND RECLAMATION AND WATER MANAGEMENT”

№ 2 • 2021

«МЕЛІОРАЦІЯ І ВОДНЕ ГОСПОДАРСТВО»

EDITORIAL BOARD:

M. ROMASHCHENKO, Doctor of Engineering Sciences, Prof, Academician of NAAS. (*Editor-in-Chief*)

T. TROSHYNA, N. LOGUNOVA, K. SHATKOVSKA, O. VOITOVYCH (*Executive Editors*)

TECHNICAL SCIENCES
(192 – Construction and civil engineering):

B. FAYBISHENKO,
Doctor of Engineering Sciences, Prof. (USA)

V. ADAMCHUK,
*Doctor of Engineering Sciences, Prof.,
Academician of NAAS of Ukraine*

V. BULGAKOV,
*Doctor of Engineering Sciences, Prof.
Academician of NAAS of Ukraine*

A. ROKOCHYNSKIY,
Doctor of Engineering Sciences, Prof.

D. CHARNYI,
Doctor of Engineering Sciences.

V. KOVALCHUK,
Doctor of Engineering Sciences.

V. BOHAIENKO,
Ph.D. in Engineering Sciences

P. KOVALCHUK,
Doctor of Engineering Sciences, Prof.

P. KOVALENKO,
*Doctor of Engineering Sciences, Prof.,
Academician of NAAS, RAS (Russia)
and IAA Georgofili (Italy)*

V. KRAVCHUK,
*Doctor of Engineering Sc.s, Prof.,
Academician of NAAS of Ukraine*

Y. MYKHAILOV,
Doctor of Engineering Sciences

V. POPOV,
Doctor of Engineering Sciences

P. KHORUZHYYI,
Doctor of Engineering Sciences, Prof.

V. VYSHNEVSKIY,
Doctor of Science in Geography, Prof.

M. YATSIUK,
Ph.D. in Geography

O. MUZYKA,
Ph.D. in Engineering Sciences

S. SHEVCHUK,
Ph.D. in Engineering Sciences

AGRICULTURAL SCIENCES
(201 – Agronomy):

B. SCHULTZ,
Dr. habil., Prof. (The Netherlands)

R. ISLAM,
Ph. D. (USA)

V. USHKARENKO,
*Doctor of Agricultural Sciences, Prof.,
Academician of NAAS of Ukraine*

O. TARARIKO,
*Doctor of Agricultural Sciences, Prof.,
Academician of NAAS of Ukraine*

S. BALIUK,
*Doctor of Agricultural Sciences, Prof.,
Academician of NAAS of Ukraine*

V. PICHURA,
Doctor of Agricultural Sciences, Prof.

V. MOSHYNSKIY,
Doctor of Agricultural Sciences, Prof.

O. TONKHA,
Doctor of Agricultural Sciences, Prof.

A. LIKHATSEVYCH,
*Doctor of Engineering Sciences, Prof.,
Corresponding member of NAS,
Academician of RAS (Belarus)*

A. SHATKOVSKIY,
*Doctor of Agricultural Sciences, Prof.,
Corresponding Member of NAAS of Ukraine*

V. VERGUNOV,
*Doctor of Agricultural Sciences,
Prof., Academician of NAAS of Ukraine*

Y. TARARIKO,
*Doctor of Agricultural Sciences, Prof.,
Academician of NAAS of Ukraine*

I. SLIUSAR,
*Doctor of Agricultural Sciences, Prof.,
Corresponding Member of NAAS of Ukraine*

O. ZHOVTONOG,
Doctor of Agricultural Sciences, Prof.

V. VASIUTA,
Doctor of Agricultural Sciences

M. MALYARCHUK,
Doctor of Agricultural Sciences

L. SHAWN,
Ph.D. (USA)

S. RETMAN,
Doctor of Agricultural Sciences, Prof

KYIV • 2021

“LAND RECLAMATION AND WATER MANAGEMENT”

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

М.І. РОМАШЕНКО, д.т.н., проф., акад. НААН (*головний редактор*)
Т.І. ТРОШИНА, Н.В. ЛОГУНОВА, К.Б. ШАТКОВСЬКА, О.П. ВОЙТОВИЧ (*виконавчі редактори*)

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

(192 – *Будівництво та цивільна інженерія*):

Б.О. ФАЙБИШЕНКО,
д. т. н., професор (США)

В.В. АДАМЧУК,
д. т. н., професор, академік НААН

В.М. БУЛГАКОВ,
д. т. н., професор, академік НААН

А.М. РОКОЧИНСЬКИЙ,
д. т. н., професор

Д.В. ЧАРНИЙ,
д. т. н., с.н.с.

В.П. КОВАЛЬЧУК,
д. т. н., с.н.с.

В.О. БОГАСНКО,
к. т. н.

П.І. КОВАЛЬЧУК,
д. т. н., професор

П.І. КОВАЛЕНКО,
д. т. н., професор, академік НААН, член РАН,
член IAA Georgofili

В.І. КРАВЧУК,
д. т. н., професор, академік НААН

Ю.О. МИХАЙЛОВ,
д. т. н., с.н.с.

В.М. ПОПОВ,
д. т. н., с.н.с.

П.Д. ХОРУЖИЙ,
д. т. н., професор

В.І. ВИШНЕВСЬКИЙ,
д. геогр. н., професор

М.В. ЯЦЮК,
к. геогр. н.

О.П. МУЗИКА,
к. т. н., с.н.с.

С.А. ШЕВЧУК,
к. т. н., с.н.с.

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ НАУКИ

(201 – *Агрономія*):

Б. ШУЛЬЦ,
д.н., професор (Нідерланди)

Р. ІСЛАМ,
Ph.D. (США)

В.О. УШКАРЕНКО,
д. с.-г. н., професор, академік НААН

О.Г. ТАРАРІКО,
д. с.-г. н., професор, академік НААН

С.А. БАЛЮК,
д. с.-г. н., професор, академік НААН

В.І. ПЧУРА,
д. с.-г. н., професор

В.С. МОШИНСЬКИЙ,
д. с.-г. н., професор

О.Л. ТОНХА,
д. с.-г. н., професор

А.П. ЛІХАЦЕВИЧ,
д. т. н., професор, чл.-кор. НАН, член РАН (Білорусь)

А.П. ШАТКОВСЬКИЙ,
д. с.-г. н., професор, чл.-кор. НААН

В.А. ВЕРГУНОВ,
д. с.-г. н., професор, академік НААН

Ю.О. ТАРАРІКО,
д. с.-г. н., професор, академік НААН

І.Т. СЛЮСАР,
д. с.-г. н., професор, чл.-кор. НААН

О.І. ЖОВТОНОГ,
д. с.-г. н., професор

В.В. ВАСЮТА,
д. с.-г. н., с.н.с.

М.П. МАЛЯРЧУК,
д. с.-г. н., с.н.с.

Л. ШОВН,
Ph. D. (США)

С.В. РЕТЬМАН,
д. с.-г. н., професор

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-310>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/310>

UDC 626.3

OPTIMAL OPERATION OF MULTIPURPOSE RESERVOIRS IN SERIES: ROSEIRES AND SENNAR CASE STUDY

T.Z. Saad Omer¹, MSc student, S.E. Ahmed², prof., A. Karimi³, assist. prof.

¹ UNESCO Chair in Water Resources, Omdurman Islamic University, Khartoum, Sudan;
<https://orcid.org/0000-0002-8671-9977>; e-mail: thoabazsaadomer@gmail.com;

² UNESCO Chair in Water Resources, Omdurman Islamic University, Khartoum, Sudan;
<https://orcid.org/0000-0002-5153-2475>; e-mail: siddig57ahmed@gmail.com;

³ Civil & Environmental Engineering Department, College of Engineering, National University of Science and Technology, Muscat, Oman;
<https://orcid.org/0000-0003-4250-2140>; e-mail: akbarkarimi@nu.edu.om

Abstract. *The Roseires-Sennar Dams System (RSDS) at lower part of Blue Nile River play a vital role in water supply to the irrigation schemes in Sudan. The existing rule curves for this system belong to 1925 and 1966 for Sennar and Roseires reservoirs, respectively. Introduction of new irrigation schemes, approved climate change impacts on Blue Nile River flow and upstream developments in Ethiopia as well as the heightening of the Roseires Dam from elevation 480 to 490 m.a.s.l have shown the RSDS is losing its efficiency in terms of fully supplying the water demands. The literature addresses the simulation of Roseires and Sennar dams, and tries to find the best coordinated rule curves through a limited number of operation rules to find optimal operating rules for reservoirs that minimize the impacts of new developments, water demand growth and climate change on water supply to various demands on Blue Nile River. Such decisions are locally optimal in best condition since they do not consider the storage and carry-over capability of reservoirs that can transfer the non-optimal (locally optimal) decisions to other time steps of planning horizon and creat shortages in other time steps. Therefore, aim of this research is to find optimal coordinating operation rules for Roseires and Sennar dams that through a non-linear multi-period optimization model that considers the conditions of climate change, flow regime and water demand as scenarios. Model is validated by comparison with observed reservoir operation during November 1999 till May 2000. Eighteen scenarios that cover the normal, dry and very dry flow regimes, along with three suggested crop patterns and climate change impact are analyzed. Results shows in normal conditions of flow, crop pattern 2 is the most recommended with more than 11 Billion USD marginal profit and fully supplying the water demand and 1530 GWh energy generation per annum. The coordinated rule curves have a totally different pattern of emptying and filling compared with existing ones. Rule curves change from one flow regime to another, which proves how change in conditions of the system has influence on optimal operation rules. Comparison of marginal profits with crop pattern 2 shows in three inflow conditions of normal, dry and very dry years multi-period optimization model could keep the marginal profits above 11 Billion USD, let's say, 11,050, 11,056 and 11,042 Billion USD, respectively, which shows the robustness of model in dealing with all conditions and keeping the marginal profits not affected. However, the Roseires rule curves are different in these three condition, while Sennar rules curves are almost the same. Without climate change impact, model can manage to supply the water demands fully in all flow conditions. However, water supply reliability is affected by climate change with all crop patterns. Roseires-Sennar Dams system in a normal year under climate change can produce 10,688 Billion USD marginal profit and 1371 GWh per year energy. It shows that model could manage the system performance so that climate change decrease the marginal profit by 3.27%, while inflow is reduced by 25% and water demands and evaporation increased by 19%. Energy generation under climate change has decreased by 10.5%, which is the most affected sector. Crop pattern 2 and 3 are not suitable for climate change conditions since up to 65% deficit in water supply can happen if very dry year realizing with climate change. In very dry conditions crop pattern 1 is more suitable to be practiced.*

Keywords: *Roseires – Sennar Dam, Reservoir Operation, Optimal Coordination, Multi-purpose Reservoir, Long-term Planning*

Introduction. The Roseires and Sennar Dams have been operating according to a certain plan. The existing coordination plan states during June to September keep the reservoirs as empty as possible for flood control at level of 467 m.a.s.l and 417.5 m.a.s.l for Roseires and

Sennar Dams, respectively (Abdelatif; 2004). According to this coordination plan September and October based on the flow at EIDeim Station is the filling time, all sluice gates must be kept open and if flow at EIDeim is above 350 MCM/day then additional flow will be stored. This

process continues for 45 days until level of water surface reaches 421.7 m and 490 m for Sennar and Roseires Dams, respectively. The level of water is maintained after this till the time flow at ElDeim starts to fall below the water demand, when the reservoirs are emptied (Abdelatif; 2004). The Roseires Dam specification such as height, capacity and surface area have changed since 2013 to 490 m, 7400 MCM and 700 Km², so the new level of 490 m is also considered in the rule curve explained above. Figure 1-1 shows observed operation of both dams in existing coordination plan that has shortage in June, September to October from 30% up to 67%. The existing rule curves for Roseires-Sennar dams' system (RSDS) are not necessarily efficient for coordination of these two dams anymore because of the following reasons:

1. Roseires Dam capacity and specifications has changed since 2013. Therefore, a new plan of reservoir operation is required to assure the efficient fulfillment of reservoir operation goals for Roseires and Sennar dams after 2013 (Wikipedia; 2020, SMEC; 2019).

2. Considering the Roseires Dam specifications change, hydrologic uncertainty can make the operation rule before 2013 totally ineffective especially in dry years or at severe droughts. In 1913 the annual flow reduced by 60% compared with long-term average of 49625 MCM and, in 1972 and 1984 the flow reduced by 40%. A drought period was prevailing in the Blue Nile for 10 years 1978 till 1988 (Nile Basin Initiative 2017). In such conditions special operation policy must be adopted to minimize the impacts of drought on reservoir operation efficiency.

3. Water demand growth due to development in agriculture can also make this rule ineffective by addition of new schemes as mentioned above. 1,061,000 ha will be added to existing irrigation schemes of Blue Nile at downstream of Roseires and Sennar dams, which will increase the irrigation demand significantly in future (Basheer et al.; 2018).

4. Climate change also can make this rule ineffective by changing the hydrological characteristics of the flow and even influencing the existing and future evapotranspiration and irrigation demand. Recent studies found that Blue Nile riverbasin will face 21.3% increase in sediment load, 19% of evapotranspiration increase and 25% of rainfall reduction till 2080 (Gelete et al. 2019).

5. Combination of the four above factors can make the existing operation rule, which may have been suitable before 2013, completely ineffective in new conditions.

Therefore, in this research coordinated operation of Roseires and Sennar Dam will be modeled and optimized while considering all five conditions mentioned above. To obtain optimal operation rules a multi-period multi-reservoir optimization model will be developed that uses the linear programming to obtain the optimal operation rules for coordinated operation of both dams. Aim of this research is to evaluate effect of optimal coordinated operation of Roseires and Sennar Dams on water supply to existing and future irrigation schemes as well as energy generation and marginal profit in the system. This study is concerned with the operation and control of multi-purpose reservoirs systems taking Roseires – Sennar reservoirs- operating in series – as case study. The problem involves finding appropriate release decisions from various reservoirs in the system in order to satisfy the multiple objectives which may be conflicting. The specific objectives of the study are:

1. Developing an optimal multi-period reservoir operation model for Roseires & Sennar reservoirs.

2. Identifying the factors affecting reservoirs' operation through model analysis

3. Generating appropriate release decisions for the two reservoirs to satisfy the conflicting objectives between water for irrigation, hydropower generation and other uses.

Developing a multi-period optimization model (MOM) for Roseires-Sennar Dams' reservoirs operation: This model will determine the optimal release and storage of water from dams as well as allocation to irrigation schemes and energy generation to have the optimal cumulative marginal profit over the analysis horizon. The Roseires and Sennar Dams will be included in a Non-linear optimization model for reservoir operation. The irrigation water demand will be lumped for each dam. Therefore, although 12 irrigation schemes will be considered but they will be lumped in model as only two demands for Roseires and Sennar dams, respectively. The inflow to the reservoirs is only the monthly inflow measured at ElDeim station. The modeling is based on water balance in dams and demand balance equations. In the objective function marginal profit of irrigation (the irrigation schemes) and energy generation are considered as economic indices of the system to be maximized. Return flow from irrigation schemes to the Blue Nile River is not considered in this research due to data availability, which is on the safe side or will be conservative. Model is monthly and for a multi-year horizon that can vary from 1 year to 100 year. Model is basically deterministic and

it does not consider the uncertainty explicitly in model parameters. Uncertainty of future conditions will be considered through the 18 scenarios that exemplify the concerns of the stakeholders as well as hydrologic and climate change conditions.

Literature Survey. Reservoir operation is an old topic in water resources management, which goes back to 1883 where W. Rippl introduces the mass curve method for reservoir capacity sizing (Rippl; 1883). In the mass curve method the demand is assumed constant or called safe yield. Other method for reservoir operation that over comes the limitation of Rippl method is Sequent Peak Method that considers demand variation over the months or years and finally will give the minimum reservoir capacity along with reservoir operation plan (Thomas and Burden; 1963). The Standard Operation Policy (SOP) is another reservoir operation model that uses the reservoir simulation for a single-reservoir (Maas et al.; 1962, Loucks et al.; 1981). SOP is blind to future impacts of current decision on reservoir operation in terms of large deficits due to emptying the reservoir before dry months or years (You and Cai; 2008). Therefore, Hedging Rules were introduced that try to distribute the deficits to avoid a large deficit in the future (Bower et al.; 1962, Kelemes 1977, Loucks et al.; 1981). As development of waterbasin moved on from 1950's and more reservoirs are made at upstream areas, these approaches proved to be not efficient enough to deal with a network of reservoirs instead of a single reservoir. The process of effective use of such rules will become more complicated since any change in one rule requires an adjustment of other reservoirs operation rule that by considering the huge number of possible combinations it will become a very complicated task and finally use of such rules in a network of reservoirs will not lead to an effective reservoir operation performance. Therefore, method of mathematical programming is used for obtaining more efficient, dynamic and robust reservoir operation rules (Loucks et al.; 1967, Thomas and Reville; 1966, Manne; 1962). The important feature of mathematical programming is consideration of complicated spatial and temporal interactions within the reservoir network and optimizing their operation to achieve the system goal or goals. The optimization method is applied to different applications of rules in reservoir systems in the literature. Optimization of rule curves, like hedging rules. In this case usually evolutionary algorithms are used, like GA (Oliviera and Loucks 1997; Karnatapu et al. 2019).

Optimization of a reservoir network by single-period optimization which is used in

most of commercial softwares such as WEAP, MODSIM, RiverWare, MIKEBasin, RIBASIM and HECReSIM (Close et al. 2003; Lucas 2018; Shafer and Labadie 1978; Charalampos et al. 2015; Ngo et al. 2016; Ortiz-Partida et al. 2016). The third class of optimization application is for multi-period optimization of reservoir networks, which is the method to be used in this research, too (Cai et al. 2001a, Cai et al. 2001b, Cai et al. 2003, Schluter et al. 2005, Seifi and Hipel 2001, Pallottino et al. 2005). Actually, upstream development and climatic changes made meaningful variations in river flow regimes, where the flow regime in next time steps for a downstream reservoir will be affected with more factors compared with 1990's, where only one or two factor could be identified. The multi-period multi-purpose reservoir operation models can cope with a huge number of factors that affect the flow regime and availability temporally and spatially. This approach is able to integrate different disciplines or factors and produce an optimum decision where all stakeholders are considered and benefit from it (Cai et al. 2003). In a research on eastern Nile basin, HECResSIM, which uses a single-period optimization model, is used to evaluate the cumulative impacts of basin development on downstream water users. It is used for different operation scenarios development to be evaluated under different climatic conditions (Belachew and Mekonen 2014). Blue Nile River Basin riparian countries Sudan and Ethiopia have agreed to collaborate in development of its water resources for sustainable socio-economic growth. Blue Nile has high potentiality for hydropower and irrigation development. However, impacts of upstream development on downstream are not well studied. McCartney modeled the Blue Nile resources system by WEAP for studies of upstream development on downstream. The model represents the current and the future state of the Blue Nile Riverbasin system according to the basin master plan. WEAP analysis predicts that upstream development in Ethiopia will decrease the flow in Khartoum in wet season, while the flow during January to May increase due to flow regulations (McCarteny et. Al. 2009).

Blue Nile System including Roseires, Sennar and GERD dams are simulated to understand what will be quantified value of cooperation in a trans-boundary riverbasin (Basheer et al. 2018). Efficient utilization of the limited Water, Energy, and Food (WEF) resources in stressed transboundary river basins requires understanding their interlinkages in different transboundary cooperation conditions. The Blue Nile Basin, a transboundary river basin between Ethiopia

and Sudan, is used to illustrate the impacts of cooperation between riparian countries on the Water-Energy-Food nexus (WEF nexus). These impacts are quantified and evaluated using a daily model that simulates hydrological processes, irrigation water requirements, and water allocation to hydro-energy generation and irrigation water supply. Satellite-based rainfall data are evaluated and applied as a boundary condition to model the hydrological processes. The model is used to determine changes in the long-term economic gain (i.e. after infrastructure development plans are implemented and in steady operation) for each of Sudan and Ethiopia independently, and for the Blue Nile Basin from WEF in 120 scenarios. Those scenarios result from combinations of three cooperation states: unilateral action, coordination, and collaboration; and infrastructure development settings including the Grand Ethiopian Renaissance Dam and planned irrigation schemes in Sudan. The results show that the economic gain of the Blue Nile Basin from WEF increases with raising the cooperation level between Ethiopia and Sudan to collaboration. However, the economic gain of each riparian country does not necessarily follow the same pattern as the economic gain of the basin (Basheer et al. 2018).

Study Area. The study area for this research is the Roseires and Sennar Dam system shown in Figure 1. The water resources is mainly the flow

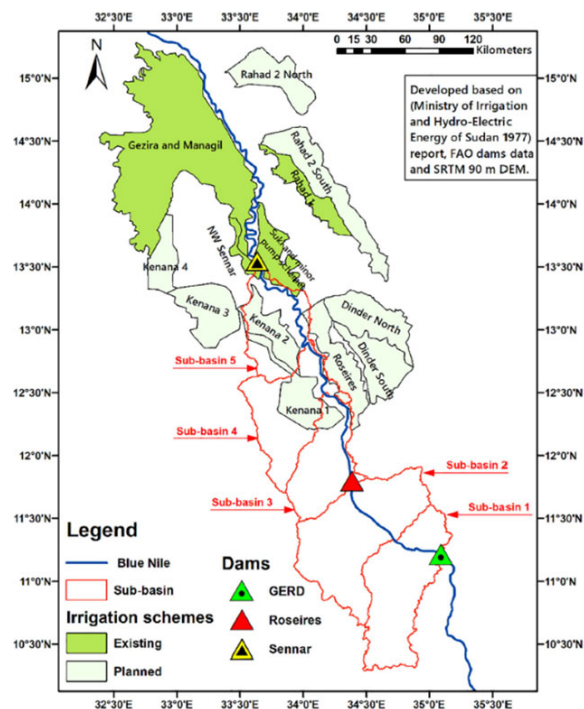


Figure 1. The study area for this research (Basheer et al. 2018)

at ElDeim station and other tributary flows or even return flows from irrigation schemes are not considered for this study due to data accuracy and availability. The irrigation schemes considered here are 9 future schemes and 4 existing schemes, which are shown in Figure 2 and details of them are shown in Table 1. Figure 3 shows the observed historical flow at ElDeim station from 1914 till 2017.

Details of existing and future irrigation schemes are shown in Table 1, where 6 schemes are existing and 9 schemes are to be developed in future. Three crop patterns are considered for these irrigation schemes, existing and future, that their income margin, water demand and total area are shown in Table 2. Based on this Table 2, crop pattern 2 where 39% is sugarcane, 28% cotton and 22% Sesame has the highest water demand and marginal profit.

Roseires and Sennar dams' specification used in this research are shown in Table 3. Figure 4, shows the existing rule curves of the Roseires and Sennar Dam. June to September both reservoir must be at minimum level. May is emptying and October is filling time. The rest of year also both reservoirs are kept full. This rule curves resulted into 67% shortages for Gezira and Managil in some months (Herve Plusquellec; 1990). Existing rule curves are used for comparison with rule curves the multi-period optimization model will generate for coordinated operation of both reservoirs.

Methodology. The methodology outline is shown in Figure 5, where model and scenarios development part of it will be explained in this section. Other parts of the outline are already covered in previous sections. Figure 6 shows

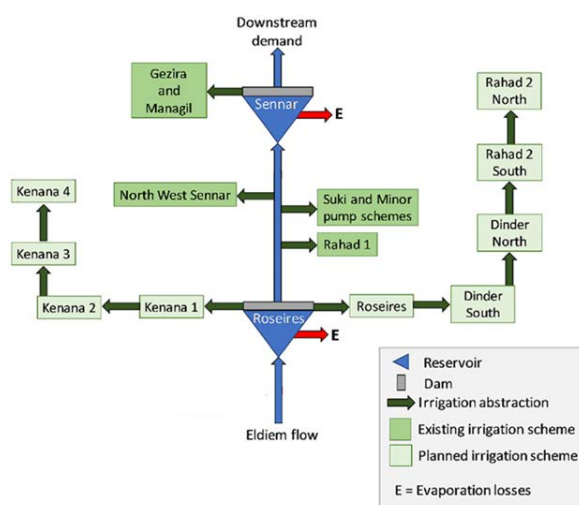


Figure 2. The conceptual model of Roseires-Sennar Dam system (Basheer et al. 2018)

1. Irrigation schemes details

Irrigation Scheme	Total Area ha	Dam	Status
Suki	36500	Roseires	Existing
Rahad 1	168037	Roseires	Existing
Upstream Sennar	117626	Roseires	Existing
Gezira & Managil	1093502	Sennar	Existing
North West Sennar	21000	Roseires	Existing
Rahad 2	268000	Roseires	Future
South Dinder	168000	Roseires	Future
Kenana 1,2,3,4	456000	Roseires	Future
Roseires	123000	Roseires	Future
Dinder South	48000	Roseires	Future

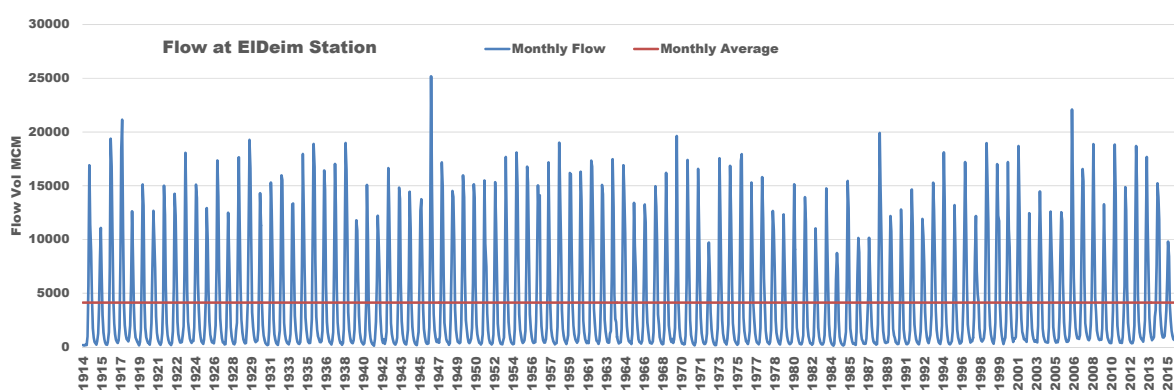


Figure 3. Monthly flow time series 1914–2017

2. Crop pattern scenarios information

Supplying Dam	Total Area ha	CropP1		CropP2		CropP3	
		Income \$/MCM	WR BCM	Income \$/MCM	WR BCM	Income \$/MCM	WR BCM
Roseires Existing	343163	243000	3.261	433000	3.834	320000	3.367
Sennar Existing & Future	1093502	243000	10.392	433000	12.218	320000	10.731
Roseires Future	1404163	293011	10.008	421309	13.346	345006	10.701

3. Roseires and Sennar Dam specifications

Reservoir/Dam Specifications	Roseires	Sennar
Max. Capacity MCM	7400	640
Minimum Operational Capacity MCM	50	220
Max. Level meter	490	421.7
Minimum Operational Level meter	469	417.2
Turbine Headloss m	1.5	0.3
Minimum Downstream flow Requirement MCM/month	*****	150
Leakage MCM/Day	*****	0.2
Year of operation	1966	1925
Lake Area Km ²	627	194
Installed Power MW	280	15
Existing Irrigated Area ha	343,163	1,093,502
Max Release Capacity MCM/Month	44,064	45,619

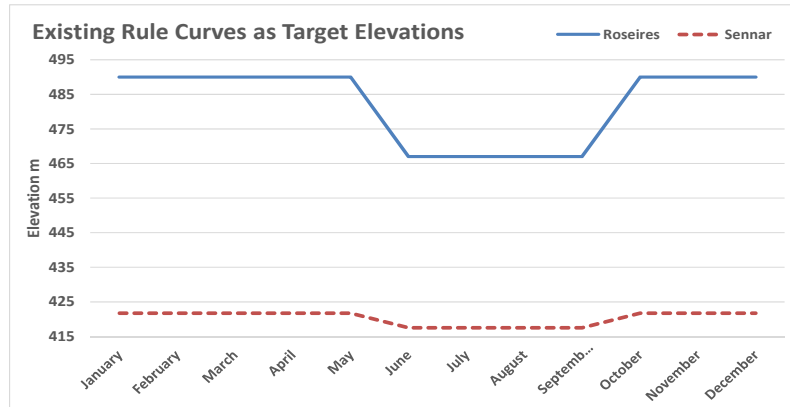


Figure 4. Existing Roseires and Sennar reservoirs' rule curves

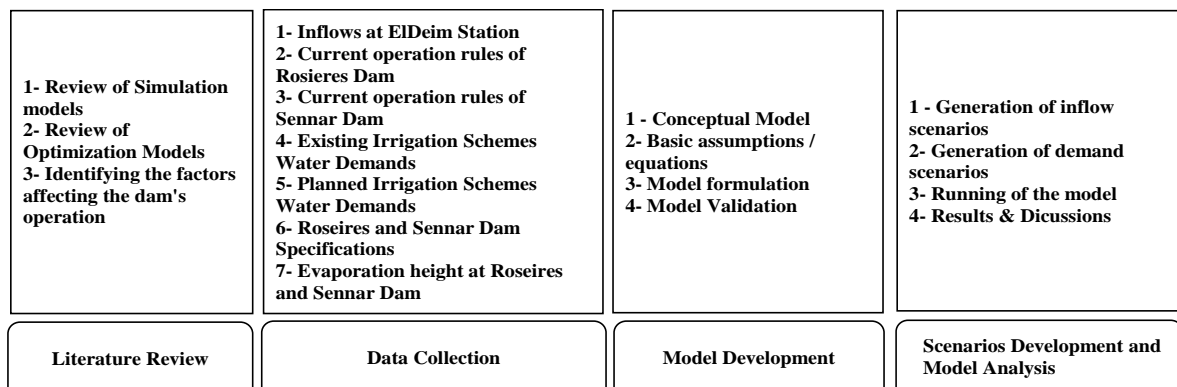


Figure 5. Methodology Outline for this research

the conceptual model for Roseires-Sennar Dam system (RSDS). In this model all the irrigation schemes their supply is from Roseires reservoir release are lumped as one demand node with summation of all water demands. Evaporation and spillage are considered. Released water also can be used for energy generation as much as the turbine system capacity allows. Return flows from irrigation schemes and tributary flows are not included in this model due to their complexity, data availability and also to keep the model in more conservative side. Outflow of the RSDS will flow at downstream of the Sennar Dam towards Khartoum. Minimum flow considered for this downstream demand is 150 MCM per month (ElAmin M.; 2006).

The algorithm of the model analysis in Figure 7 shows how model is run for each scenario and its results are stored and used later for selection of best scenario. To select the best scenario, marginal profit, water supply ratio and energy generation can be considered as factors for ranking of the scenarios and selection of best crop pattern and rule curve. Model mathematical formulation is shown in equations 1 to 19. This system of equations shows a non-linear

multi-period optimization model where is setup on monthly time steps for multiple years. The objective function of the model is annual marginal profit and model is constrained to have end of period storage equal to initial storage (equations 10 and 11), where it is important for reservoir operation. Energy generation equations are non-linear and play an important role in reservoir operation since the reservoir release and storage are coupled in this equation. River flow $RF_{1,y,m}$ is flowing into Sennar reservoir and showing the interaction between Roseires and Sennar reservoirs. This model now considers important factors, upstream-downstream interaction by $RF_{1,y,m}$, energy generation, water supply, downstream minimum flow requirement and marginal profit, which are the main features to be considered in a coordinated operation where all stakeholders benefits are considered. Other important equations of the model are 17 and 19, where lower limit and upper limit on river flow is imposed. Lower limit of 150 MCM per month is the minimum downstream flow requirement, especially after Sennar Dam (ElAmin 2006) and 19620 MCM per month as the upper limit is the safe flow in Blue Nile so that flooding will

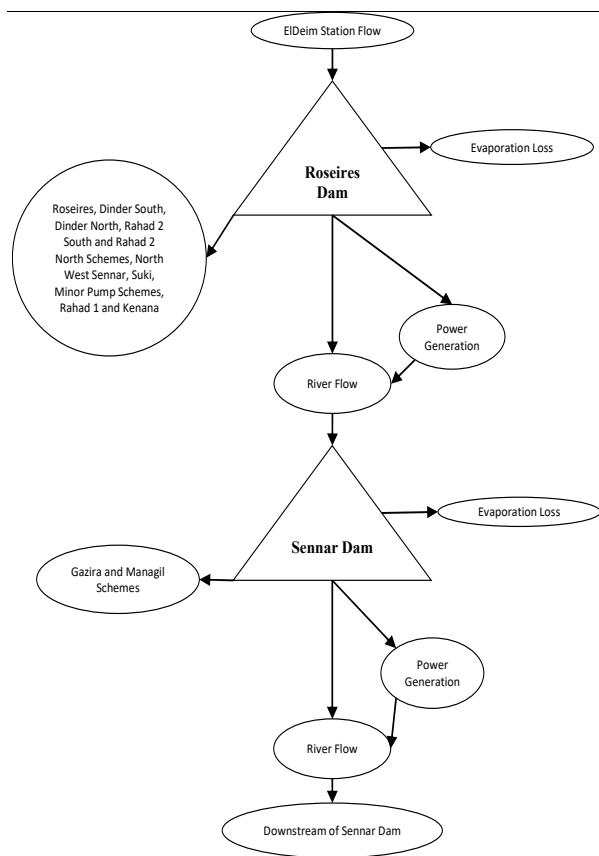


Figure 6. The conceptual model for Roseires-Sennar Coordinated Reservoir Operation

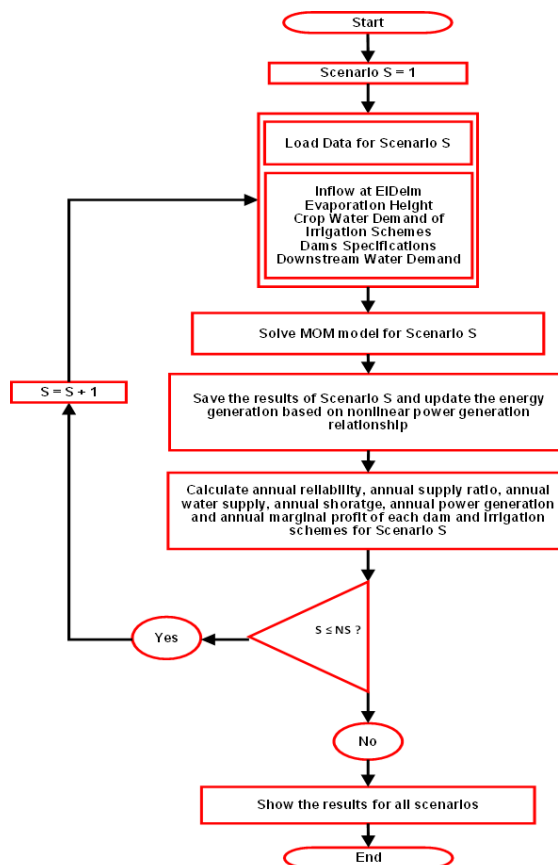


Figure 7. Algorithm of model analysis for coordinated optimal operation of Roseires and Sennar Dam

not happen (Abdo et al. 2005). In this model equations 4 and 7 show the water available for allocation to irrigation schemes. Release from Roseires or Sennar is logically more than water for allocation to irrigation since released water is also for downstream uses as well as irrigation. Parameters and variables of this model are explained in the Table 4.

This model which is a non-linear optimization model is programmed and solved in General Algebraic Modeling System (GAMS www.gams.com) by MINOS solver. To apply this model for the analysis of Roseires-Sennar Dam System scenarios are considered, which reflect future climatic and hydrologic conditions and also suggested conditions for irrigation schemes in Table 5. These 9 scenarios will be considered also with climate change that increase the water requirement by 19%, reservoir evaporation by 19% and reduce the inflow by 25% to make 9 more scenarios to consider totally 18 scenarios. Results of analyzing these scenarios are presented and discussed in next section.

Results and Discussion. In this section results of model analysis will be presented, where first

validation of model will be discussed and later the results of model analysis for 18 scenarios. Model validation is an important process of model application, which is done for observed Roseires and Sennar operation during Nov-1999 till Oct-2000 as shown in Figures 8 and 9.

Figure 8 shows that model operate the Roseires reservoir to store more water while supplying the water demand fully. More water storage has important implications for energy generation and reservoir operation since model is multi-period and has knowledge of future till Oct-2000, decides in a more efficient way about how much water to store and how much to release. The same idea applies to Sennar reservoir operation by model in Figure 9, where storage and release is coordinated with Roseires reservoir operation and storage follows the pattern of water demand and release also follows the same pattern, while by more storage of water energy generation also benefit from it. In observed operation of Sennar reservoir which follows the existing rule curve, reservoir is emptied in May and is kept empty in rest of year so it can not use the flow or storage potential for energy generation, since before April low flow months are there and in June

4. Parameters and variables definition for mathematical model of Roseires and Sennar Dam

Max. $Z - \sum_y MP_y$	Objective Function Annual Marginal Profit	(1)
Subject to:		
$S_{1,y,m} + Q_{1,y,m} - Ev_{1,y,m} - R_{1,y,m} - Sp_{1,y,m} = S_{1,y,m+1}$	Roseires Reservoir Water Balance Equation	(2)
$S_{2,y,m} + RF_{2,y,m} + Q_{2,y,m} - Ev_{2,y,m} - R_{2,y,m} - Sp_{2,y,m} = S_{2,y,m+1}$	Sennar Reservoir Water Balance Equation	(3)
$R_{1,y,m} \geq WA_{1,y,m}$	Available water for allocation at Roseires Downstream	(4)
$WA_{1,y,m} + WASL_{1,y,m} \geq D_{1,y,m}$	Water demand balance equation at Roseires Downstream	(5)
$R_{1,y,m} + Sp_{1,y,m} = WA_{1,y,m} + RF_{1,y,m}$	Water Balance in Roseires Reservoir Downstream	(6)
$R_{2,y,m} \geq WA_{2,y,m}$	Available water for allocation at Sennar Downstream	(7)
$WA_{2,y,m} + WASL_{2,y,m} \geq D_{2,y,m}$	Water demand balance equation at Sennar Downstream	(8)
$R_{2,y,m} + Sp_{2,y,m} = WA_{2,y,m} + RF_{2,y,m}$	Water Balance in Sennar Reservoir Downstream	(9)
$S_{1,y,1} = S_{1,y,13}$	This equation enforces initial storage be equal to final storage, which is important in reservoir operation since you are sure at the	(10)
$S_{2,y,1} = S_{2,y,13}$	End of year you are at the same level that you start	(11)
$Ev_{1,y,m} = e_{1,y,m} \times [f_1 + f'_1 \times (S_{1,y,m} + S_{1,y,m+1})]$	Evaporation volume from Roseires Reservoir	(12)
$Ev_{2,y,m} = e_{2,y,m} \times [f_2 + f'_2 \times (S_{2,y,m} + S_{2,y,m+1})]$	Evaporation volume from Sennar Reservoir	(13)
$En_{1,y,m} = F \times h_1 \times g \times R_{1,y,m} \times (g_1 + g'_1 \times S_{1,y,m} - HL_1)$	Energy generation of Roseires Reservoir	(14)
$En_{2,y,m} = F \times h_2 \times g \times R_{2,y,m} \times (g_2 + g'_2 \times S_{2,y,m} - HL_2)$	Energy generation of Sennar Reservoir	(15)
$SMin_1 \leq S_{1,y,m} \leq SMax_1$	Upper and Lower Limit of Roseires reservoir operation	(16)
$150 \leq RF_{1,y,m} \leq 19620$	Upper and Lower Limit on reservoir release (Lower limit is minimum downstream flow requirement and upper limit is maximum flow in normal year as an indication of safe river flow in Blue Nile)	(17)
$SMin_2 \leq S_{2,y,m} \leq SMax_2$	Upper and Lower Limit of Sennar reservoir operation	(18)
$150 \leq RF_{2,y,m} \leq 19620$	Upper and Lower Limit on reservoir release (Lower limit is minimum downstream flow requirement and upper limit is maximum flow in normal year as an indication of safe river flow in Blue Nile)	(19)

where:

r, y, m – r is index for dams, $\underline{1}$ is for Roseires and $\underline{2}$ is for Sennar. m is index for month and y is index for year.

$D_{r,y,m}$ – Monthly water demand of irrigation schemes to be supplied from Roseires Dam if $r=1$ and from Sennar Dam if $r=2$. (MCM)

$e_{1,y,m}$ – Monthly evaporation height from each reservoir (mm)

$En_{r,y,m}$ – Monthly energy generated by each reservoir (GWh)

$Ev_{r,y,m}$ – Monthly evaporation volume from reservoirs (MCM)

F – Conversion factor in energy equation to change power to monthly energy

f_r – Coefficient in linearizing the Area-Volume relationship for reservoirs

f'_r – Unknown factor in linearizing the Area-Volume relationship for reservoirs

g_r – Coefficient in linearizing the Elevation-Volume relationship for reservoirs

g'_r – Coefficient in linearizing the Elevation-Volume relationship for reservoirs

HL_r – Turbine Headloss for each reservoir (m)

$HMax_r$ – Maximum Level in each reservoir (m)

MP_y – Annual Marginal Profit (\$)

$Q_{r,y,m}$ – Tributary flow to the Roseires or Sennar Dam. If $r=1$ then it is flow at ElDeim Station. If $r=2$ then it is tributary flow to Sennar Dam, which is assumed 0 in this research. (MCM)

$R_{r,y,m}$ – Monthly release from reservoirs (MCM)
 $RF_{r,y,m}$ – Monthly Blue Nile River flow at downstream of Roseires Dam if $r=1$ and at downstream of Sennar Dam if $r=2$. (MCM)
 $RMax_r$ – Maximum Monthly Release for each reservoir (MCM)
 $S_{r,y,m}$ – Reservoir Monthly Storage (MCM)
 $SMax_r$ – Maximum Capacity of each reservoir (MCM)
 $SMin_r$ – Minimum Operational Storage of each reservoir (MCM)

$Sp_{r,y,m}$ – Monthly spillage from reservoirs (MCM)
 $WA_{r,y,m}$ – Monthly available water for allocation from each reservoir (MCM)
 $WASL_{r,y,m}$ – Monthly deficit if water supply to irrigation demand (MCM)
 Z – Cumulative Marginal Profit of the Roseires-Sennar Dam System for the whole planning period (\$)
 γ – Specific weight of Water 9810 N/m³
 η_r – Turbine Efficiency for each dam, considered 90% as default

5. Scenarios made for analysis by

Flow Condition	Crop Patterns	Scenarios
NY – Normal Year, 50% Exceedance – 1973	CP1	S1
	CP2	S2
	CP3	S3
DY – Dry Year, 75% Exceedance – 1965	CP1	S4
	CP2	S5
	CP3	S6
VDY – Very Dry Year, 80% Exceedance – 1980	CP1	S7
	CP2	S8
	CP3	S9

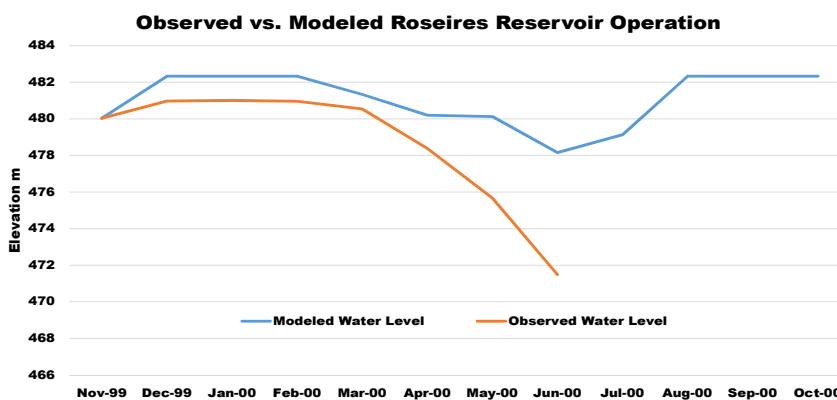


Figure 8. Roseires reservoir operation

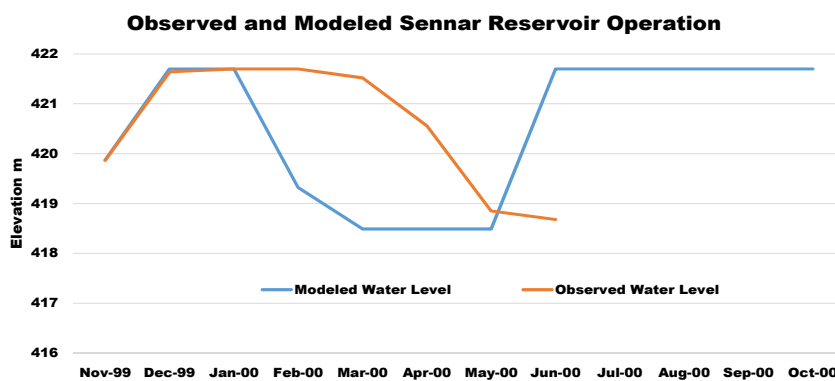


Figure 9. Sennar reservoir operation

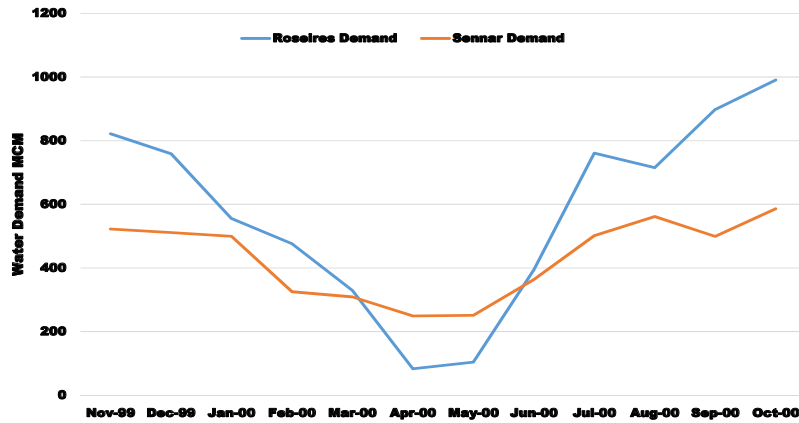


Figure 10. Water demand to be supplied from each dam

where high flows occur reservoir is kept empty. In coordinated operation more water is stored in Roseires, by emptying the Roseires less while considering flood constraint and letting Sennar make use of water flow and reservoir storage as much as possible for water supply and energy generation. It is clear from this validation run of the model that coordinated reservoir operation for Roseires-Sennar Dam system operated the system with a clear more efficiency in resources utilization, which is expected from a multi-period optimization model.

After validation process, how scenarios are made will be explained through the figures 11 and 12. Figure 11 shows the selected inflow scenarios, which exemplify the Normal, Dry and Very Dry years in Blue Nile River at ElDeim station. The years 1973, 1965 and 1980 are exemplifying the Normal, Dry and Very Dry years in Blue Nile River. Annual flow for each inflow scenario is 48902 MCM, 43365 MCM and 42679 MCM according to Normal, Dry and Very years. For water demands, as mentioned before three crop patterns are considered that include 7 crops within

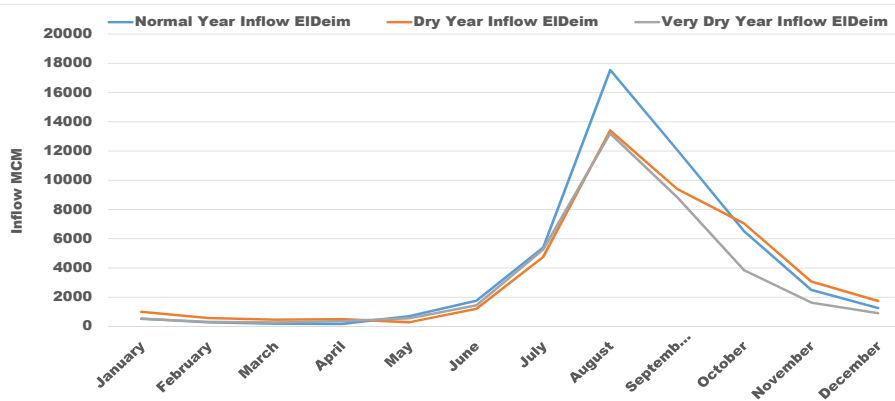


Figure 11. Inflow scenarios at ElDeim Station

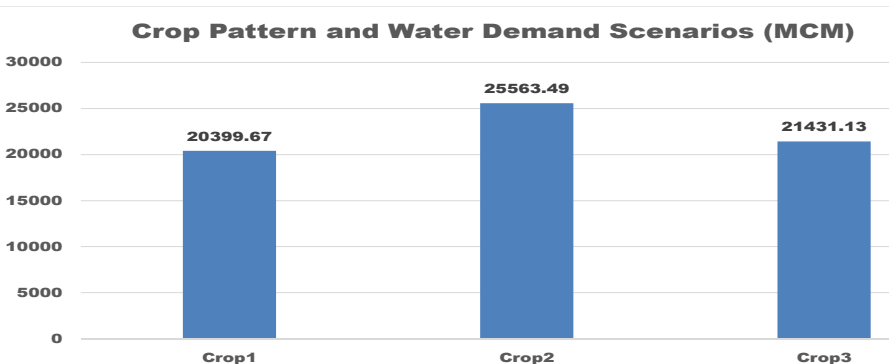


Figure 12. Crop patterns water demand

each scenario but with different mix percentage. Crop pattern 1, Crop1, has 14.3% for each crop, crop pattern 2, Crop2, where Sugarcane 39%, Cotton 28% and Sesame 22% have share in crop mix. Crop pattern 3, Crop3, on the other hand has Sugarcane 20%, Cotton 20% and Sesame 20% and rest of crops 10%. Total water demand of each crop pattern is shown in Figure 12.

It is noteworthy that climate change is predicted to reduce the flow at ElDeim by 25%, increase the

evaporation and evapotranspiration by 19%. This means in scenarios with consideration of climate change, water demands increase 19% and inflow at ElDeim will decrease 25%. The results of applying model for obtaining coordinated operation rule curves are shown in Figures 13 to 25.

In figures 13 to 20 rule curves are obtained from optimal coordination of both reservoirs for a typical normal year, dry year and very dry year. Pattern of emptying and filling is totally different

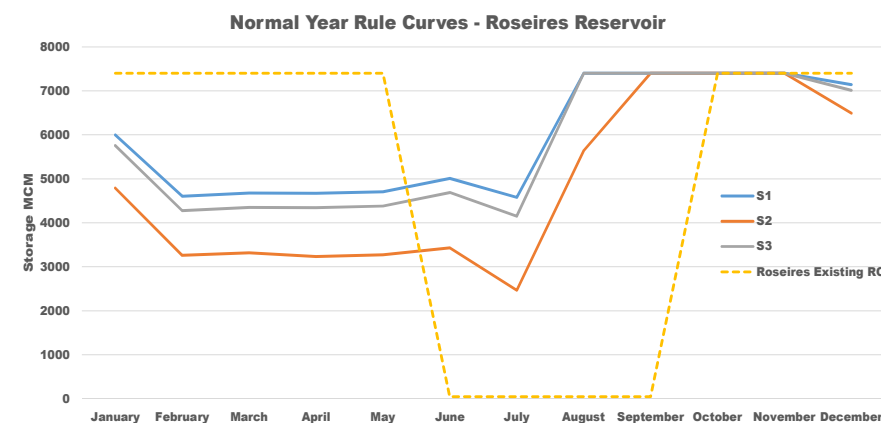


Figure 13. Normal Year Rule Curve for Roseires Reservoir

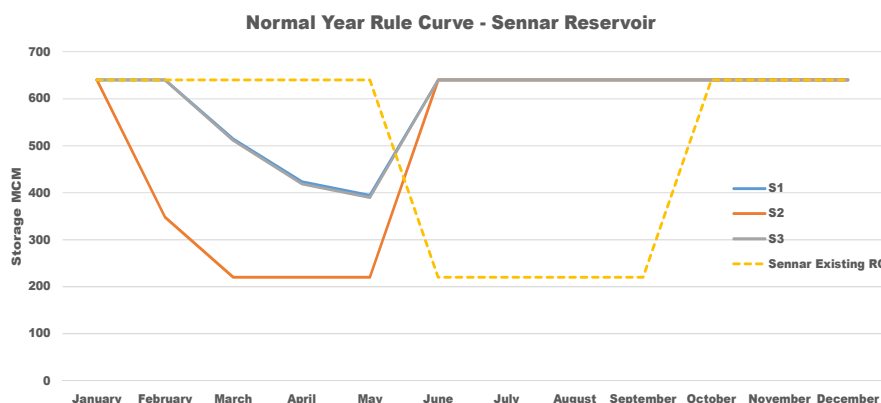


Figure 14. Normal Year Rule Curve for Sennar Reservoir

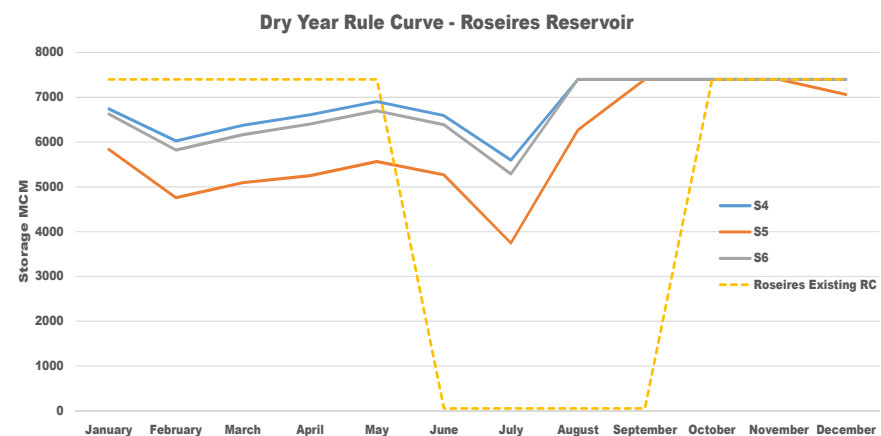


Figure 15. Dry year rule curve for Roseires Reservoir

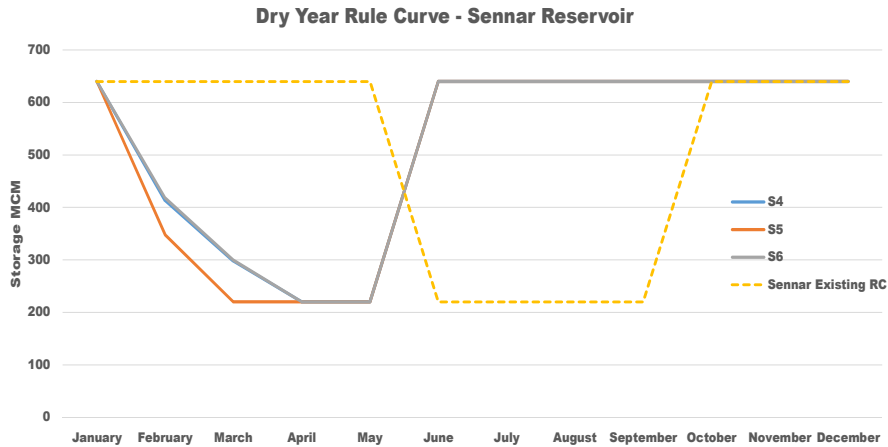


Figure 16. Dry year rule curve for Sennar Reservoir

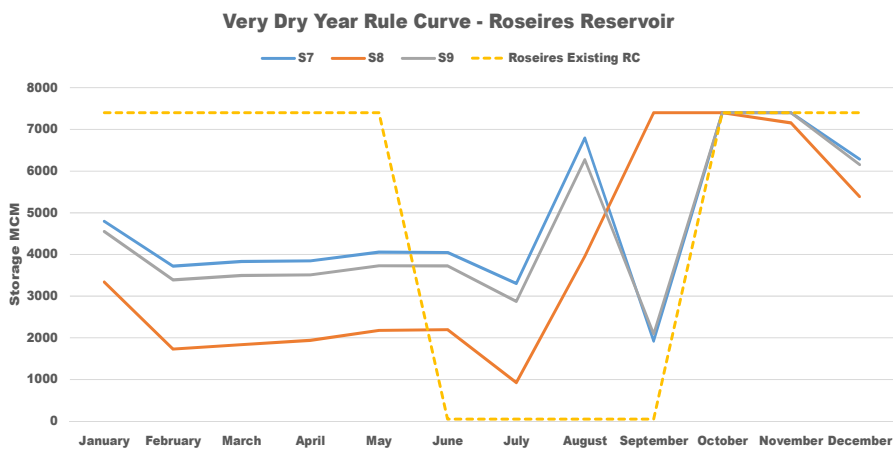


Figure 17. Very Dry year rule curve for Roseires Reservoir

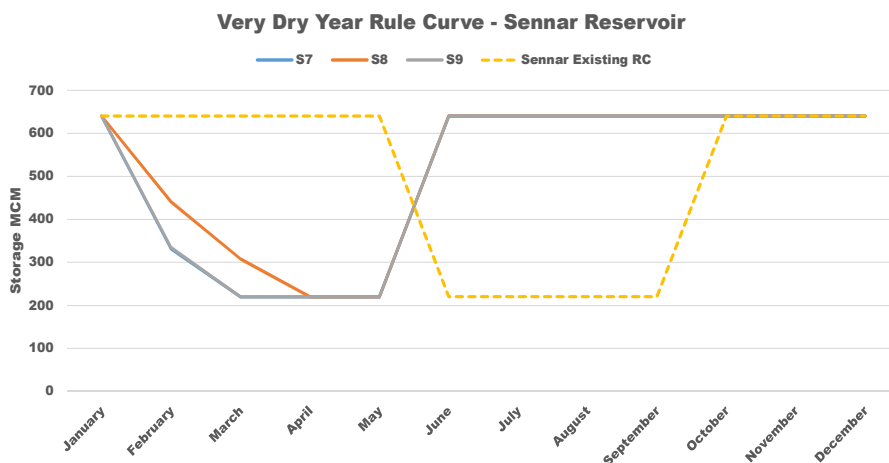


Figure 18. Very Dry year rule curve for Sennar Reservoir

for Roseires from Existing Rule curve as shown in Figures 13, 15, 17 and 19. Aside from different pattern the amount of emptying of the reservoir is different for Roseires reservoir. Rule curve decides to store more water and two times per year emptying and filling is happening. November to February is first emptying, February to June is gentle filling,

emptying again more in July, filling in August and September and September till November reservoir is kept full. This pattern is totally different from existing pattern, which is shown in all figures. Pattern of Emptying and Filling of Sennar Dam seems to some extent the same as existing rule curve but with a shift in emptying and filling time.

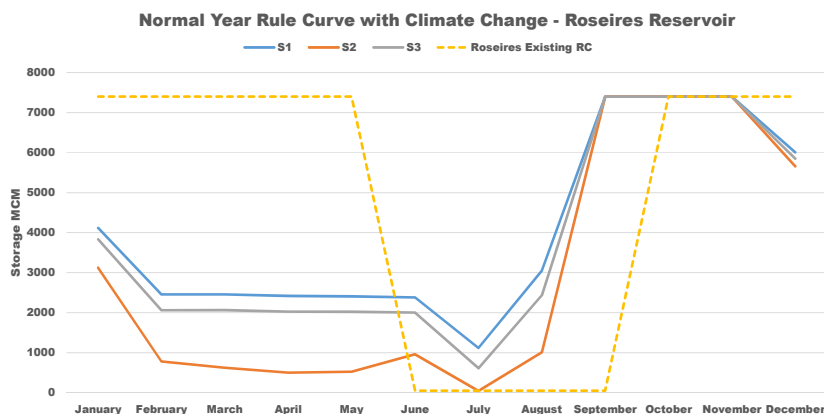


Figure 19. Normal year under climate change rule curve for Roseires Reservoir

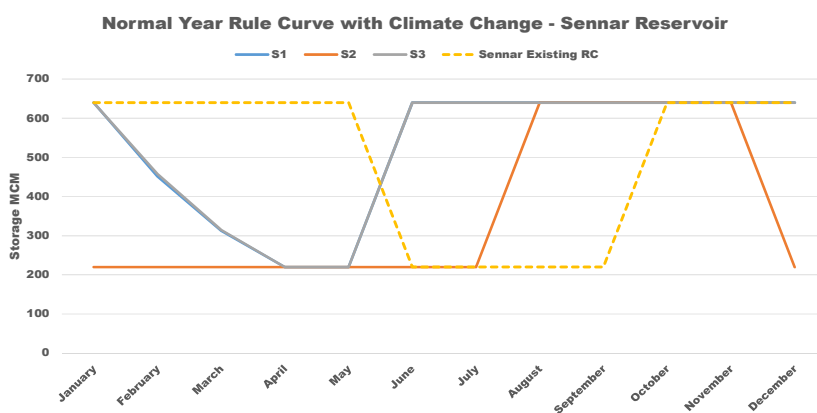


Figure 20. Normal year under climate change rule curve for Sennar Reservoir

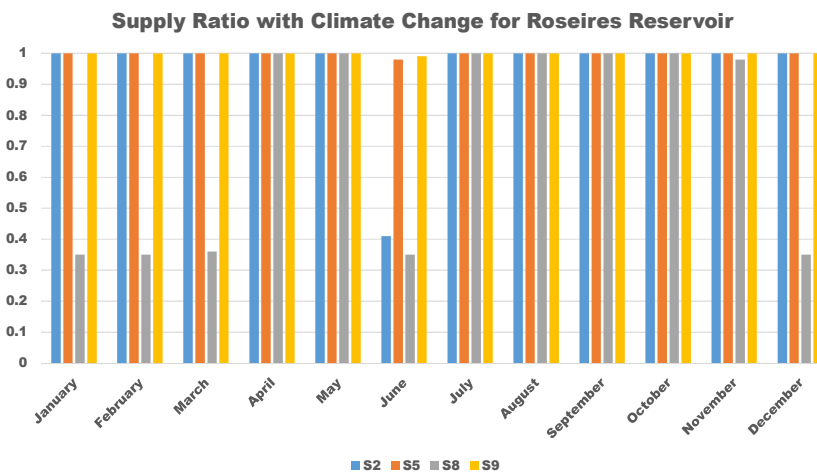


Figure 21. Effect of climate change on water supply from Roseires Reservoir

Emptying starts from January to March, March to May reservoir is kept at minimum level, May and June are filling time and July till December Sennar reservoir is kept full.

Generally these rule curves obtained from optimal coordinating of reservoir operation are totally different from existing rule curves. It

indicates that the coordinated optimal rule curves are influenced by the inflow regime, water demand pattern, evaporation and upper-lower limits on reservoir operation on the contrary to existing rule curves that are simple and just empty or fill the reservoir to the minimum and maximum operation level. The amount of emptying the Roseires

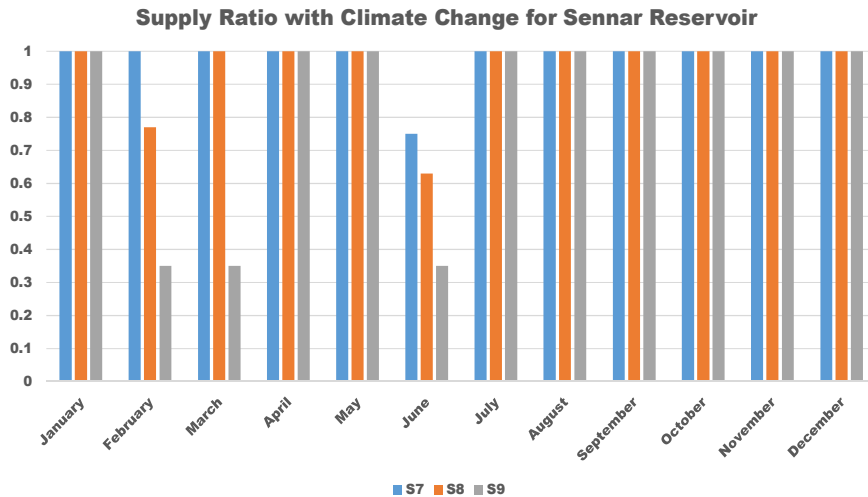


Figure 22. Effect of climate change on water supply from Sennar Reservoir

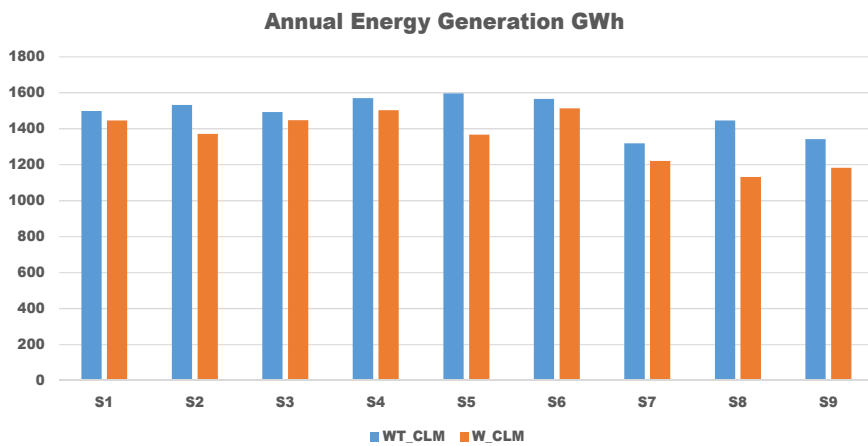


Figure 23. Annual energy generation for each scenario

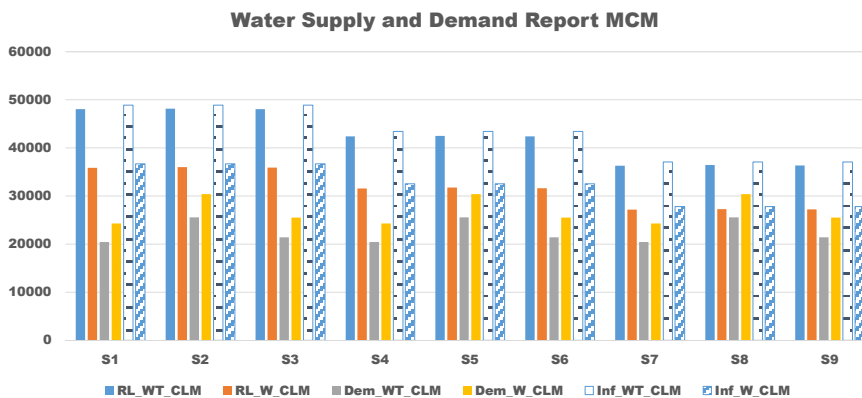


Figure 24. Annual water supply, release and demand

reservoir in dry year is less compared with normal year and it is due the less amount of water in a dry year so water is stored more since spillage also is less probable compared with a normal year. However, for Sennar reservoir as the flow regime becomes dry and dryer rule curves of crop pattern 1 and 3 start to get close to each other.

The same shape of existing rule curve and coordinated rule curve for Sennar reservoir with a shift in emptying and filling time is due to regulated river flow entering Sennar reservoir from Roseires reservoir. This regulated flow is influenced by water demand at Sennar downstream at Gazira and Managil so the shape of rule curve is less

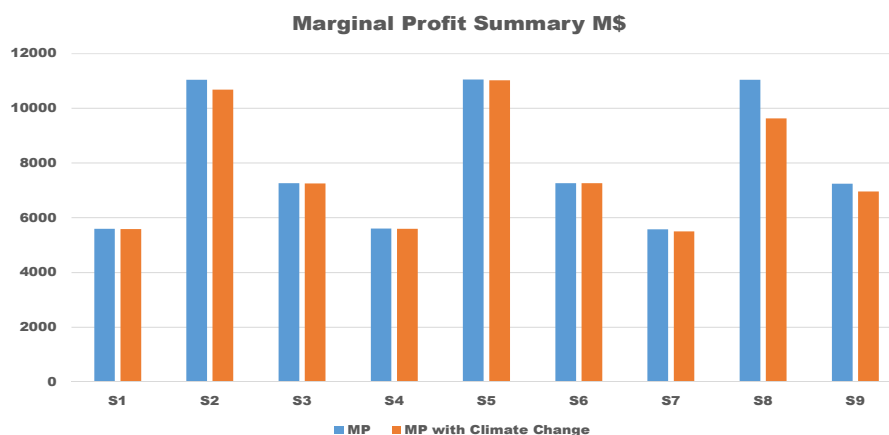


Figure 25. Annual marginal profit for each scenario

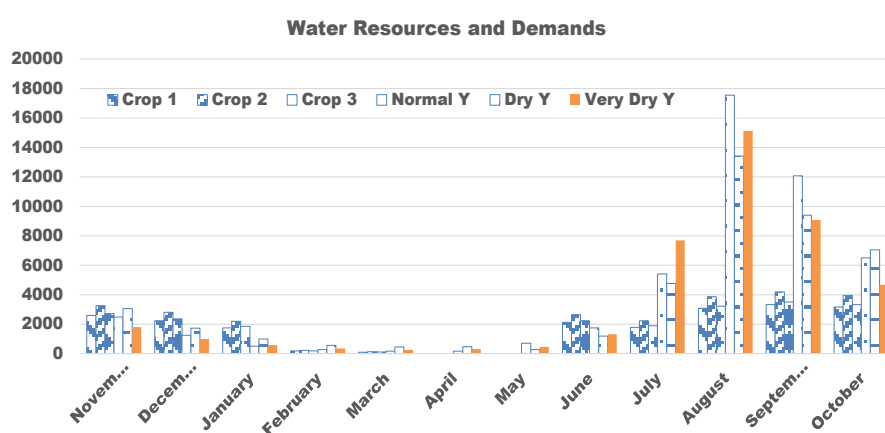


Figure 26. ElDeim flow and water demands for all scenarios

fluctuating and complies with demand pattern that empties and fills once per year.

In very dry year condition Roseires reservoir has three empty and filling. It is clear that as inflow conditions become more limited the emptying and filling especially during the high flow time becomes more to make use of high flow time as much as possible. When climate change is happening in normal year for example, Roseires emptying is happening two times and reservoir empties more compared with normal year without climate change to supply the water demands better. Important point about the Sennar reservoir rule curve, is a clear difference between rule curves of crop1 and crop 3 with crop 2. It shows that in very limited conditions of flow, water demand shows its effect more in the rule curve. However the shape of rule curve is still following the same shape as other rule curves but with a clear shift.

In conditions without climate change all water demands can be supplied in all crop pattern scenarios. Even the energy generation can be fulfilled up to 1600 GWh per year. With climate change especially in very dry condition shortages

will happen even with a coordinated operation, like scenario S8, where crop pattern 2 in very dry condition under climate change. These set of scenarios, S7, S8 and S9, show a very extreme condition in reservoir operation. From water demand point of view scenarios S2, S5 and S8 with climate change also exemplify the critical conditions of water supply, where shortage in supplying water reach up to 67% in S8, where very dry condition and climate change happens together. The same shortages are occurring in climate change for Sennar reservoir but in scenarios S7, S8 and S9 that belong to very dry condition under climate change.

Monthly hydrograph of flow at ElDeim station has a clear low flow, during December to May, and high flow during July to November. This low flow part has a very critical role in water supply and its shortage as shown in Figure 26. Months November, December, January and June are months that demand is higher than river flow and February till May the flow is also very low even less than Blue Nile River minimum downstream demand. Reservoir storage capacity of Roseires and Sennar is not enough to store water in July

till October for November till June, especially in very dry years under climate change, when flow reduce by 25%. Figure 25 shows clearly that by coordinated reservoir operation marginal profit can be maintained even in climate change condition. In the worst case that is S8 scenario under climate change where 13% reduction happens in marginal profit. It is noteworthy that in the same scenario S8, 22% reduction happens for energy generation and its marginal profit. In normal conditions crop pattern 2 is the best option for irrigation schemes. In climate change condition crop pattern 1 is the best option for irrigation schemes.

Conclusion. In this research problem of modeling coordinated reservoir operation for Roseires and Sennar reservoirs is addressed to obtain optimal rule curves to supply the water for irrigation schemes, energy generation and downstream water demands. A multi-period linear optimization model for Roseires-Sennar Dams' reservoirs operation developed that determines the optimal release and storage of water from dams as well as allocation to irrigation schemes and energy generation to have the optimal cumulative marginal profit over the analysis horizon. Model has been validated through equations consistency check after solution, and comparison with observed

operation during 1999-2000. 18 scenarios are considered for inflow at ElDeim, water demand, and climate change which address the questions of interest for stakeholders.

Roseires-Sennar Dam System is analyzed for 18 scenarios and coordinated rule curves are obtained for reservoir operation. In normal conditions of flow, crop pattern 2 is the most recommended with more than 11 Billion USD marginal profit and fully supplying the water demand and 1530 GWh energy generation per annum. The rule curves of the Roseires and Sennar reservoirs prescribe a totally different pattern of emptying and filling. Roseires-Sennar Dams system in a normal year under climate change can produce 10.688 Billion USD marginal profit and 1371 GWh per year energy. It shows that model could manage the system performance so that climate change decrease the marginal profit by 3,27%, while inflow is reduced by 25% and water demands and evaporation increased by 19%. Energy generation under climate change has decreased by 10,5%, which is the most affected sector. In very dry conditions crop pattern 1 is more suitable to be practiced. Impact of GERD can be interpreted as if GERD release the flow to comply with normal year, dry year or very dry year flow at ElDeim station, then with or without climate change what crop patterns are suitable.

References

1. Abdellatif, M.E.M. (2004). Operation of Roseires and Sennar Dams Using Artificial Neural Network, MSc. Thesis, University of Khartoum, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Civil Engineering.
2. Abdo, G., & Sonbol, M. (2005). Flood Frequency Analysis for the Eastern Nile. FRIEND/NILE Conference, Sharm El Sheikh, Egypt.
3. Basheer, M., Wheeler, K.G., Ribbe, L., Majdalawi, M., Abdo, G., & Zagana, E.A. (2018). Quantifying and evaluating the impacts of cooperation in transboundary river basins on the Water-Energy-Food nexus: The Blue Nile Basin. *Science of the Total Environment*, 630, 1309–1323.
4. Belachew, A., and Mekonen, Z. (2014). Eastern Nile Basin Water System Simulation Using Hec-ResSim Model. *International Conference on the Hydroinformatics*. CUNY Academic Works. 8-1-2014.
5. Bower, B.T., Hufschmidt, M.M., & Reedy, W.W. (1962), Operating procedures: Their role in the design of water-resources systems by simulation analyses, in *Design of Water-Resource Systems*. A. Maass (Ed.). Cambridge: Harvard Univ. Press.
6. Cai, X, McKinney, D.C., & Lasdon, L.S. (2003). Integrated hydrologic-agronomic-economic model for river basin management, *Journal of water resources planning and management*, 129(1), 4–17.
7. Cai, X, McKinney, D.C., & Lasdon, L.S. (2001). Piece-by-piece approach to solving large nonlinear water resources management models, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(6), 363–368
8. Cai, X, McKinney, D.C., & Lasdon, L.S. (2001). Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach, *Advances in Water Resources* 24(6), 667–676.
9. Doulgeris, C., Pantazis, G., Papadimos, D., & Papamichail, D. (2015) Water allocation under deficit irrigation using MIKE BASIN model for the mitigation of climate change. *Irrigation Science*, 33(6), 469–482.
10. Close, A., Haneman, W.M., Labadie, J.W., & Loucks, D.P. (Chair), Lund, J.R., McKinney, D.C. and Stedinger J.R. (2003). A Strategic Review of CALSIM II and its Use for Water Planning,

Management, and Operations in Central California. California Bay Delta Authority Science Program, Association of Bay Governments. Oakland:California.

11. Elamin, M., (2006). Hydro-electric Power Technical and Economical Features. Master's Thesis. Khartoum: University of Khartoum.
12. GAMS. (2021). General Algebraic Modeling System. Retrieved from: www.gams.com
13. Gelete, G., Gokcekus, H., & Gichamo, T. (2020). Impact of climate change on the hydrology of Blue Nile basin, Ethiopia: A review. *Journal of Water and Climate Change*, 11(4), 1539–1550.
14. Klemes, V. (1977). Value of information in reservoir optimization. *Water Resources Research*, 13(5), 850–857.
15. Karnatapu, L.K., Annavarapu, S.P., & Nanduri, U.V. (2020). Multi-Objective Reservoir Operating Strategies by Genetic Algorithm and Nonlinear Programming (GA–NLP) Hybrid Approach. *J. Inst. Eng. India Ser. A.*, Vol. 101., Issue 1., 105–115.
16. Loucks, D.P. (1967) Computer models for reservoir regulation. Reprint 534. American Society of Civil Engineers Conference Reprint, 16–20.
17. Loucks, D.P., Stedinger, J.R. & Haith, D. A. (1981). *Water Resources Systems Planning and Analysis*. Englewood Cliffs : Prentice-Hall.
18. Lucas, E.C.G. (2018). Application of HEC-ResSim in the study of new water sources in the Panama Canal. *Journal of Applied Water engineering and Research*, Vol. 6, Issue 3, 236–250.
19. Maass, A., Hufschmidt, M.M., Dorfman R., Thomas, H.A. Jr, Marglin, S.A. and Fair G.M. (1962). *Design of Water-Resource Systems*. Cambridge : Harvard Univ. Press.
20. Manne, A.S. (1962). Product-mix alternatives: flood control electric power and irrigation. *International Economic Review*. 3(1):3&59.
21. McCartney, M.P., Ibrahim, Y.A., Sileshi, Y., & Awulachew, S.B. (2009). Application of the Water Evaluation and Planning (WEAP) Model to Simulate Current and Future Water Demand in the Blue Nile, Intermediate Results Dissemination Workshop, 78–88.
22. Ngo, L.A, Masih I., Jiang, Y., & Douven, W. (2016) Impact of reservoir operation and climate change on the hydrological regime of the Sesan and Srepok Rivers in the Lower Mekong Basin, *Climate Change*, 1–13.
23. Nile Basin Initiative, (2017). Retrieved from: <https://nilebasin.org/>
24. Plusquellec, H., (1990). The Gezira Irrigation Scheme in Sudan, Objective, Design and Performance, World Bank Technical Paper. No 120. Washington D.C.
25. Oliveira, R., & Loucks, D.P. (1997). Operating rules for multireservoir systems. *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 4, 839–852.
26. Ortiz-Partida, J.P., Lane, B.A., & Sandoval-Solis, S. (2016) Economic effects of a reservoir re-operation policy in the Rio Grande/Bravo for integrated human and environmental water management. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 8, 130–144.
27. Pallottino, S., Sechi, G.M., & Zuddas, P. (2005). A DSS for Water Resources Management under Uncertainty by Scenario Analysis, *Environmental Modelling and Software* 20(8), 1031–1042.
28. Rippl, W. (1883). The capacity of storage-reservoirs for water-supply. (Including plate). Minutes of the proceedings of the institution of civil engineers, 270–278.
29. Schluter, M., Savitsky, A.G., McKinney, D.C., & Lieth, H. (2005). Optimizing long-term water allocation in the Amudarya River delta: a water management model for ecological impact assessment. *Environmental Modelling & Software*, 20, 529–545.
30. Seifi, A., & Hipel, K.W. (2001), Interior-Point Method For Reservoir Operation With Stochastic Inflows. *J. Water Resour. Placnn. Manage.* No. 1(127), 48–57.
31. Shafer, J., & Labadie, J. (1978). Synthesis and calibration of a river basin water management model, Completion Report No. 89, Colorado Water Resources Research Institute, Colorado State University, Ft. Collins.
32. SMEC. (2021). Retrieved from: <http://www.smecc.com/70years/portfolio/roseires-dam-heightening/>
33. Thomas, H. A., Jr., & Burden, R. P. (1963). *Operations Research in Water Quality Management, Engineers*, Vol. 71, 270–278. Harvard University.
34. Thomas, H. A., Revelle, Jr., & Revelle, R. (1966). On the efficient use of the high Aswan Dam for hydropower and irrigation. *Management Science*. 12(8): B296–B311.
35. Roseires Dam, (2020). Wikipedia, www.wikipedia.com
36. You, J., & Cai, X. (2008) Hedging rule for reservoir operations: A theoretical analysis. *Water Resources Research*, vol. 44, W01415, 1–9.

Тоайба Заїн Еабдін Саад Омер, Сіддіг Е. Ахмед, Акбар Карімі
Оптимальна експлуатація каскаду багатоцільових водосховищ
на прикладі водосховищ Розейрез та Сеннар

Анотація. Система дамб Розейрез-Сеннар (СДРС) у нижній частині річки Блакитний Ніл відіграє життєво важливу роль у забезпеченні водою систем зрошення Судану. Існуючі диспетчерські графіки експлуатації для цих систем були розроблені і впроваджені в 1925 і 1966 років для водосховищ Сеннар і Розейрез відповідно. Впровадження нових зрошувальних систем, підтверджений вплив зміни клімату на річку Блакитний Ніл і розвиток територій вище за течією в Ефіопії, а також підвищення дамби Розейрез з висоти 480 до 490 м над рівнем моря показали, що СДРС втрачає свою ефективність з точки зору повного задоволення потреб в постачанні водою. У літературних джерелах розглядається моделювання дамб Розейрез та Сеннар з метою знайти найкращі скоординовані диспетчерські графіки управління за умов обмеженої кількості правил експлуатації водосховищ, які мінімізують вплив розбудови територій, зростання попиту на воду та зміни клімату на водопостачання для забезпечення різноманітних потреб на річці Блакитний Ніл. Такі рішення є локально оптимальними, оскільки вони не розглядають потенціал зберігання та перенесення об'ємів води водосховищами, що дає змогу перенести неоптимальні (локально оптимальні) рішення на інші часові періоди планування та створити дефіцит в інших часових періодах. Таким чином, метою даного дослідження є знайти оптимальні координуючі правила експлуатації дамб Розейрез та Сеннар за допомогою нелінійної багатоперіодної оптимізаційної моделі, яка враховує зміни клімату, режим стоку та потребу у воді. Ефективність моделі підтверджена практично під час спостережень за роботою водосховищу період з листопада 1999 року до травня 2000 року. Проаналізовано вісімнадцять сценаріїв, які охоплюють нормальний, сухий та дуже сухий режими стоку, а також запропоновано три моделі систем землеробства та проаналізовано вплив зміни клімату.

Результати показують, що в звичайних умовах стоку найбільш рекомендованою є система землеробства 2 з граничним прибутком понад 11 мільярдів доларів США та повним забезпеченням потреби у воді та виробництвом енергії 1530 ГВт-год на рік. Скоординовані диспетчерські графіки експлуатації водосховищ мають зовсім іншу схему спорожнення та заповнення порівняно з існуючими. Диспетчерські графіки змінюються в залежності від водного режиму водосховищ, що доводить те, що зміна умов системи впливає на оптимальні правила роботи. Порівняння граничного прибутку з сценарієм моделювання врожаю 2 показує, що за умов трьох різних сценаріїв щодо забезпеченості опадами – нормального, сухого і дуже посушливого років оптимізаційна модель для різних періодів може забезпечити граничний прибуток вище 11 мільярдів доларів США, скажімо, 11 050, 11 056 і 11,042 мільярдів доларів відповідно, що показує надійність моделі в роботі в будь-яких умовах і забезпечує гарантований прибуток. Однак у цих трьох умовах диспетчерські графіки для водосховища Розейрес відрізняються, тоді як диспетчерські графіки для водосховища Сеннар залишаються майже однакові. Якщо виключити вплив клімату, то модель може повністю забезпечити потреби у воді в будь-яких умовах водо забезпечення. Однак на надійність водопостачання у всіх запропонованих моделях землеробства впливає зміна клімату. Система дамб Розейрес-Сеннар за типовий рік в умовах зміни клімату може виробляти 10,688 млрд доларів граничного прибутку та 1371 ГВт-год енергії на рік.

Це показує, що модель дає можливість керувати роботою системи коли зміна клімату знижує граничний прибуток на 3,27%, тоді як притік води зменшується на 25%, а потреба у воді та випаровування збільшується на 19%. Виробництво енергії в умовах зміни клімату зменшилося на 10,5%, що є найбільш уразливим сектором. Запропоновані системи землеробства 2 і 3 не підходять для умов зміни клімату, оскільки дефіцит води може становити до 65% у разі дуже посушливого року з урахуванням кліматичних змін. У дуже посушливих умовах краще використовувати систему землеробства 1.

Ключові слова: дамба Розейрес – Сеннар, експлуатація водосховища, оптимальна координація, багатоцільове водосховище, довгострокове планування

Тоайба Заїн Эабдин Саад Омер, Сиддиг Э. Ахмед, Акбар Карими
Оптимальная эксплуатация каскада многоцелевых водохранилищ
на примере водохранилищ Розейрез и Сеннар

Аннотация. Система дамб Розейрез-Сеннар (СДРС) в нижней части реки Голубой Нил играет жизненно важную роль в обеспечении водой систем орошения Судана. Существующие диспетчерские графики эксплуатации для этих систем были разработаны и внедрены в 1925 и 1966 годах для водохранилищ Сеннар и Розейрез соответственно. Внедрение новых оросительных систем, подтвержденное влияние изменения климата на реку Голубой Нил и развитие территорий выше по течению в Эфиопии, а также повышение дамбы Розейрез с высоты 480 до 490 м над уровнем моря показали, что СДРС теряет свою эффективность с точки зрения полного удовлетворения потре-

бностей в снабжении водой. В литературных источниках рассматривается моделирование дамб Розейрес и Сеннар с целью найти лучшие скоординированные диспетчерские графики управления при условии ограниченного количества правил эксплуатации водохранилищ, минимизирующих влияние развития территорий, роста спроса на воду и изменения климата на водоснабжение для обеспечения разнообразных потребностей на реке Голубой Нил. Такие решения локально оптимальны, поскольку они не рассматривают потенциал хранения и переноса объемов воды водохранилищ, что позволяет перенести неоптимальные (локально оптимальные) решения на другие временные периоды планирования и создать дефицит в другие временные периоды. Таким образом, целью данного исследования является найти оптимальные координирующие правила эксплуатации дамб Розейрес и Сеннар с помощью нелинейной многопериодной оптимизационной модели, учитывающей изменение климата, режим стока и потребность в воде. Эффективность модели подтверждена практически во время наблюдений за работой водохранилища в период с ноября 1999 года по май 2000 года. Проанализированы восемнадцать сценариев, охватывающих нормальный, сухой и очень сухой режимы стока, а также предложены три модели систем земледелия и проанализировано влияние изменения климата.

Результаты показывают, что в обычных условиях стока наиболее рекомендована система земледелия 2 с предельной прибылью более 11 миллиардов долларов США и полным обеспечением потребности в воде и производстве энергии 1530 ГВт-ч в год. Скоординированные диспетчерские графики эксплуатации водохранилищ имеют совершенно иную схему опорожнения и заполнения по сравнению с существующими. Диспетчерские графики изменяются в зависимости от водного режима водохранилищ, что доказывает, что изменение условий системы влияет на оптимальные правила работы. Сравнение предельной прибыли со сценарием моделирования урожая 2 показывает, что в условиях трех разных сценариев по обеспечению осадками – нормального, сухого и очень засушливого лет оптимизационная модель для разных периодов может обеспечить предельную прибыль свыше 11 миллиардов долларов США, скажем, 11050, 11011,042 миллиарда долларов соответственно, что показывает надежность модели в работе с любыми условиями и обеспечивает гарантированную прибыль. Однако в этих трех условиях диспетчерские графики для водохранилища Розейреса отличаются, тогда как диспетчерские графики для водохранилища Сеннар остаются почти одинаковыми. Если исключить влияние климата, модель может полностью обеспечить потребности в воде в любых условиях водоснабжения. Однако на надежность водоснабжения во всех предлагаемых моделях земледелия влияет изменение климата. Система дамб Розейрес-Сеннар за типичный год в условиях изменения климата может производить 10,688 млрд. долларов предельной прибыли и 1371 ГВт-ч энергии в год.

Это показывает, что модель позволяет управлять работой системы, когда изменение климата снижает предельную прибыль на 3,27%, тогда как приток воды уменьшается на 25%, а потребность в воде и испарение увеличивается на 19%. Производство энергии в условиях изменения климата уменьшилось на 10,5%, что является наиболее уязвимым сектором. Предлагаемые системы земледелия 2 и 3 не подходят для условий изменения климата, поскольку дефицит воды может составлять до 65% в случае очень засушливого года с учетом климатических изменений. В очень засушливых условиях лучше использовать систему земледелия.

Ключевые слова: дамба Розейрес – Сеннар, эксплуатация водохранилища, оптимальная координация, многоцелевое водохранилище, долгосрочная планировка

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-309>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/309>

УДК 504.4:502.5

МЕТАМОРФІЗАЦІЯ ЗОНАЛЬНОГО ГІДРОХІМІЧНОГО СКЛАДУ ПОВЕРХНЕВИХ І ПІДЗЕМНИХ ВОД УКРАЇНИ ПІД ВПЛИВОМ АНТРОПОГЕННИХ І ПРИРОДНИХ ЧИННИКІВ

Ромашенко М.І.¹, докт. техн. наук, Коломієць С.С.², канд. с.-г. наук, Сардак А.С.³

¹ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-9997-1346>; e-mail: mi.romashchenko@gmail.com;

² Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-4329-4382>; e-mail: kss2006@ukr.net;

³ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-0540-9492>; e-mail: anastasiabilobrova1993@gmail.com

Анотація. Представлений інтегральний метод функціонального діагностування басейнових геосистем через кількісну оцінку впливу антропогенних (осушувальні меліорації), а можливо і природних чинників (клімат) на зміну гідрохімічного складу поверхневих і підземних вод. Метод базується на природній широтній і вертикальній зональності гідрохімічного складу поверхневих і підземних вод, як прояв геомембранних властивостей педосфери. Етапами проведеної кількісної оцінки впливу нарощення площ осушувальних меліорацій у басейнах річок Стир та Ірпінь було проведення лінійного регресійного аналізу хронологічних рядів вмісту кожного з макрокомпонентів хімічного складу річкової води у замикаючому створі за 1947-1989 рр. і динаміки нарощування площ меліорації та проведення кореляційного аналізу одержаних залежностей. Для підвищення тісноти кореляційного зв'язку гідрохімічний склад був представлений у %-еквівалентній формі, яка найточніше характеризує співвідношення макрокомпонентів, але не залежить від загальної мінералізації води. Статистично достовірно встановлено при наростанні площ осушення зниження вмісту таких типоморфних іонів як гідрокарбонати та кальцій і підвищення вмісту інших макрокомпонентів та мінералізації. Загалом із зростанням площ осушувальних меліорацій відбувається аридизація гідрохімічного складу річкової води. За екологічний критерій допустимості меліорованості басейну прийнята зміна гідрохімічного типу річкової води відповідно до класифікації О.О. Алюкіна. Отримані параметричні моделі часових трендів вмісту макрокомпонентів гідрохімічного складу дозволили визначити граничну площу меліорованості басейнів двох річок і спрогнозувати зміни гідрохімічного типу води у бік її аридизації.

Припинення будівництва нових меліоративних систем та зниження ефективності сільсько-господарського використання осушуваних земель призводить до відновлення гідрохімічного складу річок у напрямку їх до меліоративного освоєння.

Апробація створеного методу функціонального діагностування проведена на п'яти меліоративних системах Прикарпаття та у басейні р. Західний Буг і його притоків, довела його високу ефективність і перспективність для створення параметричних моделей впливу природних і антропогенних чинників на хімічний склад і якість водних ресурсів.

Ключові слова: гідрохімічний склад води, макрокомпоненти, площі меліорації, регресійний і кореляційний аналіз, аридизація хімічного складу води, прогнозна модель

Постановка проблеми. При розв'язанні проблем управління якістю водних ресурсів за басейновим принципом в Україні встановлено суттєву метаморфізацію зонального гідрохімічного складу поверхневих і підземних вод під впливом антропогенної діяльності та інтенсивних кліматичних змін [1]. Загальним сучасним спрямуванням зміни гідрохімічного складу вод є зростання їх аридизації, тобто зміна іонного складу і мінералізації, характерного для південніших регіонів з більш аридним кліматом.

В Україні спостерігається широтна гідрохімічна зональність поверхневих і підземних вод першого від поверхні ґрунтового водоносного горизонту, що закономірно змінюється від ультрапрісних гідрокарбонатно-кальцієвих вод на півночі в гумідній зоні Полісся, до високо-мінералізованих розсолів хлоридно-натрієвого і хлоридно-сульфатно-натрієво-магнієвого складу на півдні України в зонах Одещини, Присивашся і Криму [2]. До речі, така ж вертикальна послідовність гідрохімічної зональності порових розчинів і водорозчинних

солей спостерігається і в ґрунтах та породах потужної зони аерації, що характерна для автоморфних умов ґрунтоутворення. З поверхні до глибини перших метрів (3–5 м) спостерігається гідрокарбонатно-кальцієвий склад порових розчинів, а глибше в порових розчинах і поровому просторі зростає частка катіонів Mg^{2+} і Na^+ та аніонів SO_4^{2-} і Cl^- і їх солей. Така вертикальна зональність порових розчинів досліджувалась нами у первинно ненасичених водою ґрунтах і породах межиріччя Дніпро-Молочна у Степу та Лісостепу України [3], а також у Сиртовому Заволжі Росії [4]. Для кліматично стабільних умов другої половини минулого сторіччя на рівнинній території України гідрохіміками визначено 23 однорідних гідрохімічних поля, для яких була проведена статистична оцінка іонного складу і мінералізації поверхневих і ґрунтових вод для основних гідрологічних фаз року [2].

Однак аналіз багаторічних хронологічних рядів іонного складу води в характерні гідрологічні фази свідчить про наявність певної динаміки гідрохімічного складу по більшості моніторингових пунктів контролю річкових вод України, яка через недосконалість методів опрацювання інформації не дозволяє створювати параметричні моделі впливу конкретних факторів на якість водних ресурсів. Зокрема багаточисленна література із впливу осушення на водний режим і якість річкових вод не дає однозначної відповіді на це питання [5].

Метою досліджень є ідентифікація впливу осушувальних меліорацій, чи будь-яких антропогенних або природних чинників на хімічний склад поверхневих і підземних вод та створення прогнозу такої моделі такого впливу з метою ефективного контролю і управ-

ління якістю водних ресурсів за басейновим принципом.

Матеріали і методи дослідження. Для аналізу даних хронологічних рядів іонного складу результати аналізів води були представлені в процент-еквівалентній формі (%-екв.), що загалом підвищувало їх кореляцію з чинниками виникнення цих часових трендів. Суть такої процедури полягала в підрахунку суми макрокомпонентів хімічного складу води – окремо катіонів (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) і аніонів (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-) з якої вираховували відсоток кожного іона. Таке представлення хімічного складу чутливо реагує на зміну співвідношення іонів, за яким визначають гідрохімічний тип води, приміром згідно класифікації природних вод О.О. Альокіна [6], яка представлена на рис. 1 і табл. 1 [7]. При цьому з тренду виключаються коливання мінералізації води, тобто вплив абсолютних значень вмісту іонів на їх співвідношення.

Проведений лінійний регресійний і кореляційний аналіз хронологічних рядів гідрохімічних спостережень для річок Стир та Ірпінь за межений період 1947–1989 рр. (43 роки) [8] дозволив встановити загальний тренд зміни кожного макрокомпонента (%-екв.). Період межени був вибраний свідомо через найбільший вплив на склад річкової води в цей період розвантаження потоку підземних і дренажних вод.

Результати дослідження і їх обговорення. Загальними закономірностями зміни гідрохімічного складу річкової води за цей час є зниження вмісту таких зональних типоморфних іонів [9] як гідрокарбонати (HCO_3^-) та кальцій (Ca^{2+}) і зростання вмісту всіх інших макрокомпонентів і мінералізації. Основним

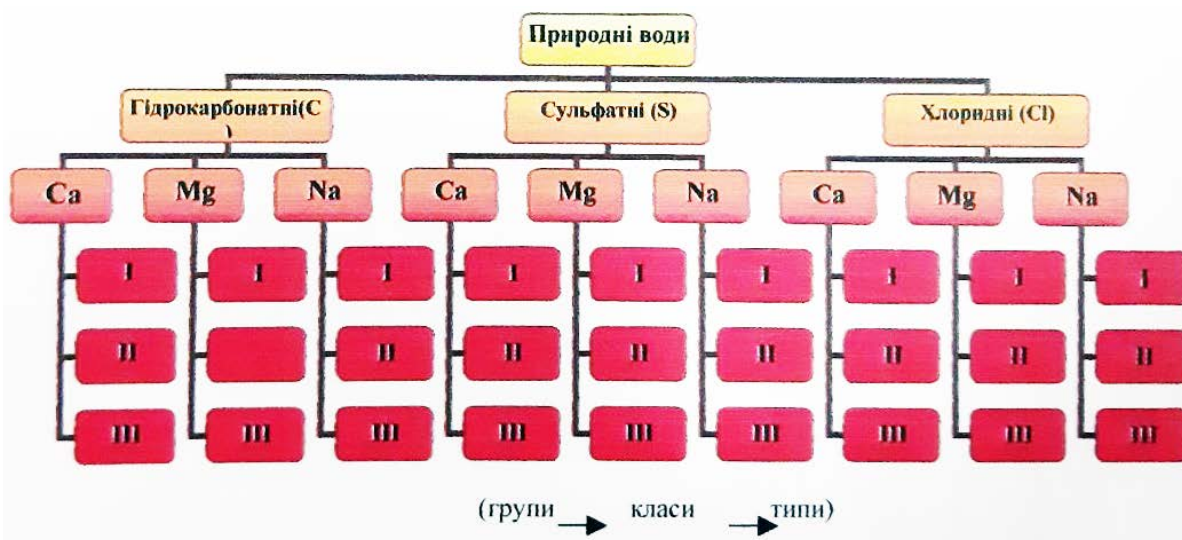


Рис. 1. Класифікація природних вод за О.О. Альокіним [6]

1. Визначення природних вод за співвідношенням іонів [6]

Типи води	Співвідношення іонів	Характеристика води	Хімічні типи води у сольовій формі*
I	$HCO_3^- > Ca^{2+} + Mg^{2+}$	Вода переважно пов'язана з виверженими кристалічними породами	$Ca(HCO_3)_2, Mg(HCO_3)_2, Na_2SO_4, NaHCO_3, NaCl$
II	$HCO_3^- < Ca^{2+} + Mg^{2+} \ll HCO_3^- + SO_4^{2-}$	Тип змішаних вод, до якого належать підземні води, що вміщуються в осадових відкладах, та більшість поверхневих вод	$Ca(HCO_3)_2, Mg(HCO_3)_2, Ca_2SO_4, MgSO_4, Na_2SO_4, NaCl$
III	$Cl^- > Na^+$ або $HCO_3^- + SO_4^{2-} < Ca^{2+} + Mg^{2+}$	Дуже мінералізовані води, води морів, океанів і солоних лиманів	$Ca(HCO_3)_2, Mg(HCO_3)_2, Ca_2SO_4, MgSO_4, Na_2SO_4, NaCl$
IV	$HCO_3^- = 0$	Типові кислі солі, які звичайно пов'язані з рудними сільфідними родовищами	
III*а	$Cl^- > Na^+, Cl^- < Na^+ Mg^{2+}$	Найбільш характерні для морської води	$Ca(HCO_3)_2, Mg(HCO_3)_2, Na_2SO_4, MgCl_2, NaCl$
III*б	$Cl^- > Na^+ Mg^{2+}$	Характерні для глибинних розсолів	$Ca(HCO_3)_2, Mg(HCO_3)_2, Ca_2SO_4, Na_2SO_4, CaCl_2, MgCl_2, NaCl$

* з доповненням Е.В. Посохова [7]

чинником виникнення цих закономірних змін було проведення інтенсивного меліоративного освоєння території басейнів цих річок. За лінійним регресійним і кореляційним аналізом встановлено значиму кореляцію хронологічних рядів кожного макрокомпонента з динамікою наростання площ осушуваних меліорацій в басейнах річок Стир та Ірпінь (табл. 2).

2. Кореляційні співвідношення між вмістом макрокомпонентів хімічного складу (%-екв) та площами меліорованих земель (тис. га) у басейні р. Стир та р. Ірпінь за період з 1947 по 1989 рр.

На основі лінійного регресійного аналізу створена прогнозна математична модель впливу осушувальних меліорацій на хімічний

склад річкової води у замикаючому створі річкового басейну. Графічна інтерпретація цієї прогнозової моделі представлена на рис. 2 та 3. При цьому регресійні рівняння наростання площ осушуваних земель (S, тис.га) у басейні р. Ірпінь (Мостище) має вигляд $S = 0,398t - 744,82$, а у басейні р. Стир (Луцьк) $S = 2,1932t - 4282,8$ де t – поточні значення років, починаючи з 1947. Рис. 4 наочно демонструє динаміку нарощування площ меліорації у басейні р. Стир.

За екологічний критерій граничного рівня меліоративного навантаження на річковий басейн, згідно цієї прогнозової моделі, був прийнятий час зміни гідрохімічного типу річкової води згідно з класифікацією природних вод О.О. Альокіна та граничних

2. Кореляційні співвідношення між вмістом макрокомпонентів хімічного складу (%-екв) та площами меліорованих земель (тис. га) у басейні р. Стир та р. Ірпінь за період з 1947 по 1989 рр.

Назва річки	Макрокомпоненти					
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ , K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
р. Ірпінь (Мостище)	-0,707	0,119	0,779	-0,823	0,808	0,758
р. Стир (Луцьк)	-0,783	0,723	0,607	-0,872	0,779	0,863

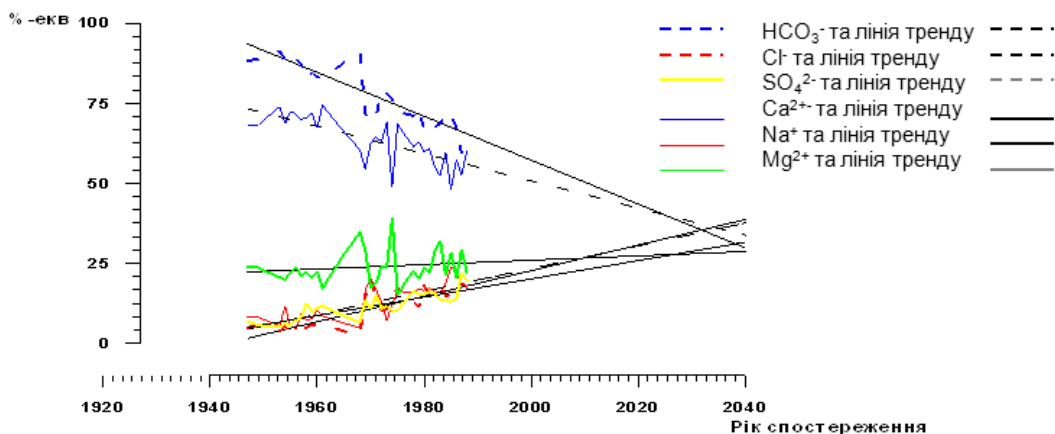


Рис. 2. Графічний аналіз змін хімічного складу річкової води за збереження тенденції збільшення площ меліорованих земель у басейні р. Ірпінь (Мостице)

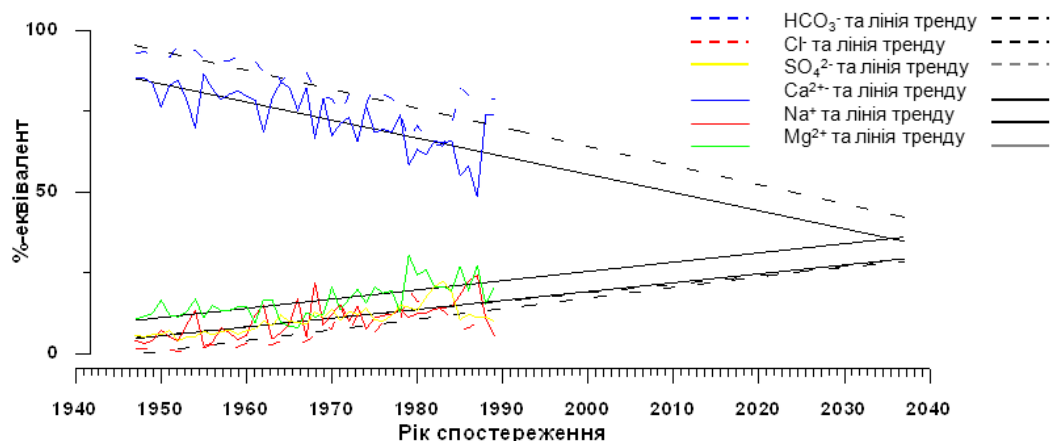


Рис. 3. Графічний аналіз змін хімічного складу води р. Стир (Луцьк) (%-екв) за роки спостережень з продовженням лінійних трендів

співвідношень макрокомпонентів при визначенні груп-класів-типів поверхневих природних вод (табл. 1).

Зміна гідрохімічного типу річкових вод, як екологічний критерій антропогенного навантаження, узгоджується із закономірностями широтної зональності хімічного складу поверхневих вод і загрожує непередбачуваними наслідками зміни у субаквальних і супераквальних екосистемах річкового басейну. Для розглядуваних басейнів р. Стир та р. Ірпінь трансформація хімічного складу річкових вод під впливом розвитку осушувальних меліорацій призводить до певної «аридизації», тобто зміни хімічного складу, характерного для південніших, більш аридних зон.

Момент зміни гідрохімічного типу річкової води розраховують шляхом вирішення системи рівнянь лімітуючих співвідношень макрокомпонентів класифікації О.О. Альокіна [6] шляхом підстановки одержаних регресійних рівнянь відповідного

макрокомпонента відносно площі меліоративного освоєння басейну (S). Тобто одержують граничну площу меліоративного освоєння басейну, при якій відбувається зміна гідрохімічного типу річкової води, з якої нескладно розрахувати граничну частку (%) меліоративного освоєння цього басейну, яка, зазвичай, співставляється і порівнюється із часткою площ болотного фонду цього басейну.

В таблиці 3 наведено результати вирішення системи цих рівнянь для басейнів р. Стир та р. Ірпінь. Тут же наведені прогностичні терміни зміни гідрохімічного типу річкової води, за умови збереження тренду меліоративного освоєння цих басейнів. Для басейну Ірпінь – це 2112 рік, а для басейну р. Стир – 2012 рік.

Однак після 1989 р. життя внесло суттєві корективи у темпи меліоративного будівництва і ефективність використання меліорованих земель в Україні. Зокрема

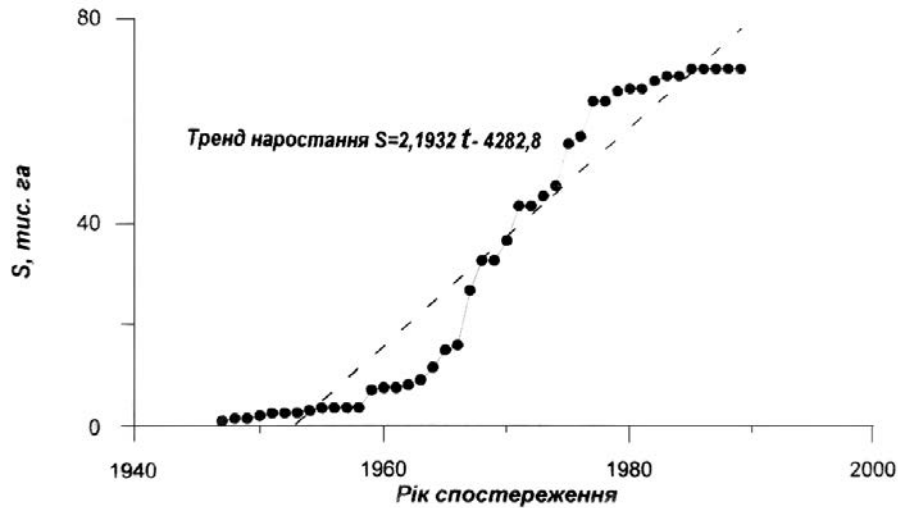


Рис. 4. Хронологічний графік наростання меліорованих площ S , тис. га., у басейні р. Стир

у басейні р. Ірпінь площі меліорації наближались до площі болотного фонду, що знизило потребу в осушенні. Апробація даної методики шляхом перевірки прогнозу впливу осушення на хімічний склад річкової води для басейну Ірпіння у 2009 році для обґрунтування схеми комплексного використання водних ресурсів і заплавної земель водного фонду р. Ірпінь, тобто через двадцять років після

завершення хронологічного ряду, дозволяє констатувати, що вміст більшості макрокомпонентів у річковій воді, за рахунок зниження ефективності використання осушуваних земель та припинення будівництва нових меліоративних систем у басейні, знизився до рівня середини 80-х років минулого сторіччя. Тобто, спостерігається ефект відновлення якості води, зміненої розвитком осушу-

3. Результати визначення гідрохімічного типу річкової води за класифікацією Альокіна О.О. [6] та умови його зміни у зв'язку з осушувальними меліораціями

Басейн	Гідрохімічна класифікація річкової води			Умова зміни гідрохімічного типу води з II на III тип	Гранична площа меліорваності басейну, $S_{гр}$, тис.га	Гранична частка меліорваності басейну, %	*Прогнозний термін зміни гідрохімічного типу річкової води, рік
	група	клас	Тип II				
	C-S-Cl	Ca-Mg-Na	$HCO_3^- < Ca^{2+} + Mg^{2+} < HCO_3^- + SO_4^{2-}$ за умов $S=0$	$HCO_3^- + SO_4^{2-} = Ca^{2+} + Mg^{2+}$ $C_{HCO_3}(S) + C_{SO_4}(S) = C_{Ca}(S) + C_{Mg}(S)$			
р. Ірпінь	гідрокарбонатні	кальцієві	$HCO_3=87,414$ $Ca=69,533$ $Mg=23,121$ $SO_4=7,4036$ $87,414 < 69,533 + 23,121 < 87,414 + 7,4036$	$-1,5229S + 87,414 + 0,654S + 7,4036 = -0,9509S + 69,533 + 0,1145S + 93,121$	66,6	23,4	2112
р. Стир	гідрокарбонатні	кальцієві	$HCO_3=91,910$ $Ca=81,694$ $Mg=11,755$ $SO_4=6,5369$ $91,910 < 81,694 + 11,755 < 91,910 + 6,5369$	$-10,2701S + 91,91 + 0,1162S + 76,5369 = -0,2514S + 81,694 + 0,1357S + 11,755$	130,8	18,2	2012

* За умови збереження темпів нарощування меліорованих площ

вальних меліорацій. Однак серед макрокомпонентів визначаються маркери антропогенного впливу (Mg^{2+} , SO_4^{2-}), вміст яких продовжує збільшуватись. Але це, найвірогідніше, пов'язане вже не з осушувальними меліораціями, а з іншими видами антропогенної діяльності у басейні р. Ірпінь, зокрема збільшенні скидів стічних вод населених пунктів.

Отже існування обернено-циклічних процесів відновлення якості річкової води за зниження ефективності регулювання водного режиму та інтенсивності сільськогосподарського використання земель, було використане для інтегральної оцінки ефективності сільськогосподарського використання осушуваних земель в басейні р. Західний Буг [10] та на меліоративних системах Прикарпаття у Івано-Франківській області, де були отримані аналогічні закономірності [11]. Поняття обернено-циклічних процесів більшою мірою характерне для ґрунтових процесів [12]. Приміром коли після глибокого меліоративного розпушення відновлюються властивості ґрунтів, тобто період післядії цього агро меліоративного заходу, за якою встановлюють термін проведення повторного розпушення. Однак аналогічний циклічний процес зафіксований при відновленні до меліоративного складу підземних і дренажних вод на меліоративних системах Прикарпаття за зниження ефективності регулювання водного режиму ґрунту та інтенсивності його сільськогосподарського використання. Зокрема було встановлено високу чутливість хімічного складу ґрунтових і дренажних вод до антропогенних поллютантів на меліоративній системі «Копанки» де у 2000, 2010 та 2011 рр. фіксувалось підвищення їхньої мінералізації з 0,7-0,8 г/дм³ до 2,0 г/дм³ за рахунок випадіння переважно хлоровмісних сполук в результаті аварійних викидів до атмосфери ЗАТ «Лукор» [13].

Висновки. На прикладі басейнів р. Ірпінь та р. Стир доведено існування значимого кореляційного зв'язку між площами осушуваних земель у басейнах річок та вмістом і співвідношенням макрокомпонентів хімічного складу річкової води річок-водоприймачів дренажного стоку.

Метаморфізація якості річкової води під впливом меліорації полягає у певній «аридизації», тобто у зниженні вмісту гідрокарбонатів і кальцію та підвищенні вмісту інших

макрокомпонентів, характерних для південніших, більш аридних, природних зон.

Створена на основі лінійного регресійного аналізу прогнозна математична модель трансформації хімічного складу річкової води під впливом наростання площ осушуваних земель дозволяє визначити граничний рівень меліоративного освоєння басейну, при якому змінюється гідрохімічний тип річкової води (за О.О. Альокінім), а також термін цієї зміни. Для р. Ірпінь це мало б відбутися за умови доведення площі меліорованих земель до 66,6 тис. га, що відповідає рівню меліорованості 23,4%. Для басейну р. Стир це мало б статися вже у 2012 р. при меліорованості 18,16% басейну, що становить 130,8 тис. га за умови збереження після 1989 р. тренду наростання меліорованих земель, визначеного для періоду 1947–1989 рр.

Представлений метод оцінювання впливу осушувальних меліорацій, що базується на закономірній зміні співвідношень макрокомпонентів хімічного складу у річковій воді, а не їх абсолютних значень, є методом функціонального діагностування басейну річки на відміну від кризового моніторингу забруднень, застосування якого дозволяє забезпечити локалізацію забруднень та розробляти превентивні заходи з попереджувального нормування антропогенного навантаження на якість водних ресурсів, що формуються у цьому басейні.

Для ефективного нормування сучасного антропогенного навантаження на басейни річок і їх екологічної стабільності необхідно розвивати саме такі методи функціонального діагностування, що базуються на поглибленому аналізі ретроспективної інформації режимних гідрохімічних спостережень, але з урахуванням сучасних кліматичних змін.

Загалом слід констатувати перспективність використання закономірностей зміни співвідношення макрокомпонентів у підземних і поверхневих водах, як результату взаємодії води з ґрунтами та їх трансформації у руслових процесах, що загалом підводить нас до обґрунтування геомембранних властивостей педосфери. Особливо актуальним є впровадження цього поняття для сучасних умов глобальних змін клімату, які призводять до еволюції геомембранних властивостей ґрунтів в зоні розвитку осушувальних меліорацій.

Бібліографія

1. Ромащенко М., Коломієць С., Мозоль Н., Овчиннікова Н. Оцінка впливу осушувальних меліорацій в басейнах річок на якість водних ресурсів. *Водне господарство України*, 2012. № 5. С. 20–24.

2. Горев Л.Н., Никаноров А.М., Пелешенко В.И. Региональная гидрохимия. Киев : Высшая школа, 1989. 280 с.
3. Коломієць С.С. Просторова оцінка ризику забруднення біогенними елементами ґрунтових вод агроландшафтів. *Агроекологічний журнал*, 2013. № 1. С. 35–40.
4. Файбишенко Б.А. Динамика солей зоны аэрации и грунтовых вод. Киев : КГУ, 1983. 112 с.
5. Гидрогеологическая роль болот и влияние их осушения на водный режим. Аннотирован библиографический указатель. Минск, 1977. 153 с.
6. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Ленинград : Гидрометеиздат, 1970. 444 с.
7. Посохов Е.В. Общая гидрохимия. Ленинград : Недра, 1975. 208 с.
8. Гидрологический ежегодник 1947–1989 гг. Т.2. Вип. 2–4.
9. Перельман А.И. Очерки геохимии ландшафта. Москва : ГИЗ географической литературы, 1955. 392 с.
10. Коломієць С.С., Ясенчук Т.О. Відтворення зонального гідрохімічного типу поверхневих вод як показник екологічної стабільності басейну р. Західний Буг. Досягнення та перспектива розвитку водогосподарської галузі до 100-річчя від дня народження Гаркуші М.А. – першого міністра меліорації і водного господарства України. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції 11–12 вересня 2014 року. Київ : ДІУЕВР, 2014 р. С. 33–36.
11. Мельник І., Коломієць С., Ясенчук О. Закономірності еволюційних змін ґрунтових режимів і властивостей осушуваних мінеральних ґрунтів Івано-Франківщини за різної інтенсивності їх господарського використання. Перспективні напрями розвитку галузей АПК і підвищення ефективності наукового забезпечення агропромислового виробництва : матеріали III міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, м. Тернопіль, 18–19 вересня 2013 р. Тернопіль, 2013. С.47–50.
12. Память почв: почва как память биосферно-геосферно-антропогенных взаимодействий / отв. ред. В.О. Торгульян, С.В. Горячкин. Москва : Издательство ЛКН, 2008. 692 с.
13. Коломієць С.С., Ясенчук Т.О. Методологія вивчення формування якості поверхневих вод за басейновим принципом. Матеріали науково-практичної конференції, присвяченої Всесвітньому дню води. Київ : ТОВ ДІА, 2015. С. 99–100.

References

1. Romashchenko, M., Kolomiyets', S, Mozol', N, & Ovchynnikova N. (2012). Otsinka vplyvu osushuval'nykh melioratsiy v baseynakh richok na yakist' vodnykh resursiv [Assessment of the impact of drainage reclamation in river basins on the quality of water resources]. *Vodne gospodarstvo Ukrainy*, 5. 20–24. [in Ukrainian]
2. Horev, L.N., Nykanorov, A.M., & Peleshenko, V.Y. (1989). Rehyonal'naya hydrokhiymiya [Regional hydrochemistry]. Kyev: Vyshcha shkola. [in Russian]
3. Kolomiyets', S.S. (2013). Prostorova otsinka ryzyku zabrudnennya biohennymi elementamy gruntovykh vod ahrolandshaftiv [Spatial assessment of the risk of nutrient contamination of groundwater in agricultural landscapes]. *Ahroekologichnyy zhurnal*, 1, 35–40. [in Ukrainian]
4. Faybyshenko, B.A. (1983). Dynamika soley zony aeratsyy hruntovykh vod [Dynamics of salts of the aeration zone and groundwater]. Kiev : KHU. [in Russian]
5. Hydrogeologicheskaya rol' bolot y vlyyanye ykh osushenyua na vodnyy rezhym [Hydrogeological role of bogs and the influence of their drainage on the water regime]. (1977). Annotyrovanyy bybl. ukazatel'. Mynsk. [in Russian]
6. Alekyn, O.A. (1970). Osnovy hidrokhiimii [Basics of hydrochemistry]. Leninhrad : Hydrometeoizdat. [in Russian]
7. Posokhov E.V. (1975). Obshchaya hidrokhiimiia [General hydrochemistry]. Leninhrad : Nedra. [in Russian]
8. Hidrologicheskyy ezhegodnik 1947-1989. [Hydrological Yearbook]. Vol.2 Iss. 2(2–4). [in Russian]
9. Perel'man, A.Y. (1955). Ocherki heokhiimii landshafta [Essays on landscape geochemistry]. Moskva : NYZ heograficheskoy literatury. [in Russian]
10. Kolomiyets', S.S., & Yasenchuk, T.O. (2014). Vidtvorennya zonal'noho hidrokhiimichnoho typu poverkhnevyykh vod yak pokaznyk ekolohichnoyi stabil'nosti baseynu r. Zakhidnyy Buh [Reproduction of zonal hydrochemical type of surface waters as an indicator of ecological stability of the Western Bug river basin]. *Dosyahnennya ta perspektyva rozvytku vodohospodars'koyi haluzi do 100-richchya vid dnya narodzhennya Harkushi M.A. – pershoho ministra melioratsiyi i vodnoho gospodarstva*

Ukrayiny. Materialy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi. Kyiv : DIUEVR, 33–36. [in Ukrainian]

11. Mel'nyk, I., Kolomiyets', S., & Yasenchuk, O. (2013). Zakonomirnosti evolyutsiynykh zmin gruntovykh rezhymiv i vlastyvostrykh osushuvanykh mineral'nykh gruntiv Ivano-Frankivshchyny za riznoyi intensyvnosti yikh hospodars'koho vykorystannya [Regularities of evolutionary changes of soil regimes and properties of drained mineral soils of Ivano-Frankivsk region at different intensity of their economic use]. Perspektivni napryamy rozvytku haluzey APK i pidvyshchennya efektyvnosti naukovooho zabezpechennya ahropromyslovooho vyrobnytstva : materialy III mizhnar. nauk.-prakt. konf. molodykh vchenykh, m. Ternopil'. Ternopil', 47–50. [in Ukrainian]

12. Torhul'yan, V.O., & Horyachkyn, S.V. (2008). Pamyat' pochv: Pochva kak pamyat' byosferno-heosferno-antropohennykh vzaymodeystviy [Memory of soils: Soil as a memory of biosphere-geosphere-anthropogenic interactions] / otv. red. Moskva : Izdatel'stvo LKN. [in Russian]

13. Kolomiyets', S.S., & Yasenchuk, T.O. (2015). Metodolohiya vyvchennya formuvannya yakosti poverkhnevyykh vod za baseynovym pryntsyptom [Methodology for studying the formation of surface water quality by the basin principle]. Materialy naukovo-praktychnoyi konferentsii, prysvyachenoyi Vsesvitn'omu dnyu vody. Kyiv : TOV DIA, 99-100. [in Ukrainian]

М.И. Ромащенко, С.С. Коломиец, А.С. Сардак

Метаморфизация зонального гидрохимического состава поверхностных и подземных вод Украины под влиянием антропогенных и природных факторов

Аннотация. Представлен интегральный метод функционального диагностирования бассейновых геосистем путем количественной оценки влияния антропогенных (осушительные мелиорации), а возможно и природных факторов (климат) на изменение гидрохимического состава поверхностных и подземных вод. Метод основан на природной широтной и вертикальной зональности гидрохимического состава поверхностных и подземных вод, как проявление геомембранных свойств педосферы. Этапами проведенной количественной оценки влияния наращивания площадей осушительных мелиораций в бассейнах рек Стырь и Ирпень было проведение линейного регрессионного анализа хронологических рядов содержания каждого из макрокомпонентов химического состава речной воды в замыкающем створе за 1947-1989 гг. Для повышения тесноты корреляционной связи гидрохимический состав был представлен в %-эквивалентной форме, наиболее точно характеризующей соотношение макрокомпонентов, но не зависящей от общей минерализации воды. Статистически достоверно установлено, что при нарастании площадей осушения происходит снижение содержания таких типоморфных ионов как гидрокарбонаты и кальций, но повышение содержания других макрокомпонентов и минерализации. В целом, с ростом площадей осушительных мелиораций происходит аридизация гидрохимического состава речной воды. За экологический критерий допустимости мелиорированности бассейна принято изменение гидрохимического типа речной воды в соответствии с классификацией А.А. Алекина. Полученные параметрические модели временных трендов содержания макрокомпонентов гидрохимического состава позволили определить предельную площадь мелиорированности бассейнов двух рек и спрогнозировать время изменения гидрохимического типа воды в сторону аридизации.

Прекращение строительства новых мелиоративных систем и снижение эффективности сельскохозяйственного использования осушаемых земель приводит к восстановлению гидрохимического состава рек в направлении их домелиоративного освоения.

Апробация созданного метода функционального диагностирования проведена на пяти мелиоративных системах Прикарпатья и в бассейне Западного Буга и его притоков, доказала его высокую эффективность и перспективность для создания параметрических моделей воздействия природных и антропогенных факторов на химический состав и качество водных ресурсов.

Ключевые слова: гидрохимический состав воды, макрокомпоненты, площади мелиорации, регрессионный и корреляционный анализ, аридизация химического состава воды, прогнозная модель

M.I. Romashchenko, S.S. Kolomiyets', A.S. Sardak

Metamorphization of zonal hydrochemical composition of surface and groundwater of Ukraine under the influence of anthropogenic and natural factors

Abstract. An integrated method of functional diagnostics of basin geosystems through quantitative assessment of anthropogenic (drainage reclamation) or natural factors (climate) on the change of hydrochemical composition of surface and groundwater is presented. The method is based on the

natural latitudinal and vertical zonation of the hydrochemical composition of surface and ground-water, as a manifestation of the geomembrane properties of the pedosphere. The stages of the quantitative assessment of the impact of increasing drainage reclamation areas in the Styr and Irpin river basins, were a linear regression analysis of chronological series of the content of each of the macro-components of the river water composition in the closing line for 1947–1989, and also the dynamics of increasing reclamation areas and correlation analysis of the obtained dependencies. To increase the closeness of the correlation, the hydrochemical composition was presented in %-equivalent form, which most accurately characterizes the ratio of macrocomponents, but does not depend on the total mineralization of water. A decrease in the content of such typomorphic ions as hydrocarbons and calcium and an increase in the content of other macrocomponents and mineralization were found statistically significantly with increasing drainage areas. In general, with increasing areas of drainage reclamation, there is an aridization of the hydrochemical composition of river water. The change of hydrochemical type of river water according to the classification of O.O. Alekina. The obtained parametric models of time trends of the content of macrocomponents of hydrochemical composition allowed to determine the limiting area of reclamation of the basins of two rivers and to predict changes in the hydrochemical type of water in the direction of its aridization.

Stopping the construction of new reclamation systems and reducing the efficiency of agricultural use of drained lands leads to the restoration of the hydrochemical composition of rivers in the direction of their reclamation development.

Approbation of the created method of functional diagnostics was carried out on five reclamation systems of Prykarpattia and in the basin of the Western Bug river and its branches proved its high efficiency and perspective for the creation of parametric models of the influence of natural and anthropogenic factors on chemical composition and quality of water resources.

Key words: *hydrochemical composition of water, macrocomponents, reclamation areas, regression and correlation analysis, aridization of chemical composition of water, forecast model*

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-296>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/296>

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

КОМБІНОВАНА СИСТЕМА ЕКСТРЕМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ РОЗБАВЛЕННЯМ МІНЕРАЛІЗОВАНИХ ВОД У БАСЕЙНАХ РІЧОК

П.І. Ковальчук¹, докт. техн. наук, О.С. Демчук², канд. техн. наук, В.П. Ковальчук³, докт. техн. наук, Г.А. Балихіна⁴, 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 Національний університет водного господарства і природокористування, Рівне, Україна;

<https://orcid.org/0000-0002-8318-5009>, e-mail: ldem1997@ukr.net;

³ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0001-7570-1264>, e-mail: volokovalchuk@gmail.com;

⁴ Національна академія аграрних наук України, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0002-5571-3556>, e-mail: maslova-anna@ukr.net

Анотація. Теорія комбінованих систем екстремального управління, яка використовується в технічних системах, розвинута і адаптована для управління в соціо-еколого-економічних системах. Зокрема, такими системами є басейни річок. Комбінована система екстремального управління формалізована для управління процесом розбавлення мінералізованих шахтних вод на ділянці річки. Запропонована математична модель поширення водних мас і забруднень у руслі річки від точкових і дифузних джерел на основі системи різницевих балансових рівнянь при дії стохастичних неконтрольованих перешкод. Стосовно таких умов, як адекватний інструментарій, розроблено систему комбінованого управління, що використовує прийняття рішень за еколого-економічними критеріями на основі аналізу вхідних і вихідних даних одночасно, ідентифікації та відслідковування оптимуму в умовах зміщення під впливом перешкод екстремальної характеристики системи. Структурно-функціональна схема представлена схемою розімкненої частини, ідентифікація якої здійснюється на основі моделювання процесу розбавлення вод у різних ситуаціях на конкретному об'єкті. Замкнута частина з коректором – розрізнаючою системою здійснює обернений зв'язок. Формалізовані математичні моделі динаміки водних мас і забруднень від точкових і дифузних джерел мають загальний характер і можуть використовуватись у басейнах інших річок. Система екстремального управління адаптується до гідрологічних умов та параметрів якості води конкретної річки.

Формалізована математична модель для комбінованого екстремального управління розбавленням шахтних вод на ділянці р. Інгулець. Вода для розбавлення надходить зі ставка-накопичувача в балці Свистунова. Визначаються регулюючі впливи, що підтримують якість води без перевищення нормативних значень гранично допустимих скидів. При цьому мінімізуються витрати води на розбавлення. Сценарний аналіз варіантів показав економію до 30% водних ресурсів, а саме 17,5 млн. м³, порівняно з проведеним у лютому-березні 2021 р. розбавленням за існуючим індивідуальним Регламентом.

Ключові слова: розбавлення мінералізованих вод, дифузні та точкові джерела, комбінований принцип, екстремальне управління, різницеві балансові рівняння, гранично допустимі скиди

Постановка проблеми. Відповідно до Директиви ЄС [1] управління водними ресурсами повинно здійснюватись за басейновим принципом. Наявність інтегрованих підходів [2] забезпечує економічно ефективне водокористування з досягненням доброго екологічного стану річок. Для ефективного управління басейном річки, як складною соціо-природно-технічною системою, в межах системного підходу для управління процесами необхідно розвивати принципи, методи і моделі, які вже використовувались і довели свою ефективність у складних технічних системах [3, 4].

Розглядаючи відомі принципи регулювання по збуренню та по відхиленнях [5], автор вказує на застосування комбінованого принципу управління [3, 4], коли одночасно використовують ці принципи для розв'язування задачі компенсації зовнішніх впливів на об'єкт регулювання. Методичні основи теорії автоматичного регулювання знайшли свій розвиток у біологічних контурах регулювання, в дослідженні обернених зв'язків у фізіології [5]. Комбінований принцип управління [3, 4] пропонується застосовувати і в системі управління річковим басейном,

забезпечуючи прийняття рішень за економічно ефективними та екологічно збалансованими критеріями. Це вимагає формалізації і сумісного співставлення елементів таких систем в моделях річкового басейну, розвитку інструментарію управління на основі моделювання специфічних процесів в умовах невизначеності і водних ризиків.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю застосування в системі річкового басейну ефективного принципу комбінованих систем екстремального управління для розбавлення мінералізованих вод.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи моделювання, які використовувались в технічних системах, знайшли широке застосування в моделюванні соціо-природно-технічних систем [6]. Це відомі моделі динаміки міста [7], моделі світу [8], імітаційні моделі басейну річок [9]. З розвитком методології інтегрованого управління водними ресурсами за басейновим принципом [10–14] виникла необхідність системного управління [15]. Система управління басейном річки [15] використовує імпульсний метод у комбінованій системі. Для оптимізації водообміну в Краснопавлівському водосховищі пропонується сценарний аналіз варіантів на основі імітаційно-оптимізаційного моделювання [16].

Проте досягнення доброго екологічного стану річок пов'язане з ефективним водовідведенням. Процес водовідведення включає три послідовні ланки: акумулювання вод у ставках-накопичувачах [17]; розбавлення високомінералізованих вод до рівня нормативно-допустимих скидів [18]; промивку та екологічне оздоровлення річки для використання вод у галузях економіки [19–23].

Водночас, як на рівні системного управління [24], так і при моделюванні процесу водовідведення, відсутні роботи з управління розбавленням вод, оптимізації процесу розбавлення за екологічними та економічними критеріями.

Мета досліджень полягає в розвитку теорії комбінованих систем екстремального управління для ідентифікації моделей управління розбавленням мінералізованих вод в басейні річки, що забезпечують мінімізацію витрат води та підтримання її якості в межах, що не перевищують гранично допустимих скидів.

1. Принципи, методи і моделі.

1.1. Основні принципи теорії комбінованих систем для управління розбавленням мінералізованих вод у річках. Теорія комбінованих систем екстремального управління була розроблена в роботах [3,4] для управ-

ління технічними системами. Були розвинуті марківські моделі для управління технологічними процесами збагачення залізних руд [25] в умовах перешкоди, що описується дискретним ланцюгом Маркова [26]. В сучасних умовах, залежно від об'єкта управління, використовуються або розвиваються певні принципи теорії побудови комбінованих систем. Аналіз показав, що для управління розбавленням вод на ділянці річки найбільш адекватною системою є комбінована система екстремального управління, що використовує прийняття рішень на основі аналізу входів і виходів одночасно з побудовою екстремальної характеристики критерію якості управління. Критерій якості перебуває під впливом неконтрольованої стохастичної перешкоди ξ_k , тому завданням управління є відслідковування оптимуму екстремальної характеристики системи. Структурно-функціональна схема такої системи представлена двома складовими: структурною схемою розімкнутої частини і структурною схемою замкнутої частини. Проводиться ідентифікація розімкнутої частини $\mu(\lambda, \xi_k)$ для різних перешкод $\xi_k, k=1, \dots, l$. Задача екстремального управління виникає в тому випадку, коли об'єкт управління має екстремальну характеристику $\Phi(\lambda, \mu, \xi_k)$.

Сам об'єкт перебуває під впливом збурюючих впливів λ , деяких перешкод ξ_k і регулюючих впливів μ . На виході обчислюється або вимірюється показник якості $\Phi(\lambda, \mu, \xi_k)$ максимум якого повинна підтримувати система в умовах зміни λ на основі регулюючих впливів μ .

Перешкода може суттєво змінювати екстремальну характеристику, тому замкнута частина забезпечує зворотній зв'язок залежно від вхідної величини λ та вихідної Φ на основі попереднього розпізнавання стану об'єкта (перешкода ξ_k) і розрахунків розімкнутої частини $\mu = q(1, \xi_k), k=1, \dots, l$.

На відміну від технічних систем розвиток теорії комбінованих систем екстремального управління в природно-технічних системах вимагає розробки нових принципів системного моделювання для управління такими системами при взаємодії компонентів природної і технічної підсистем. Це пов'язано з топологією природно-технічних систем та специфікою протікання в них процесів масообміну.

Зберігаючи загальну схему застосування теорії комбінованих систем екстремального управління, для вирішення задач управління технологічним процесом розбавлення міне-

ралізованих вод в руслах річок розвиваються такі принципові підходи:

– різницевий підхід до формалізації природно-технічних процесів динаміки поширення водних мас та гідрохімічних компонент у водному потоці, що забезпечує застосування інструментарію управління;

– ідентифікація розімкненої частини комбінованої системи екстремального управління на основі імітаційного моделювання екстремального управління;

– формалізація замкнутої частини системи для забезпечення специфічних умов оберненого зв'язку на основі коректора з розпізнаючою системою та прийняття рішень стосовно регулюючого впливу для підтримання якості води на основі моделювання динамічних процесів.

Застосування комбінованої системи екстремального управління розбавленням мінералізованих вод надає можливість оптимізації за двома критеріями якості: суттєво економити водні ресурси (економічний критерій) при підтриманні показників якості води в допустимих межах (екологічний критерій).

1.2. Математичні моделі розбавлення вод в умовах точкового та дифузних джерел забруднення. В наукових розробках для моделювання і управління розбавленням вод покладені моделі фізичних процесів поширення водних мас та динаміки забруднень у водному потоці в умовах наявності на ділянці річки точкового та дифузних джерел забруднення [15]. Поширення водних мас можна представити диференціальним рівнянням переносу (в одномірному випадку):

$$\frac{\partial W(t,x)}{\partial t} = r(W) \frac{\partial (W(t,x) + q(t,x))}{\partial x} + f(t,x), \quad (1)$$

де $\frac{\partial W(t,x)}{\partial t}$ – зміна величини водних мас $W(t,x)$ в деякій точці x , що пов'язана з переносом водних ресурсів $W(t,x)$ по осі X та надходженням водних ресурсів $q(t,x)$ із дифузних джерел, що розміщені вздовж річки по координаті X ; $r(W)$ – коефіцієнт, що виражає швидкість поширення водних мас залежно від їх величини; $f(t,x)$ – величина потоку водних мас точкового джерела за одиницю часу, що характеризує надходження на розбавлення забруднюючих речовин у річку.

Для моделювання неперервних фізичних процесів переносу забруднюючих речовин аналогічно можна використати диференціальне рівняння переносу, припустивши, що самоочищення відсутнє (для іонів хлору, мінеральних речовин), та знехтувати для

практичних розрахунків коефіцієнтом дифузії речовин.

Проте диференціальні рівняння неперервних процесів не є адекватним інструментарієм, що забезпечує управління розбавленням мінералізованих вод. Тому пропонується дискретний балансовий підхід, за яким формалізується модель у вигляді системи дискретних балансових рівнянь динаміки водних мас і забруднюючих речовин у річках.

Баланс водних мас у послідовності комірок на ділянці річки, в умовах точкового та дифузних джерел, визначається системою різницевих рівнянь збереження мас та нерозривності потоку:

$$W_i^{n+1} = r(W_i^n + q_i^n) + (1-r)(W_{i-1}^n + q_{i-1}^n) + F_i^n, \quad (2)$$

де $0 \leq r \leq 1$; $i=1, \dots, N$; W_i^{n+1} – водні ресурси в i -й комірці в $n+1$ -й момент часу; W_i^n, W_{i-1}^n – об'єми води в i -й та $i-1$ -й комірці в n -й момент часу; q_i^n, q_{i-1}^n – об'єми води в i -й та $i-1$ -й комірці в n -й момент часу, що поступають із бічних приток або фільтруються з ґрунтових вод; r – коефіцієнт переносу, що відображає швидкість потоку (при $r=0$ водні маси повністю переходять за визначений час Δt з $i-1$ -ої в i -ту комірку, при $r=1$ – стояча вода); F_i^n – водні ресурси, що надійшли від точкового джерела в комірку $i=i^*$; N – кількість комірок, визначених на ділянці річки. Точкове джерело в комірці $i=i^*$ задається кусковою функцією:

$$F_i^n = \begin{cases} \int_{t^{n-1}}^{t^n} f_{i^*}(t) dt, & \text{при } i = i^*; \\ 0, & \text{при } i \neq i^*, i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

де $f_{i^*}(t)$ – витрати води з точкового джерела (труби), що надходять на розбавлення.

Одночасно з перенесенням водних мас здійснюється перенесення та розбавлення гідрохімічних елементів (мінералізації, хлоридів, сульфатів та ін.), що знаходяться в річкової воді і в точковому джерелі забруднень. Балансові рівняння динаміки перенесення забруднень, після їх перемішування, мають вигляд:

$$U_i^{n+1} = \frac{r(W_i U_i^n + q_i C_i^n) + (1-r)(W_{i-1}^n U_{i-1}^n + q_{i-1}^n C_{i-1}^n) + F_i^n S_i^n}{W_i^{n+1}} \quad (4)$$

$i=1, \dots, n$,

де $rW_i^n U_i^n$ – водні ресурси з концентрацією U_i^n в i -й комірці в n -й момент часу; $r q_i^n C_i^n$ – водні ресурси з концентрацією C_i^n , які фільтруються в i -ту комірку з ґрунтових вод або поступають із приток; $(1-r)W_{i-1}^n U_{i-1}^n$ – водні ресурси з концентрацією U_{i-1}^n , що надійшли в i -ту комірку з $i-1$ -ої комірки; $(1-r)q_{i-1}^n C_{i-1}^n$ – водні ресурси з концентрацією C_{i-1}^n , що фільтруються

з ґрунтових вод або поступають із приток і надійшли з i -1-ої комірки; S_i^n – концентрація вод, що потупають у річку на розбавлення з точкового джерела (зі ставка-накопичувача).

Для розрахунків за моделями (2) і (4) важливо задати крайові умови: початкові умови W_i^0 – водні ресурси та концентрації U_i^0 в кожній комірці; граничні умови на лівій границі – концентрації U_i^1 та водні ресурси в першій комірці

$$W_1^{n+1} = rW_1^n + \int_{t_n}^{t_{n+1}} (p_0(t) + \eta(t)) dt \quad (5)$$

де $p_0(t)$ – витрати, що надходять на ділянку річки на розбавлення з водосховища; $\eta(t)$ – неконтрольовані витрати, що надходять у річку на ділянці «водосховище – ліва границя ділянки річки».

Визначеними є витрати $f_k(t)$ та водні ресурси F_i^n функції джерела. Відомою є концентрація S_i^n води, що подається зі ставка-накопичувача. Величини a_i^n , C_i^n , $\eta(t)$ не піддаються вимірюванню, є неконтрольованими і їх можна розглядати як деякі перешкоди в системі управління.

Формалізовані математичні моделі мають загальний характер і можуть бути використані для довільної річки, з урахуванням в ній конкретних дифузних та точкових джерел забруднення води.

1.3. Модель комбінованої системи екстремального управління розбавленням вод в умовах невизначеності. Розглядається технологічний процес розбавлення мінералізованих вод на ділянці річки від точкового джерела забруднень (труба, притоки та ін.) Вода надходить із водосховища. В процесі поширення водного потоку між водосховищем і лівою границею ділянки річки діють неконтрольовані перешкоди $\xi_k(t)$, $k=1, \dots, l$ від точкових та дифузних джерел забруднення. Вони впливають на концентрацію забруднень водних ресурсів на лівій ділянці річки

$$U_0(t_n) = U_0^n + \xi_k(t_n) \quad (6)$$

Стосовно перешкоди $\xi_k(t_n)$ відомо, що вона описується деяким стохастичним процесом у дискретні моменти часу t_n , а її зміна залежить тільки від моменту t_n , а її зміна не залежить від попередніх моментів часу. Приймемо, що процес описується дискретним однорідним ланцюгом Маркова зі скінченним числом станів ξ_k , $k=1, \dots, l$ і матрицею переходів [25]

$$Q = \begin{vmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \dots & Q_{1l} \\ Q_{l1} & Q_{l2} & \dots & Q_{ll} \end{vmatrix} \quad (7)$$

При наявності спостережень компоненти матриці Q знаходяться на основі статис-

тичного визначення ймовірностей, а при їх відсутності припускається рівномірний характер появи їх, а перехід з одного стану в інший здійснюється вкрай повільно. Це дозволяє розпізнавати стани і будувати систему управління.

Отже, аналіз системи управління розбавленням вод показав необхідність застосувати комбіновані системи екстремального управління в умовах невизначеності.

Ідентифікація точкових систем (рис. 1) починається з ідентифікації розімкнутої частини системи

$$f_k(t) = g(p(t), \xi_k(t), k=1, \dots, l) \quad (8)$$

для кожного з характерних значень перешкоди $\xi_k(t)$. Це означає, що для збурюючого впливу значення витрати з водосховища $p_i(t)$ визначають управляючий вплив (витрати з труби на розбавлення $f_j(t)$). При цьому екстремальна характеристика системи управління – концентрація у вихідному N -му створі на правій границі ділянки річки

$$U_N^n = \Phi(p_i(t), f_k(t), \xi_k(t)) \quad (9)$$

задається у вигляді двосторонніх нерівностей

$$U_{\text{доп}} \leq U_N^n \leq U_{\text{ГДС}} \quad (10)$$

тобто в процесі управління її значення попадає в заданий допустимий інтервал

$$U_N^n \in [U_{\text{доп}} ; U_{\text{ГДС}}], \quad (11)$$

де $U_{\text{ГДС}}$ – концентрація гранично допустимих скидів; $U_{\text{доп}}$ – допустиме значення концентрації скидів у створі повного перемішування N . Тут функція Φ виражається як результат імітаційного моделювання на основі запропонованих моделей (2–5) динаміки поширення

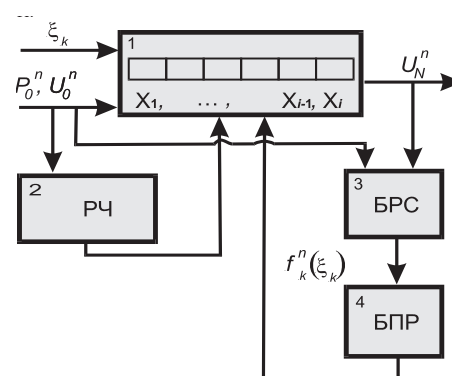


Рис. 1. Структурно-функціональна схема комбінованої системи екстремального управління розбавленням вод на ділянці річки: 1 – об’єкт управління; 2 – розімкнута частина; 3 – блок розпізнавання ситуацій; 4 – блок прийняття рішень

забруднень; U_N^n – концентрація в контрольному створі нижче створу повного перемішування на правій ділянці річки.

Якщо для $U_N^n < U_{\text{доп}}$ виконуються екологічні вимоги, проте в процесі розбавлення відбуваються значні перевитрати води. При перевищенні концентрації U_N^n гранично допустимих скидів $U_{\text{ГДС}}$ не виконуються екологічні вимоги. В обох випадках слід провести корекцію управляючого впливу (витрат з труби): у першому випадку управляючий вплив f_k збільшують, у другому – f_k необхідно зменшувати для досягнення умов (10).

На основі імітаційного моделювання для кожної ситуації ξ_k визначається характеристика розімкнутої частини – залежність (8).

Управлінські рішення приймаються на основі замкнутої системи екстремального управління (рис. 1) з коректором – розпізнаючою системою. Вона включає блок розпізнавання ситуації, в якому визначається стан об'єкта (діюча перешкода $\xi_k(t)$) (блок 3). Розпізнавання ситуації здійснюється за вхідними та вихідними даними одночасно (в цьому суть комбінованого управління). При фіксованих у певний момент t_n вхідних значеннях ($P_i^n f_i^n$) розпізнавання відбувається на основі визначення міри близькості поточного зображення U_N^n за мірою близькості його до одного з прототипів, $k=1, \dots, l$, тобто:

$$\xi_k = \arg \min |U_N^n - U_N^n(\xi_k)|, \xi_k \in [\xi_1, \dots, \xi_l] \quad (12)$$

В результаті розпізнавання ситуації (перешкоди ξ_k) визначається екстремальна характеристика і прийняття рішень (блок 4) здійснюється згідно з розрахунками розімкнутої частини комбінованої системи екстремального управління. До того ж для відомого збурюючого впливу p_i^n підбирається регулюючий вплив f_i^n за залежністю (8).

2. Моделювання екстремального управління і аналіз результатів. Необхідність

застосування екстремального управління покажемо на прикладі розбавлення мінералізованих вод р. Інгулець після акумуляції шахтних вод у ставку-накопичувачу, розміщеному в балці Свистунова. Скид шахтних вод із балки Свистунова в р. Інгулець у 2021 р. проводили на основі Розпорядження Кабінету Міністрів [18], а розбавлення – у відповідності з Індивідуальним регламентом [27]. Місцем скиду води в річку Інгулець є труба великого діаметра. Такий скид вод у р. Інгулець моделюється як точкове джерело забруднень (рис. 2).

Відомо [27], що об'єми акумуляції шахтних вод у ставку-накопичувачу виходили не тільки за рекомендовані межі, але і за проектний рівень заповнення, про що свідчить динаміка обсягів акумуляції (рис. 3) в останні роки. Оскільки балка Свистунова є відгалуженням балки Широка, то у випадку аварії, якщо вода прорве дамбу ставка-накопичувача – руйнівна хвиля потрапить до балки Широкої. Діставшись селища Широке, завдаючи величезних збитків, вода піде вниз долиною річки Інгулець. Для запобігання аварійним ситуаціям, в міжвегетаційний період 2020–2021 років (з 1 листопада по 15 березня) було дозволено [18] скидання надлишкових зворотних вод гірничорудних підприємств Кривбасу. Планувався дозований (регульований) скид і розбавлення в обсягі 12,171 млн. м³ за розробленим регламентом. Фактично з 20 січня по 15 березня 2021 р. скинуто 6,3 млн. м³ і розбавлено з неперевищенням гранично допустимих скидів (ГДС), що становлять 4,5 г/дм³ [28] за показником хлоридів.

Слід зауважити, що забруднення р. Інгулець здійснюється не тільки організованими скидами зі ставків-накопичувачів у період із листопада по лютий-березень. В цей же час і впродовж року спостерігається постійне забруднення р. Інгулець неорганізованими



Рис. 2. Схема балки Свистунова та скид шахтних вод у р. Інгулець



Рис. 3. Фактична динаміка змін обсягів акумуляції шахтних вод у ставку-накопичувачу балки Свистунова за 2018–2019 роки (за даними Укрводпроект [28])

скидами із відвалів (дифузні джерела забруднень) унаслідок фільтрації з підземних та ґрунтових вод. Вони розташовані на прилеглий території Криворізького залізрудного басейну (Лівобережний відвал, хвостосховище «Войково», «Об'єднане» та ін.). Їх дія (забруднення переважно хлоридно-сульфатно-натрієво-магнієвого типу, а також важкими металами) зосереджена на ділянці річки від Карачунівського водосховища до п. Андріївка, де проводяться вимірювання згідно з програмою Державного моніторингу вод. В процесі поширення забруднень відбувається осідання в мулі та захоронення важких металів у донних відкладах, тоді як сольове забруднення практично не піддається самоочищенню в річці Інгулець і фіксується в п. Снігурівка, де здійснюється забір води на Інгулецьку зрошувальну систему.

Неорганізовані скиди з дифузних та точкових джерел забруднення, які діють на ділянці річки і не піддаються вимірюванням, в теорії екстремального управління називають неконтрольованими перешкодами. Перешкоди $\xi_k(t_n)$ суттєво змінюють екстремальну характеристику, здійснюючи стохастичну зміну неконтрольованого показника в певних межах $\xi_k(t_n) \in [\xi^{\min}, \xi^{\max}]$. Аналіз даних Державного моніторингу вод в р. Інгулець показав, що за показником хлоридів в умовах відсутності промивки річки, фонові значення змінюються в межах 1000–2000 мг/дм³,

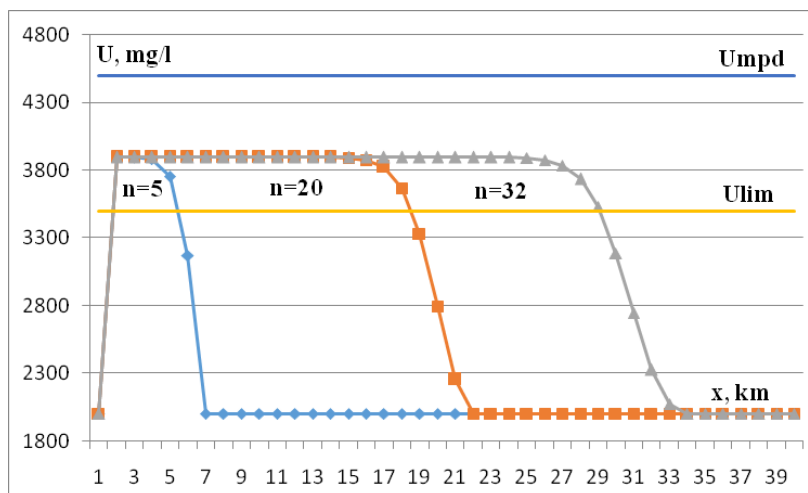
сягають 3000 мг/дм³. Тому для ідентифікації розімкнутої частини доцільно прийняти $\xi_1(t_n) = 0,160$ мг/дм³ (фонові значення води Карачунівського водосховища), $\xi_2(t_n) = 1000$ мг/дм³, $\xi_3(t_n) = 2000$ мг/дм³ – як деякі прототипи при побудові коректора з розпізнаючою системою.

Для моделювання та управління процесом розбавлення мінералізованих вод розроблено програмний комплекс, що дозволяє проводити імітаційне моделювання з корекцією стану об'єкта в умовах перешкоди. Так, на основі моделювання розрахована динаміка поширення забруднень (рис. 4а) при гідрологічних характеристиках р. Інгулець, витратах із водосховища $p(t) = 6$ м³/с, концентрація хлоридів 20000 мг/л, витратах зі ставка-накопичувача $f(t) = 1,6$ м³/с, перешкоди $\xi(t) = 2000$ мг/л (стан об'єкта). При цьому концентрація хлоридів в N -му контрольному створі на віддалі 25 км від точки розбавлення становить 3800 мг/л і знаходиться в межах $U^{\text{доп}} \leq U_N^n \leq U_{\text{ГДС}}$, отже корекція перешкоди (стану об'єкта) не проводиться. У випадку, якщо перешкода змінює стан об'єкта ($\xi_2(t) = 3000$ мг/л), $U_N^n > U_{\text{ГДС}}$ (рис. 4б), не виконуються екологічні вимоги до умов розбавлення вод. Роль коректора з розпізнаючою системою полягає у визначенні нового стану об'єкта і переході системи екстремального управління на відповідну характеристику розімкнутої частини. Аналогічно, при значенні перешкоди до $\xi_3(t) = 1000$ мг/л та $U_N^n < U_{\text{доп}}$ здійснюються

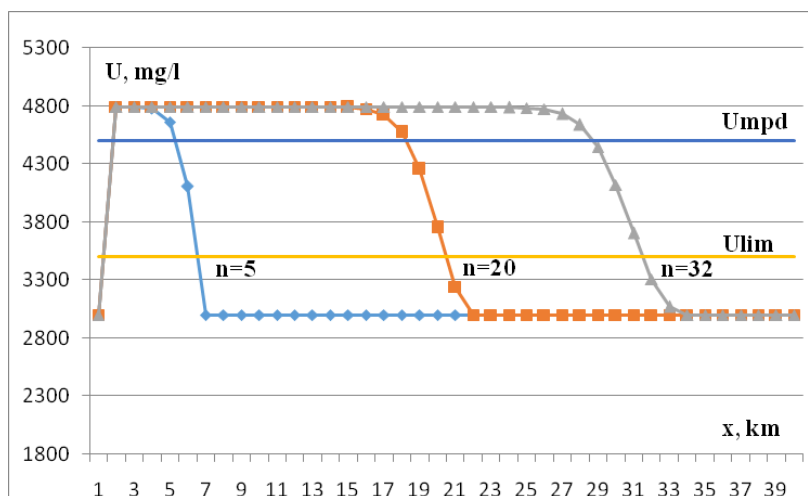
значні перевитрати води на розбавлення (рис. 4в). Коректор із розпізнаючою системою розпізнає ситуацію і встановлює систему управління на іншу характеристику розімкнутої частини, що задається множиною залежностей (8).

Для ідентифікації розімкнутої частини комбінованої системи екстремального управ-

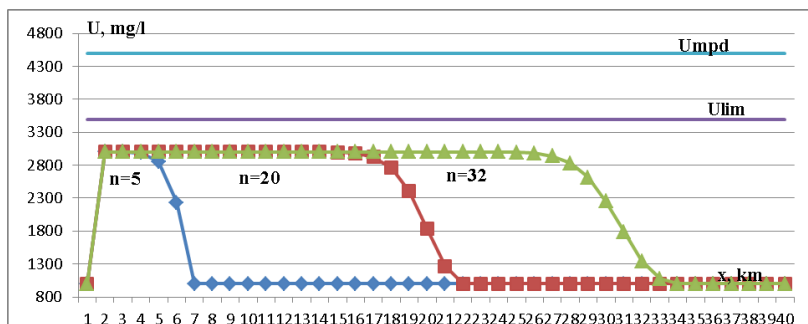
ління розглянуто параметри об'єкта управління. Скид зворотних вод зі ставка-накопичувача в р. Інгулець здійснюється одним поверхневим зосередженим випуском (рис. 2) з концентрацією розчину за хлоридами $S^2(t) = 20\,000\text{ г/дм}^3$. Відкачку води на скид забезпечують дві плавучі насосні станції, які мають технічну можливість регулювати витрати від



а)



б)



в)

Рис. 4. Залежність розрахункової концентрації забруднення на вихідній ділянці річки в різні моменти часу залежно від величини перешкоди

0,6 до 0,9 м³/с. Паралельний режим роботи насосних стацій може забезпечувати регульований скид шахтних вод у діапазоні від 0,6 до 1,7 м³/с. Витрати контролюються водомірним пристроєм. З Карачунівського водосховища витрати достатньо обмежити інтервалом $p(t) \in [2; 10]$, м³/с.

Отже, на основі імітаційного моделювання розраховують, при різних значеннях перешкоди, параметри розімкнутої частини комбінованої системи. Тобто для кожного забруднюючого впливу $p(t)$ визначаються витрати (регулюючий вплив) із труби $f(p(t), \xi_k(t))$, які підтримують екстремальну характеристику в допустимих межах $U_{\text{доп}} \leq U_N^* \leq U_{\text{ГДС}}$.

На підставі багаторічних досліджень по впливу хлоридів, сульфатів, мінералізації на життєдіяльність іхтіофауни встановлено [27], що при скиді зворотних вод вміст хлоридів нижче зони змішування не повинен перевищувати рівня 4,5 г/дм³, а рівні мінералізації води не більше 9,0 г/дм³ [28]. Проте в регла-

менті скиду надлишків зворотних вод у ставку-накопичувачі 2020–2021 року за контрольні розрахунки концентрацій необґрунтовано прийнято за хлоридами – 3,5 г/дм³, за мінералізацією 7,0 г/дм³ [27], що призводить до перевитрат водних ресурсів при розбавленні вод.

Порівняльний аналіз фактично проведеного розбавлення вод у період із 20 січня по 15 березня 2021 р. з моделюванням процесу за розробленим алгоритмом комбінованої системи екстремального управління зафіксував за показником хлоридів в обох випадках задовільну якість вод (рис. 5).

Проте за величиною витрат води на промивку розроблений варіант моделювання комбінованого екстремального управління має значні переваги. Економія води становить біля 17,5 млн. м³ при розбавленні 6,3 млн. м³ стоків (рис. 6). Отже, комбінована система екстремального управління, що оптимізує процес прийняття рішень за принципом двокритеріальної оптимізації [28], має суттєві

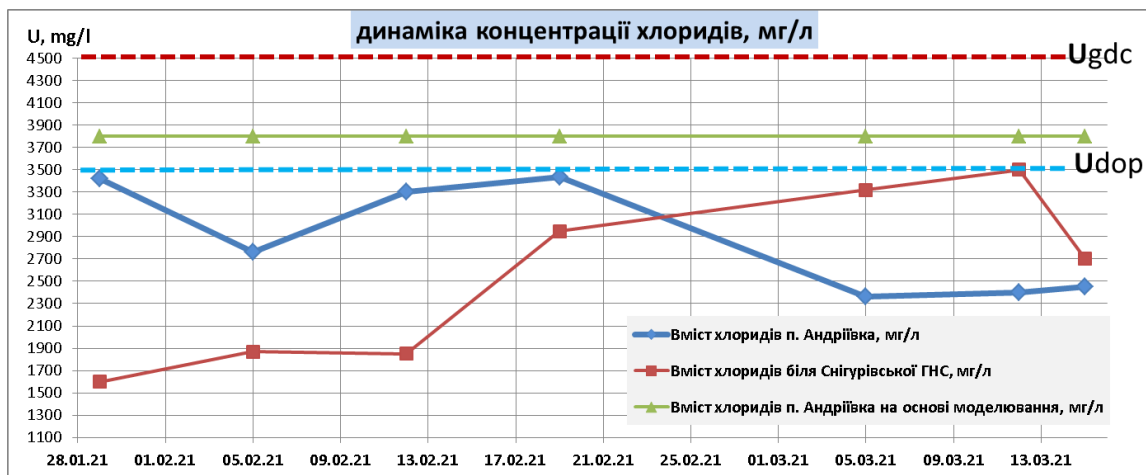


Рис. 5. Фактична та розрахункова (п. Андріївка та Снігурівська ГНС) динаміка концентрації хлоридів



Рис. 6. Динаміка об'ємів витрат води в процесі розбавлення

переваги порівняно з подачею води за існуючим Регламентом [27].

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці Регламенту розбавлення вод на принципах комбінованого управління, який більш ефективний за економічними та екологічними критеріями ніж існуючі регламенти.

Висновки. Комбінована система екстремального управління розбавленням мінералізованих вод дозволяє оптимізувати процес управління за економічними та екологічними критеріями. Це досягається на основі математичного моделювання поширення забруднень і контролю якості води в створі повного перемішування. Підтримання якості води в допустимих межах забезпечує вибір управлін-

ських рішень, що мінімізують витрати води на розбавлення мінералізованих скидних вод. Сценарний аналіз управління розбавленням вод на прикладі р. Інгулець і порівняння з розбавленням за існуючим Регламентом 2021 р. підтверджує можливість економії до 17,5 млн. м³ промивної води при розбавленні 6,3 млн. м³ стоків.

Формалізовані математичні моделі знайшли своє застосування в басейні р. Інгулець. Проте вони можуть бути використані для моделювання дифузних і точкових джерел забруднень та розбавлення в басейнах інших річок. При цьому структурно-функціональна схема системи управління повинна бути адаптована до гідрологічних умов та параметрів конкретної річки.

Бібліографія

1. 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.
2. 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.
3. Ивахненко А.Г. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления. Київ : Техніка, 1969. 392 с.
4. Ивахненко А.Г. Кибернетические системы с комбинированным управлением. Київ : Техніка, 1966. 512 с.
5. Кухтенко А.И. Кибернетика и фундаментальные науки. Киев : Наукова думка, 1987. 142 с.
6. 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.
7. Форрестер Дж. Динамика развития города. Москва : Прогресс, 1974. 287 с.
8. Форрестер Дж. Мировая динамика. Москва : Наука, 1978. 167 с.
9. Экологические системы. Адаптивная оценка и управление / Под ред. К. С. Холинга. Москва : Мир, 1981. 396 с.
10. Dukhovny, V., Sokolov, V., Manthrilake, H.: Integrated Water Resources Management: Putting Good Theory into Real Practice. Central Asian Experience. SIC ICWC, Tashkent (2009).
11. Сташук В., Яцик А. Україна на шляху до басейнового принципу управління водними ресурсами. *Водне господарство України*, 2007. № 4. С. 6–10.
12. 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.
13. Kovalchuk P., Kovalenko R., Kovalchuk V., Demchuk O., Balykhina H. (2021) Integrated Water Management and Environmental Rehabilitation of River Basins Using a System of Non-linear Criteria. In : Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education III*. ICCSEE 2020. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1247. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1_4
14. Ковальчук П.І., Коваленко Р.Ю., Балихіна Г.А. Методологічні особливості концепції системного управління водними ресурсами за басейновим принципом. *Меліорація і водне господарство*. Київ : Аграрна наука. 2018. № 1(107). С. 17–23. DOI : <https://doi.org/10.31073/mivg201801-115>
15. 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.
16. 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.

17. Балансовий метод інтегрованого управління водовідведенням за об'ємами та мінералізацією шахтних вод у басейні р. Інгулець. Ковальчук П. І. та ін. *Меліорація і водне господарство*. Київ : Аграрна наука. 2021. № 1. С. 23–32. DOI : <https://doi.org/10.31073/mivg202101-274>.
18. Розпорядження Кабінету Міністрів України № 1670-р від 28.12.2020 року «Про запобігання виникненню аварійної ситуації на ставку- накопичувачу, розташованому на території Криворізького району Дніпропетровської області»
19. 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.
20. Бурлака В.О. Промивка р. Інгулець у 2011 році. *Водне господарство України*. 2011. № 5. С. 17–18.
21. Бабій П.О., Лисюк О.Г. Рукотворна повінь на р. Рось. *Водне господарство України*. 2010. № 5. С. 4–6.
22. “Investigation of Options to increase the flood mitigation performance of Wivenhoe Dam”, Final Report. Brisben : GHD. 2011. pp. 146.
23. “Environmental assessment accelerated Mahaweli development program” in US Agency for International Development, New York : TAMS, pp. 389, (1980).
24. Системна модель інтегрованого управління водними ресурсами р. Інгулець за басейновим принципом. Ковальчук П. І. та ін. *Меліорація і водне господарство*, 2020. (1), 37–48. <https://doi.org/10.31073/mivg202001-219>
25. Ковальчук П.І., Несходовський В.І. Коректор комбінованої системи екстремального керування як марківський автомат. *Автоматика*. 1970. № 1. С. 78–88.
26. Ковальчук П.І., Несходовський В.І. Процес корекції у комбінованій системі екстремального керування як гра автомата з природою. *Автоматика*. 1970. № 5. С. 9–20.
27. Індивідуальний регламент скидання надлишків зворотних вод гірничорудних підприємств Кривбасу зі ставка-накопичувача б. Свистунова у р. Інгулець у міжвегетаційний період 2020–2021 років, ПрАТ «Укрводпроект», Київ, 2020.
28. Шерстюк Н.П., Хільчевський В.К. Особливості гідрохімічних процесів у техногенних та природних водних об'єктах Кривбасу. Монографія. Дніпропетровськ : ТОВ «Акцент ПП», 2012. 263 с.
29. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. Москва : Наука, 1982. 253 с.

References

1. 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.
2. Закон України «Про внесення змін до деяких законотворчих актів України щодо впровадження інтегрованих підходів в управлінні водними ресурсами за басейновим принципом» від 4 жовтня 2016 року № 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]
3. Ivakhnenko, A. (1969). Samoobuchaiushchiesya sistemy raspoznavaniya i avtomaticheskoho upravlenaya. Kyiv : Tekhnika. [in Russian]
4. Ivakhnenko, A. (1966). Kiberneticheskiye sistemy s kombinirovannym upravleniyem. Kyiv : Tekhnika.,. 512. [in Russian]
5. Kuhtenko, A. (1987). Kibernetika i fundamentalnye nauki. Kyiv : Naukova dumka,142. [in Russian]
6. Kovalchuk, P.I., & Kovalchuk V.P. (2015). Systemne upravlinnia yak rozvytok integrovanooho 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]
7. Forrester, J. (1974). *Dinamika razvitiya horoda*. Moscow: Progress. [in Russian]
8. Forrester, J. (1974). *Mirovaya dinamika*. Moscow, Nauka. [in Russian]
9. Holing, K. (1981). *Ekologicheskiye sistemy*. Moscow, Mir. [in Russian]
10. Dukhovny, V., Sokolov, V., & Manthritlake, H. (2009). *Integrated Water Resources Management: Putting Good Theory into Real Practice*. Central Asian Experience. Tashkent : SIC ICWC.

11. Stashuk, V.A., & Yatsyk, A.V. (2007). Ukraina na shlyahu do baseynovoho pryntsyphu upravlinnia vodnymy resursamy [Ukraine is on the way toward the basin principle of water resources management]. *Vodne hospodarstvo Ukrainy*, 4, 6–10. [in Ukrainian]
12. Klymchuk, O.M., Pinkina, T.V., & Pinkin, A.A. (2018). Vprovadzhennia systemy integrovanooho 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]
13. Kovalchuk P., Kovalenko R., Kovalchuk V., Demchuk O., & Balykhina H. (2021) Integrated Water Management and Environmental Rehabilitation of River Basins Using a System of Non-linear Criteria. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEE 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1247. Springer, Cham. Retrieved from: https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1_4/
14. 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. Retrieved from: <https://doi.org/10.31073/mivg201801-115>. [in Ukrainian]
15. 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]
16. 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. 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies, Vol. 1, 80–83.
17. Kovalchuk P., Stetsenko V., Balykhina H., Kovalchuk V. & Demchuk O. (2021). Balance method of integrated control of mine water removal by the volumes and mineralization rate within the Ingulets river basin. *Land Reclamation and Water Management*, 1, 23–32. Retrieved from: <https://doi.org/10.31073/mivg202101-274>. [in Ukrainian]
18. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy «Pro zapobihannia vynyknenniu avariinoi situatsii na stavku-nakopychuvachu, roztashovanomu na terytorii Kryvorizkoho raionu Dnipropetrovskoi oblasti» vid 28.12.2020 roky № 1670-r. [Ordinance of the Cabinet of Ministers of Ukraine «About accident prevention within storage pond is on Kryvyi Rih district of the Dnipropetrovsk region» of December 28, 2020, № 1670-r]. [in Ukrainian]
19. Keller I., & Schwartz R. (2015) Instrument of the integrated pollutant/sediment menegment in the Elbe catchment area. *International Conference RIVER BASINS 2015: Monitoring, Modelling & Management of Pollutants*. Germany, Karlsruhe, 67–74.
20. Burlaka, B. (2011). The flushing Inhulets river in 2011. *Water Management of Ukraine*, 5, 17–18. [in Ukrainian]
21. Babiy, P.O., & Lisyuk, O.G. (2010). Man-made flood on the river Ros. *Water management of Ukraine*, 5, 4–6. [in Ukrainian]
22. Final Report. (2011). Investigation of Opions to increase the flood mitigation performance of Wivenhoe Dam. Brisben: GHD.
23. Environmental assessment accelerated Mahaweli development program. (1980). US Agency for International Development. New York : TAMS.
24. Kovalchuk, V., Kovalchuk, P., Yatsyuk, M., Kovalenko, R., Demchuk, O., & Balykhina, H. (2020). System model of integrated management of the water resources of the Ingulets River by a basin principal. *Land Reclamation and Water Management*, (1), 37–48. Retrieved from: <https://doi.org/10.31073/mivg202001-219>
25. Kovalchuk, P., & Neskhodovskiy, V. (1970). Korektor kombinovanoyi systemy ekstremalnoho keruvannya yak markivskiy avtomat. *Avtomatyka*, 1, 78–88. [in Ukrainian].
26. Kovalchuk, P., & Neskhodovskiy, V. (1970). Protses korektsiyi u kombinovaniy systemi ekstremalnoho keruvannya yak hra avtomata z pryrodoyu. *Avtomatyka*, 5, 9–20. [in Ukrainian]
27. Indyvidualnyi rehlyment skydannya nadlyshkiv zvorotnykh vod hirnychorudnykh pidpriyemstv Kryvbasu zi Stavka-nakopychuvacha Svystunova u Inhulets u mizhvehetatsiyniy period 2020–2021. (2020). Kyiv : Ukrvodproyekt.
28. Sherstiuk, N., & Khilchevskiy, V. (2012). Osoblyvosti hidrokhimichnykh protsesiv u tekhnohennykh ta pryrodnykh vodnykh obyektakh Kryvbasu. *Dnipropetrovsk : Aktsent*. [in Ukrainian]
29. Podinovskiy, V., & Noghin, V. (1982). Pareto optimal solution for multicriterion problems. Moscow : Nauka. [in Russian]

П.И. Ковальчук, Е.С. Демчук, В.П. Ковальчук, А.А. Балыхина
Комбинированная система экстремального управления разбавлением
минерализованных вод в бассейнах рек

Аннотация. Теория комбинированных систем экстремального управления, которая используется в технических системах, была развернута и адаптирована для управления в социо-эколого-экономических системах. К примеру, такими системами являются бассейны рек. Комбинированная система экстремального управления была формализована для управления процессом разбавления минерализованных шахтных вод на участке реки. Предложена математическая модель распространения водных масс и загрязнений в русле реки от точечных и диффузных источников на основе системы разностных балансовых уравнений при воздействии стохастических неконтролируемых помех. Относительно таких условий, как адекватный инструментарий, разработана система комбинированного управления, которая использует принятие решений по эколого-экономическим критериям на основе анализа входных и выходных данных одновременно, идентификации и отслеживания оптимума в условиях смещения под воздействием помех экстремальной характеристики системы. Структурно-функциональная схема представлена схемой разомкнутой части, идентификация которой осуществляется на основе моделирования процесса разбавления вод в различных ситуациях на конкретном объекте. Замкнутая часть с корректором - распознающей системой осуществляет обратную связь. Формализованные математические модели динамики водных масс и загрязнений от точечных и диффузных источников имеют общий характер и могут быть использованы для бассейнов других рек. Система экстремального управления адаптируется до гидрологических условий и параметров качества воды конкретной реки.

Формализована математическая модель для комбинированного экстремального управления разбавлением шахтных вод на участке р. Ингулец. Вода для разбавления поступает из пруда-накопителя в балке Свистунова. Определяются регулирующие воздействия, которые поддерживают качество воды без превышения нормативных значений предельно допустимых сбросов. При этом минимизируются расходы воды на разбавление. Сценарный анализ вариантов показал экономию до 30% водных ресурсов, а именно 17,5 млн. м³, по сравнению с проведенным в феврале-марте 2021 разбавлением по существующему индивидуальному регламенту.

Ключевые слова: разбавление минерализованных вод, диффузные и точечные источники, комбинированный принцип, экстремальное управление, разностные балансовые уравнения, предельно допустимые сбросы.

P.I. Kovalchuk, O.S. Demchuk, V.P. Kovalchuk, H.A. Balykhina
Combined system of extreme control of mineralized water dilution in river basins

Abstract. The theory of combined systems of extreme control, which is used in technical systems, was developed and adapted in socio-ecological-economic systems. For example, river basins are such systems. A combined extreme control system has been formalized to control the dilution of mineralized mine waters in river sections. A mathematical model of the distribution of water masses and pollution in river beds from point and diffuse sources is proposed on the basis of a system of difference balance equations under the influence of stochastic uncontrolled disturbances. With regard to such conditions as adequate instrumentation, a combined control system has been developed that uses decision-making according to environmental and economic criteria based on the analysis of input and output data simultaneously, identification and tracking of the optimum in conditions of displacement under the influence of the disturbances of extreme characteristics of the system. The structural and functional diagram is represented by the open-loop diagram, the identification of which is carried out on the basis of modeling the process of water dilution in various situations at a specific object. A closed part with a recognition system as a corrector provides feedback. Formalized mathematical models of the dynamics of water masses and pollution from point and diffuse sources are of a general nature and can be used for the basins of other rivers. The extreme control system can adapt to the hydrological conditions and water quality parameters of a particular river.

A mathematical model has been formalized for the combined extreme control of mine water dilution in the section of the Ingulets river. The water for dilution comes from a storage pond in the Svystunov gully. Regulatory actions that maintain water quality without exceeding the normative values of maximum permissible discharge are determined. At the same time, water consumption for dilution is minimized. The scenario analysis of the options showed a saving of up to 30% of water resources, namely 17,5 million m³, compared to the dilution carried out in February-March 2021 according to the existing individual regulations.

Key words: dilution of mineralized water, diffuse and point sources, combined principle, extreme control, differential balance equations, maximum permissible discharge

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-307>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/307>

УДК 618.3.621.395

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ ВОДИ ПОВЕРХНЕВИХ ДЖЕРЕЛ ВОДОПОСТАЧАННЯ ЯК ЧИННИК ВИБОРУ МЕТОДУ ВОДОПІДГОТОВКИ

Д.В. Чарний¹, докт. техн. наук, Є.М. Мацелюк², канд. техн. наук, В.Д. Левицька³,
С.В. Марисик⁴, Н.М. Чернова⁵, канд. техн. наук

¹ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0001-6150-6433>; e-mail: dmitriych10@gmail.com

² Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0001-9960-6333>; e-mail: evgen1523@ukr.net;

³ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0003-2213-1696>; e-mail: veral@ukr.net;

⁴ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-0100-7787>; e-mail: sergsi.marisik@ukr.net;

⁵ Національний університет харчових технологій, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-5197-3430>; e-mail: notochka@ukr.net

Анотація. Розглянуто сучасний стан і формування якості води у водоймах, які слугують джерелами питного водопостачання. Виявлено, що одним із головних чинників, який впливає на формування якості води у водосховищах у теплий період із червня по листопад, стає фітопланктон, особливо в період «цвітіння» водосховищ. Здебільшого ці процеси запускаються за рахунок вибухоподібного розвитку синьо-зелених водоростей (ціанобактерій). Показано супутні чинники, що супроводжують це явище. Надана характеристика впливу глобальних кліматичних змін та нового складу стічних вод на якість води в поверхневих джерелах водопостачання. Якщо раніше скиди несли значні об'єми важких металів і нафтопродуктів, фенолів тощо, то зараз спостерігається їх зменшення у разі і навпаки – зростання об'ємів біогенних сполук, особливо фосфатів. Поява фосфатів обумовлена як потраплянням фосфатних добрив у водойми, так і побутовими причинами – масовим розповсюдженням миючих засобів на фосфатній основі та нездатністю діючих каналізаційних очисних споруд ефективно їх переробляти. Скринінговий моніторинг річкового басейну Дніпра засвідчив надзвичайно завищені рівні прогнозованої безпечної концентрації у воді гербіцидів, інсектицидів, фунгіцидів, а також таких фармацевтичних речовин як карбозепінін, лопінавір, діклофенак, ефавіренц тощо.

Тобто серед органічних забруднюючих речовин акцент змінюється з класичних продуктів нафтохімії на продукти, пов'язані з сільськогосподарським і фармацевтичним виробництвом, які у відповідних концентраціях можуть стимулювати розвиток фітопланктону.

Ефективні методи очищення поверхневих вод у сучасних умовах такі:

– фізичне затримання крупнодисперсних фракцій фітопланктону шляхом використання нових конструкцій водозабірних споруд;

– застосування нових фільтрувальних матеріалів, які ефективно затримують тонкодисперсні фракції фітопланктону на головних очисних спорудах і здатні до регенерації фільтрувального завантаження;

– використання нових окиснювачів-дезінфектантів, які не утворюють токсичні хлорорганічні сполуки, із попереднім вилученням мас фітопланктону;

Ключові слова: кліматично-антропогенні зміни, поверхневі води, фітопланктон, ціанобактерії, біогенні речовини, мікроцистини

Актуальність проблеми. Зміни клімату та характеру антропогенного навантаження на природні джерела питного водопостачання призводять до зміни якості води, перш за все, поверхневих водойм. В результаті інтенсивного надходження біогенних сполук у річки і водосховища в останніх спостерігається масовий розвиток фітопланктону, який ускладнює процеси очищення якісної питної

води на станціях водопідготовки. Як свідчить аналіз функціонування діючих станцій водопідготовки, виконаний ІВПіМ НААН (водоочисні станції міст Горішні Плавні, Нікополь, Житомир та ін.), існуючі технології очищення води не в змозі ефективно затримувати фітопланктон у їх блоках вхідних пристроїв і він надходить у водопровідну мережу, сприяючи повторному забрудненню питної води. Для

успішного затримання фітопланктону слід вивчити чинники, що сприяють утворенню органічних забруднень у воді, а також властивості і закономірності їх розвитку. В цій статті авторами здійснена спроба оцінити вплив нинішнього стану якості поверхневих вод на необхідність формування нових підходів до процесів очищення. Для розуміння напрямку удосконалення технологій водопідготовки необхідно проаналізувати причини, які формують якість поверхневих вод у сучасних умовах, і фактори, що впливають на ці процеси.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Формуванню якості поверхневих вод у сучасних умовах присвячені праці багатьох вітчизняних і зарубіжних дослідників [1–8, 12–14]. З погляду висвітлення чинників, які впливають на зміну якості води у водоймах, найбільший інтерес викликають результати досліджень вітчизняних авторів [3, 4, 6, 7, 10], оскільки вони стосуються якості води в основних джерелах питного водопостачання в Україні. Зокрема в працях [3, 6, 7, 8, 10] авторами досліджено вплив вітру, температури води, концентрації сполук азоту та фосфору, а також гумусових речовин на процеси «цвітіння» води у водосховищах. Результати досліджень «цвітіння» води з використанням супутникових даних наведено в [4, 5]. Дані досліджень свідчать про те, що розвиток водоростей у водосховищах пов'язаний з такими чинниками як інтенсивність водообміну, концентрація у воді сполук азоту і фосфору, температура води, кольоровість води. Зафіксовано, що період активного розвитку водоростей припадає на липень–серпень. Зазначається, що максимальна кількість клітин водоростей може сягати кількох мільйонів на кубічний сантиметр, а їх біомаса становить 20–30 мг/дм³. Важливими характеристиками водоростей з погляду оцінюваних їх впливу на процеси очищення води є, окрім зазначених, їх видовий склад та закономірності розвитку. Результати власних досліджень з цього напрямку наведені в даній статті.

Мета роботи. На основі виявлення статистичних залежностей визначити, чи з'явилися нові особливості і закономірності розвитку мас фітопланктону, які здатні впливати на якість води в поверхневих джерелах водопостачання басейну р. Дніпро, для відповідного встановлення напрямків удосконалення технологій підготовки питної води.

Методика досліджень. Аналізувались показники якості води, пов'язані з фітопланктоном: його кількість, видовий склад, темпера-

тура води, азотна і фосфатна складові. Ці дані були надані лабораторіями Дніпровської водопровідної станції м. Києва, водопровідними станціями очищення води міст Горішні Плавні, Житомир, Нікополь. Для аналізу використані методи статистичної обробки, які дозволяють виявити особливості і закономірності досліджуваного процесу – розвитку фітопланктону протягом 2006–2020 рр. До цих методів належать регресійний аналіз, спектральний аналіз часових рядів Фур'є тощо. Статистичну обробку виконували в пакетах Gnumeric, PSP та R для виявлення і оцінювання чинників, пов'язаних із життєдіяльністю фітопланктону, що можуть суттєво впливати на якість поверхневих вод. Результати аналізів наведені у вигляді графіків.

Результати статистичних аналізів та обговорення характеристик чинників, що формують якість поверхневих вод. Нині відбуваються докорінні зміни в якості і кількості води у водоймах України, зокрема – у водосховищах р. Дніпро і її притоків. Якщо раніше традиційно складним для процесів водопідготовки був зимовий період із льодовим покривом і, відповідно, зниженими концентраціями кисню, то зараз, навпаки, літній період із підвищеним температурним фоном стає все більш проблемним сезоном для технологів діючих у нас водопроводів.

Нами проаналізовано матеріали, надані Дніпровською водоочисною станцією за період 2006–2020 рр., які засвідчили бурхливий розквіт фітопланктону у водосховищах Дніпровського каскаду. Такий вибухоподібний розвиток фітопланктону, особливо в останні десятиліття (рис. 1–2), пояснюється низкою як природних, так і антропогенних чинників.

Слід зазначити, що на території України за останні два десятиліття вже проявився вплив глобальних кліматичних змін. Суттєво підвищилася середньорічна температура (значно подовжився теплий період) (рис. 3), змінився характер атмосферних опадів, які є головним джерелом надходження води на водозбори водойм, що розташовані на території України. Опадів стало менше, зими стали малосніжними, останнім часом спостерігається відсутність снігового покриву і самої зими як метеорологічного явища. Одночасно дощові опади набувають характер злив, при яких за одну добу може випасти місячна норма.

На практиці все це формується в сталі посушливі періоди терміном у 5–7 років. Прогнозне моделювання майже за всіма можливими моделями кліматичних змін передбачає, що найближчими десятиліттями

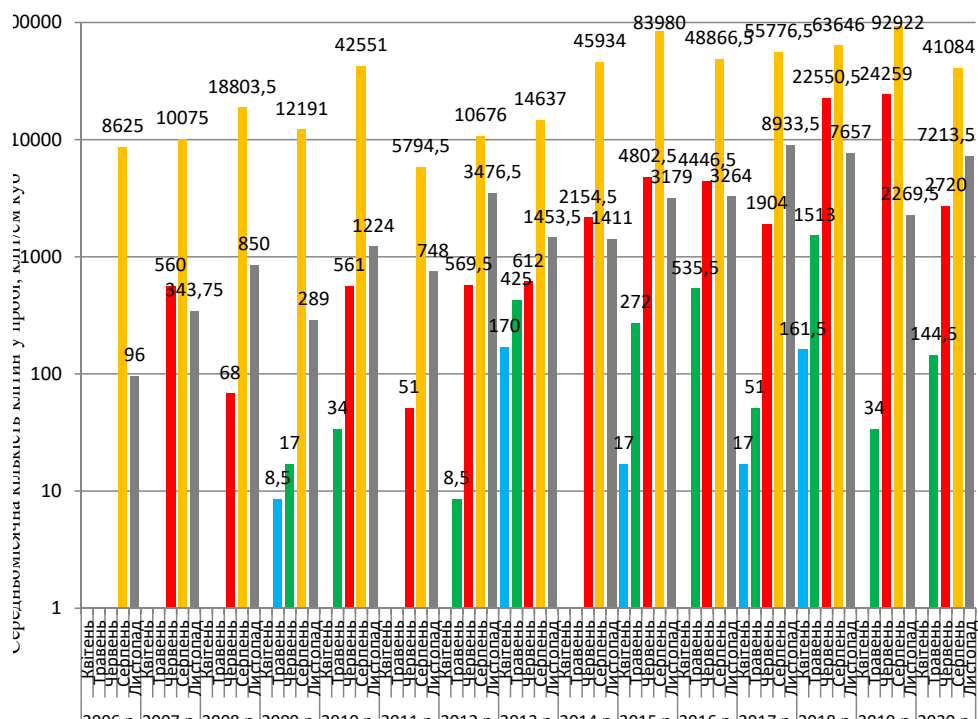


Рис. 1. Зміни кількості фітопланктону в районі Дніпровського водозабору м. Києва за 2006–2020 роки

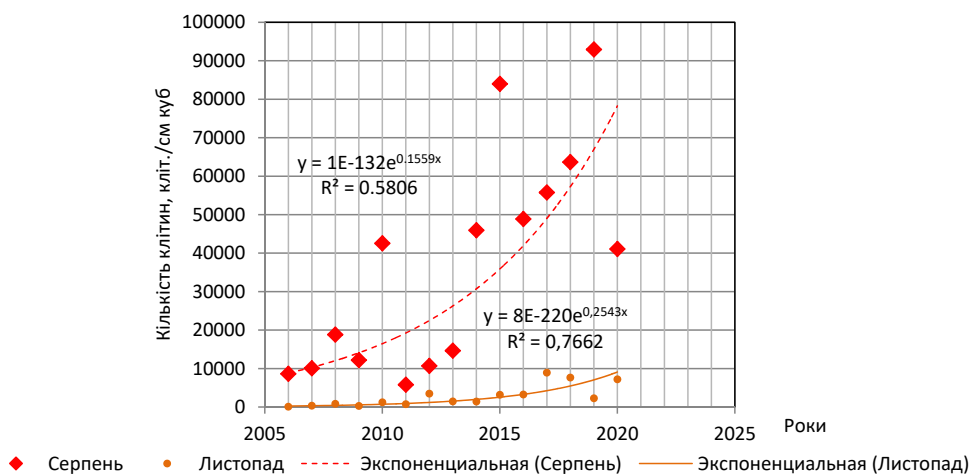


Рис. 2. Характер зміни кількості біомаси фітопланктону в період серпень, листопад 2006–2020 рр. Дніпровського водозабору м. Києва

відбудеться просування зони опустелювання на північ України. Багаторічні посухи вже зараз призвели до суттєвого пониження рівнів ґрунтових вод, пересихання криниць та малих річок, значного зниження водності та погіршення якості води середніх та великих річок України.

Окрім основних чинників, що безпосередньо впливають на погіршення якості поверхневих вод, а саме – гідрометеорологічних умов, змін клімату і зарегульованості

річок [3, 4], важливим стає зміна якісного складу стічних вод, які надходять у поверхневі водойми.

За даними Держводагентства України (Форми «2-ТП Водгосп») на сьогодні суттєво скорочено обсяги скидів стічних вод (рис. 4, 5), але одночасно змінився їх склад. Якщо раніше скиди несли значні об'єми важких металів і нафтопродуктів, фенолів тощо, то зараз спостерігаються їх зменшення у разі і, навпаки, зростання об'ємів біогенних сполук,

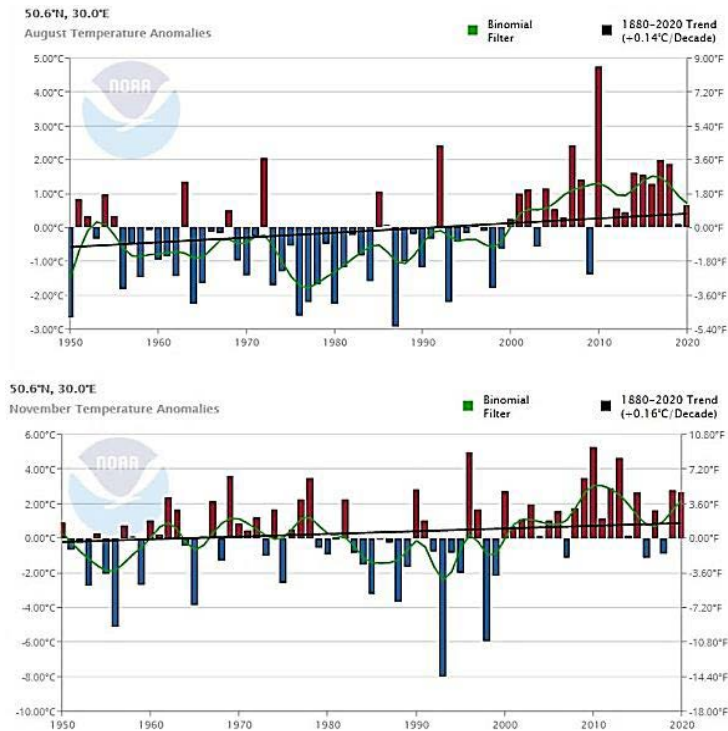


Рис. 3. Температурні аномалії поверхні за серпень і листопад у період з 1950 по 2020 рр.

(сформовано авторами за даними Національного центру екологічної інформації (NCEI) https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series/50.56791997,30.4902792/land_ocean/1/11/1950-2020?trend=true&trend_base=10&begtrendyear=1880&endtrendyear=2021&filter=true&filterType=binomial)

особливо фосфатів (рис. 5). Поява фосфатів обумовлена як потраплянням фосфатних добрив у водойми, так і побутовими причинами – масовим розповсюдженням миючих засобів на фосфатній основі та нездатністю діючих каналізаційних очисних споруд ефективно їх переробляти.

Зміну антропогенного впливу підтверджує також спільно проведений у 2020 р.

Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів України, Державним агентством водних ресурсів України, Водною Ініціативою Плюс Європейського Союзу для країн Східного партнерства (EUWI+) EU Member State Consortium Umweltbundesamt GmbH (Відень) та Office International de l'Eau (IOW) скринінговий моніторинг річкового басейну Дніпра [1]. Він засвідчив надзвичайно зави-

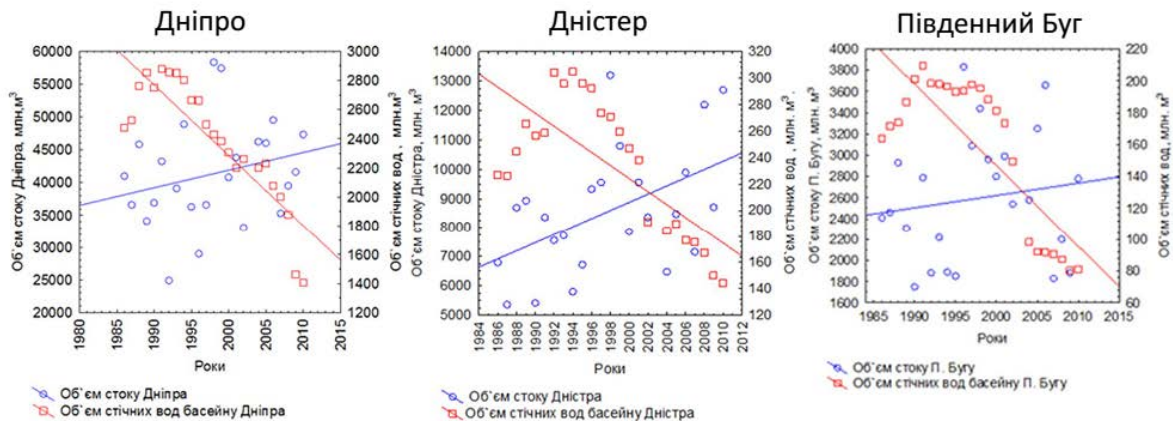


Рис. 4. Скиди стічних вод 1985–2011 рр. як чинники впливу на якість води поверхневих джерел водопостачання трьох басейнів: Дніпра, Дністра, Південного Бугу

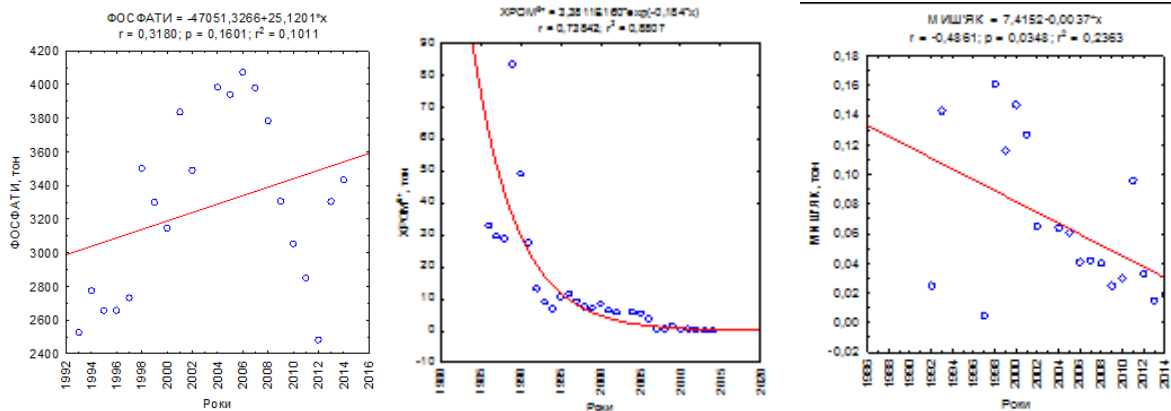


Рис. 5. Динаміка об'ємів фосфатів, хрому і миш'яку, що скидаються у водойми басейну Дніпра 1993–2014 рр.

щені рівні прогнозованої безпечної концентрації у воді гербіцидів, інсектицидів, фунгіцидів, а також таких фармацевтичних речовин як карбозепін, лопінавір, діклофенак, ефавіренс тощо.

Тобто серед органічних забруднюючих речовин акцент змінюється з класичних продуктів нафтохімії на продукти, пов'язані з сільськогосподарським і фармацевтичним виробництвом, які у відповідних концентраціях можуть стимулювати розвиток фітопланктону.

Відповідно, скиди біогенних речовин і підвищення температурного фону створили умови, при яких акваторії мілких рівнинних водосховищ стали надзвичайно сприятливим середовищем для розвитку фітопланктону, здебільшого ціанобактерій (синьо-зелених водоростей, у подальшому ціан) [3–11]. Ці твердження щодо провідної ролі ціан у формуванні тренду збільшення біомаси фітопланктону знайшли підтвердження і в нашому аналізі (рис. 6).

Фактично нині фітопланктон (здебільшого – 90% ціани), який раніше був результатом

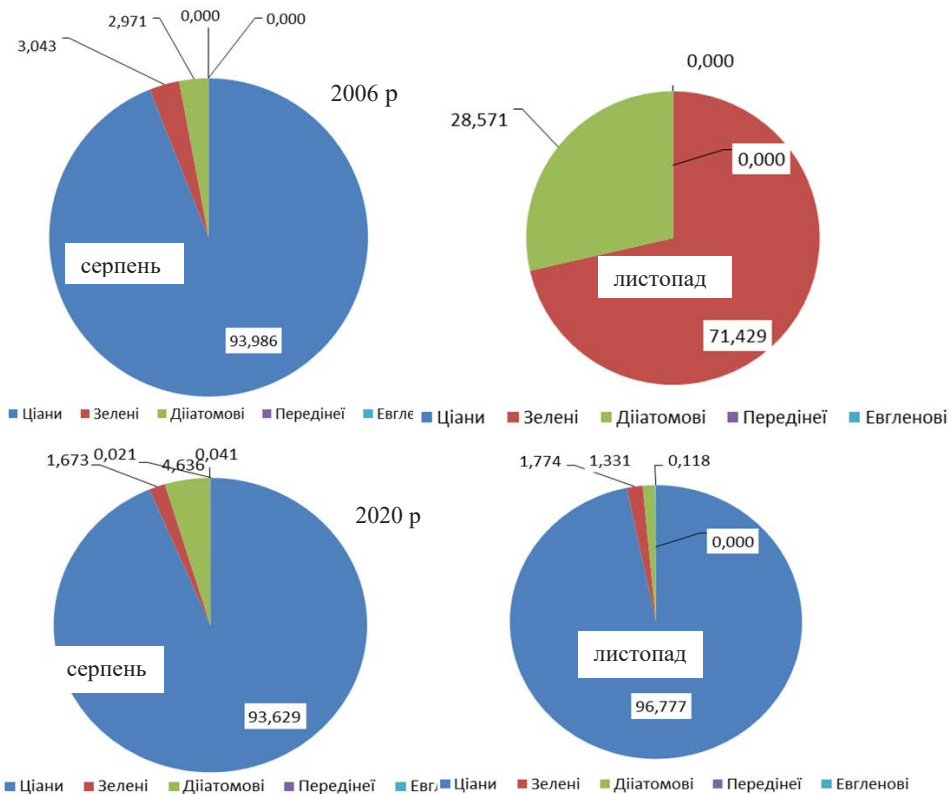


Рис. 6. Відсотковий розподіл відділів фітопланктону в районі Дніпровського водозабору м. Києва в серпні і листопаді 2006 і 2020 років відповідно

кліматично-антропогенних змін, наразі сам став головним чинником у теплий період року, що формує якість води у водосховищах. До речі період активного розвитку ціанобактерій також подовжився, нині він починається у червні і закінчується в листопаді (рис. 7).

Спрощену авторську схему процесів, які формують якість води в зарегульованих водоймах Дніпровського басейну на основі біогеохімічних перетворень, обумовлених різким нарощуванням біомаси ціан, наведено на (рис. 8).

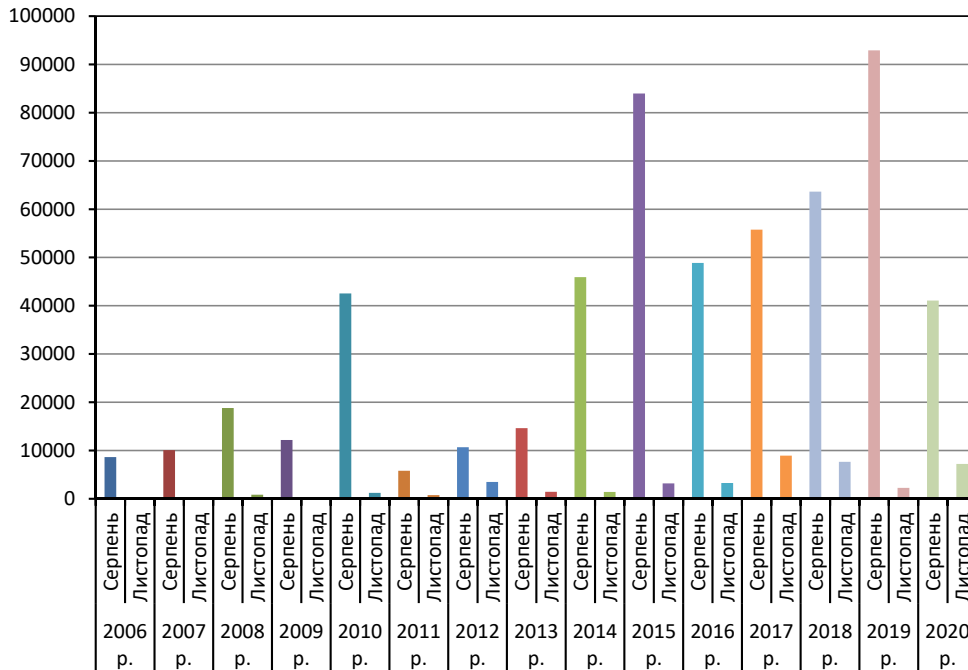


Рис. 7. Зміни середньомісячної концентрації ціанобактерій в районі Дніпровського водозабору м. Києва 2006–2020 рр. у серпні та листопаді

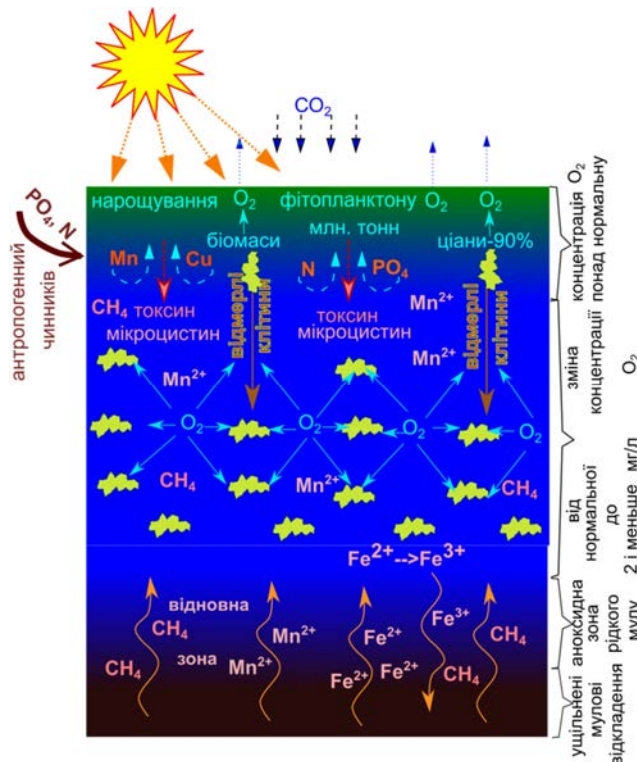


Рис. 8. Схема формування якості води в процесі «цвітіння» водосховищ

В процесі життєвого циклу ціани активно споживають, накопичують і переробляють розчинні сполуки азоту, фосфору, важкі метали, мікродози фармпрепаратів, пестицидів та гербіцидів, атмосферний вуглекислий газ тощо. шари води, де, переважно, і відбувається їх постмортальний розпад. В процесі розпаду відбувається вивільнення спожитих речовин у навколишнє середовище у вигляді токсинів, а також активне споживання розчинного у воді кисню. Все це призводить до створення аноксидних умов у придонних шарах, де, відповідно, утворюється відновне середовище, яке спричиняє вилуговування спожитих металів, наприклад мангану. З нерозчинних продуктів постмортального розпаду утворюється мулоподібна рідка суспензія, яка поступово концентрується і осідає на дно, спричиняючи замулення водосховищ.

Для аналізу тренду сезонного розвитку фітопланктону був обраний часовий ряд: квітень, травень, червень, серпень, листопад за 2006–2020 роки (рис. 1) в районі Дніпровського водозабору м. Києва.

Проведений візуальний аналіз часового ряду розвитку біомаси фітопланктону виявив, що у досліджуваному періоді за 2006–2020 рр. пік біомаси припадає на серпень, що є цілком традиційним, але почали простежуватися інші зміни у сезонному розвитку ціан. По-перше, почав розширюватися період їх активної життєдіяльності і якщо ще у 2006 р. їх не спостерігали у пробах за квітень, травень, червень, листопад, то вже у 2012–2013 рр. спостерігаємо їх появу у травні, червні

і листопаді вже у відносно значимій кількості. Також простежується систематичність у періодах коливань інтенсивності розвитку біомаси фітопланктону.

Аналіз наведених даних свідчить про циклічність розвитку фітопланктону – приблизно один значний пік у 4–5 років. Застосувавши метод спектрального аналізу часових рядів Фур'є ми вдалося встановити періодичність цих коливань, отримані графіки спектральної щільності наведені на рис. 9.

Спираючись на визначений тренд, ми можемо прогнозувати, що у найближчі 5–7 років водопровідні водозабірно-очисні споруди Дніпровського водозабору м. Києва почнуть працювати з водою, в якій концентрація фітопланктону може сягати понад 1 000 000 клітин/см³. Також слід врахувати, що пропорційно до нарощування біомаси фітопланктону буде підвищуватися і концентрація мікроцистину, що ставатиме все більш у забезпеченні водоспоживачів питною водою. Приблизно те саме буде відбуватися на всіх водозаборах дніпровського каскаду.

Фактично ми перебуваємо під загрозою, коли через 5–7 років відбудеться суттєве погіршення води в поверхневих джерелах водопостачання для понад 70% населення України, а існуючі технології водопідготовки є майже безпорадними перед навалюю фітопланктону. Отже, необхідно провести ретельний аналіз можливих заходів, які будуть здатні ефективно протидіяти проникненню цього забрудника у водопровідні мережі і убезпечити

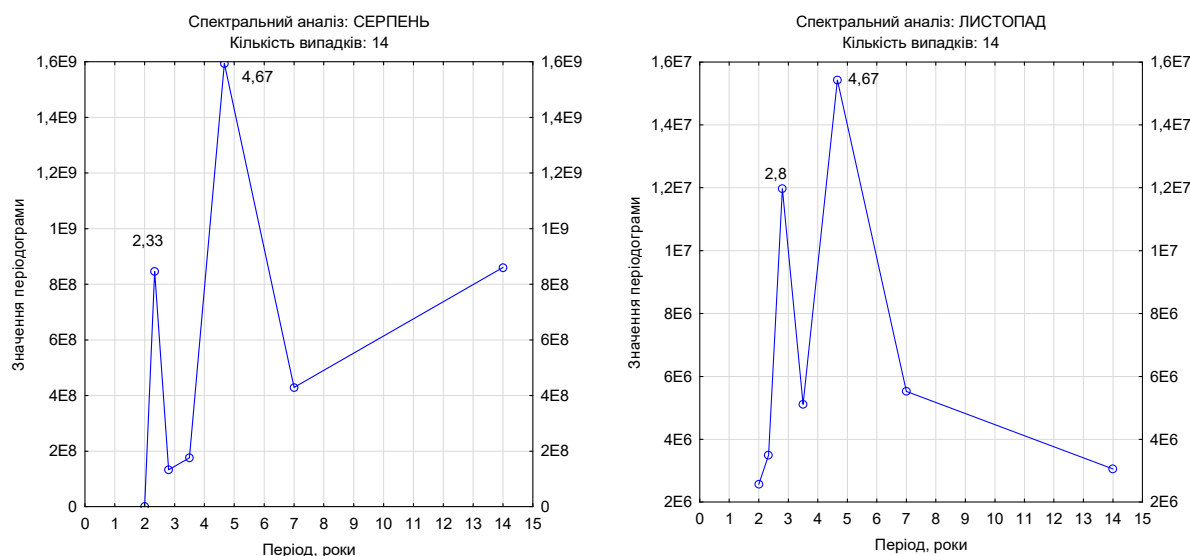


Рис. 9. Графіки спектральної щільності інтенсивності розвитку біомаси фітопланктону в районі Дніпровського водозабору м. Києва за 2006–2020 роки

споживачів питної води від його шкідливої дії на людський організм.

Напрями використання отриманих результатів. Визначений напрям розвитку фітопланктону, кількісні та якісні характеристики водоростей будуть використані при визначенні методів затримання даного виду забруднень вихідної води, а також при розробленні технологій та конструкцій водоочисних споруд у системах водопостачання.

На нашу думку, ефективні методи очищення поверхневих вод у сучасних умовах такі:

1) фізичне затримання крупнодисперсних фракцій фітопланктону шляхом використання нових конструкцій водозабірних споруд;

2) застосування нових фільтрувальних матеріалів, які ефективно затримують тонкодисперсні фракції фітопланктону на головних очисних спорудах і здатні до регенерації фільтрувального завантаження;

3) використання нових окиснювачів-дезінфектантів, які не утворюють токсичні хлороганічні сполуки, із попереднім вилученням мас фітопланктону.

Дієвим заходом щодо попередження інтенсивного розвитку фітопланктону є прийняття на законодавчому рівні рішення про заборону миючих засобів на основі фосфатів і впорядкування використання фосфатних добрив на прилеглих до акваторії сільськогосподарських угіддях.

Висновки. Скиди біогенних речовин у поверхневі об'єкти і зростання температурного фону створили умови для розвитку

фітопланктону, здебільшого ціанобактерій (синьо-зелених водоростей – ціан). Суттєво змінився склад фітопланктону, особливо це стосується холодного періоду. Так, якщо у 2006 р. в листопаді зелені водорості становили 71,4%, а 28,6% становили діатомові, ціани взагалі не були присутні у пробах, то в листопаді 2020 р. ціани склали 96,8%, зелені 1,8%, діатомові 1,3%, евгленові 0,1%. В процесі життєвого циклу ціани накопичують розчинні сполуки азоту, фосфору, важкі метали, мікродози фармпрепаратів тощо, а при їх розпаді відбувається вивільнення спожитих речовин у навколишнє середовище у вигляді токсинів, шкідливих для здоров'я людини. Сучасні технології водопідготовки не в змозі затримувати як тонкодисперсні фракції фітопланктону, так і продукти його розпаду. Розширення відсотка ціан стимулює поширення їх видового різноманіття, що зі свого боку спонукає продукування ними токсину – мікроцистину як засобу внутрішньої боротьби, а це призводить до вимог видалення ціан із води на перших стадіях водопідготовки без порушень їх клітинної оболонки, що знижує ризики підвищення токсинів у вихідній воді. Відповідно, необхідна розробка нових підходів до вирішення проблеми знешкодження фітопланктону при водопідготовці, які зводяться до фізичних способів його затримання на водозабірних спорудах та використання нових реагентів і фільтрувальних матеріалів на очисних спорудах.

Бібліографія

1. Слободник Я. Алігізакіс Н., Освальд П. Скринінговий моніторинг річкового басейну Дніпра. Київ : Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України; Державне агентство водних ресурсів України; Водна Ініціатива Плюс Європейського Союзу для країн Східного партнерства (EUWI+) Відень : Umweltbundesamt GmbH; Париж : Office International de l'Eau (IOE), 2021. 34 с.
2. Greven A.-C. Polycarbonate and polystyrene nanoparticles act as stressors to the innate immune system of fathead minnows (*Pimephales promelas*, rafinesque 1820) Dissertation, LMU München : Faculty of Veterinary Medicine, 2016. 112 p.
3. Вишневський В.І., Лопата Л.М. «Цвітіння» води на водозаборі дніпровської водопровідної станції. *Меліорація і водне господарство*. 2016. № 104. С. 31–35.
4. Вишневський В.І., Шевчук С.А. Використання даних дистанційного зондування землі у дослідженнях водних об'єктів України. Київ: «ІнтерпресЛТД», 2018. 116 с.
5. Толстохатко В.А. Моніторинг дніпровських водохранилищ по даним дистанційного зондирования землі со спутника Landsat. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2010. № 3/11(45). С. 49–53.
6. Вишневський В.І. Ріка Дніпро. Київ, «Інтерпрес ЛТД», 2011. 384 с.
7. Влияние антропогенного загрязнения на фитопланктон Каневского водохранилища (Украина) сравнение размерных спектров. Каменир Ю. и др. *Альгология*. 2008. Vol. 18, №. 2. С. 149–159.
8. Дослідження впливу біогенів на особливості розвитку евтрофних процесів у водосховищі Дениші. Аристархова Е.О. та інш. *Вісник ЖДТУ*. 2006. No. 3(38). С. 130–133.

9. Батаева Ю.В. Влияние экстремальных гидрохимических условий на видовой состав цианобактерий в водоемах нижней Волги / Ю. В. Батаева, Автореф. дис. ... канд. биол. наук Москва, 2005.

10. Єльнікова Т.О., Подчашинський Ю.О. Моделювання евтрофних процесів у водосховищах річки Тетерів Житомирської області на основі відеозображень проб води. Вісник ЖДТУ. 2015. № 3(74). С. 54–59.

11. Уберман В., Васьковец Л. Нормирование сбросов фосфатов на основе экологических ПДК 2014. С. 3–17.

12. Халиуллина Л.Ю., Яковлев В.А. Фитопланктон мелководий в верховьях Куйбышевского водохранилища Казань : Изд-во Академии наук РФ, 2015. 171 с.

13. Lehane L. National office of animal and plant health, agriculture, fisheries and forestry. Australia : Canberra, 2000.

14. Rick Jervis Toxins contaminate drinking water in northwest Ohio. USA today, 2014.

References

1. Slobodnyk, Ya., Aligizakis, N., & Osvald, P. (2021). Skryninhovyy monitoring richkovogo baseyny Dnipro [Screening monitoring of the Dnieper river basin] Kyiv : Ministerstvo zakhystu dovkillya ta pryrodnykh resursiv Ukrainy; Derzhavne ahentstvo vodnykh resursiv Ukrainy; Vodna Initsiatyva Plyus Yevropeyskoho Soyuzu dlya krayin Skhidnoho partnerstva (EUWI+) Viden : Umweltbundesamt GmbH; Paryzh : Office International de l'Eau (IOW). [in Ukrainian]

2. Greven, A.C. (2016). Polycarbonate and polystyrene nanoparticles act as stressors to the innate immune system of fathead minnows (*Pimephales promelas*, rafinesque 1820) Dissertation, LMU München: Faculty of Veterinary Medicine. [in English]

3. Vyshnevskyy, V.I., & Lopata, L.M. (2016). "Tsvitinnya" vody na vodozabori dniprovskoyi vodoprovodnoyi stantsiyi. [Flowering] of water at the water intake of the Dnieper water supply station]. *Melioratsiya i vodne hospodarstvo*, 104, 31–35. [in Ukrainian]

4. Vyshnevskyy, V.I., & Shevchu, S.A. (2018). Vykorystannya danykh dystantsiynoho zonduvannya zemli u doslidzhennyakh vodnykh obyektiv Ukrainy. [Use of remote sensing data in research of water bodies of Ukraine.] Kyiv, «Interpres LTD». [in Ukrainian]

5. Tolstokhatko, V.A. (2010). Monitoring dneprovskikh vodokhranilishch po dannym dystantsionnogo zondirovaniya zemli so sputnika Landsat. [Monitoring of the Dnieper reservoirs according to the data of remote sensing of the earth from the Landsat satellite] *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, № 3/11(45), 49–53. [in Russian]

6. Vyshnevskyy, V.I. (2011). Rika Dnipro [River Dnipro]. Kyiv, «Interpres LTD». [in Ukrainian]

7. Kamenir, Yu., Mikhaylyuk, T. I., & Popova, A. F. et al. (2008). Vliyaniye antropogennogo zagryazneniya na fitoplankton Kanevskogo vodokhranilishcha (Ukraina). sravneniye razmernykh spektrov. [The effect of anthropogenic pollution on phytoplankton of the Kanev reservoir (Ukraine). comparison of dimensional spectra] *Algologiya*. Vol. 18, № 2, 149–159. [in Russian]

8. Arystarkhova, E.O. Yelnikova, T.O., Kupriyets, O.L., & Truskavetska, L.M. (2006). Doslidzhennya vplyvu bioheniv na osoblyvosti rozvytku evtrofnykh protsesiv u vodoskhovyshchi Denyshi. [Research of influence of nutrients on features of development of eutrophic processes in Denishi reservoir] *Visnyk ZHDTU*, № 3 (38), 130–133. [in Ukrainian]

9. Batayeva, Yu.V. (2005). Vliyaniye ekstremalnykh gidrokhimicheskikh usloviy na vidovoy sostav tsianobakteriy v vodoyemakh nizhney Volgi. [Influence of extreme hydrochemical conditions on the species composition of cyanobacteria in water bodies of the lower Volga] *Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk*. Moskva. [in Russian]

10. Yelnikova, T.O., & Podchashynskyy, Yu.O. (2015). Modelyuvannya evtrofnykh protsesiv u vodoskhovyshchakh richky Teteriv Zhytomyrskoyi oblasti na osnovi videozobrazhen prob vody. [Modeling of eutrophic processes in the reservoirs of the river Teteriv, Zhytomyr region on the basis of video images of water samples.] *Visnyk ZHDTU*. 2015. № 3(74), 54–59. [in Ukrainian]

11. Uberman, V., & Vaskovets, L. (2014). Normirovaniye sbrosov fosfatov na osnove ekologicheskikh PDK [Rationing of Phosphate Discharges Based on Environmental MPC]. [in Russian]

12. Khaliullina, L.Yu., & Yakovlev, V.A. (2015). Fitoplankton melkovodiy v verkhov'yakh Kuybyshevskogo vodokhranilishcha. [Phytoplankton of shallow waters in the upper reaches of the Kuibyshev reservoir]. Kazan : Izd-vo Akademii nauk RF. [in Russian]

13. Lehane, L. (2000). National office of animal and plant health, agriculture, fisheries and forestry. Australia : Canberra. [in English]

14. Rick Jervis. (2014). Toxins contaminate drinking water in northwest Ohio. USA today. [in English]

Д.В. Чарный, Е.М. Мацелюк, В.Д. Левицкая,
С.В. Марысык, Н.М. Чернова

Особенности формирования качества воды поверхностных источников водоснабжения как фактор выбора метода водоподготовки

Аннотация. Рассмотрено современное состояние и формирование качества воды в водоемах, служащих источниками питьевого водоснабжения. Выявлено, что одним из главных факторов, влияющих на формирование качества воды в водохранилищах в теплый период с июня по ноябрь, становится фитопланктон, особенно в период «цветения» водохранилищ. В большинстве своем эти процессы запускаются за счет взрывоподобного развития сине-зеленых водорослей (цианобактерий). Показаны сопутствующие факторы, сопровождающие это явление. Дана характеристика влияния глобальных климатических изменений и нового состава сточных вод на качество воды в поверхностных источниках водоснабжения. Если раньше сбросы несли значительные объемы тяжелых металлов и нефтепродуктов, фенолов и т.д., то сейчас наблюдается их уменьшение в разы и наоборот – рост объемов биогенных соединений, особенно фосфатов. Появление фосфатов обусловлено как попаданием фосфатных удобрений в водоемы, так и бытовыми причинами – массовым распространением моющих средств на фосфатной основе и неспособностью действующих канализационных очистных сооружений эффективно их перерабатывать. Скрининговый мониторинг речного бассейна Днепра показал чрезвычайно завышенные уровни прогнозируемой безопасной концентрации в воде гербицидов, инсектицидов, фунгицидов, а также таких фармацевтических веществ как карбомазепин, лопинавир, диклофенак, эфавиренц и т.д.

Эффективные методы очистки поверхностных вод в современных условиях следующие:

- физическое задержание крупнодисперсных фракций фитопланктона путём использования новых конструкций водозаборных сооружений;
- применение новых фильтровальных материалов, эффективно задерживающих тонкодисперсные фракции фитопланктона на главных очистных сооружениях и способных к регенерации фильтровальной загрузки;
- использование новых окислителей-дезинфектантов, не образующих токсичных хлорорганических соединений, с предварительным извлечением масс фитопланктона.

Ключевые слова: климатически-антропогенные изменения, поверхностные воды, фитопланктон, цианобактерии, биогенные вещества, микроцистин

D.V. Charnyy, Ye.M. Matseluk, V.D. Levytska,
S.V. Marysyk, N.M. Chernova

Peculiarities of formation of water quality of surface sources of water supply as a factor of a choice of a method of water treatment

Abstract. The current state and formation of water quality in reservoirs that serve as sources of drinking water supply were considered. It was revealed that phytoplankton becomes one of the main factors influencing the formation of water quality in reservoirs in the warm period from June to November, especially during the period of reservoirs “blooming”. Mostly these processes are triggered by the explosive development of blue-green algae (cyanobacteria). The factors accompanying this phenomenon are shown. The characteristic of the influence of global climate change and new composition of wastewater on water quality in surface water supply sources is given. If earlier the sewage contained significant volumes of heavy metals, oil products, phenols, etc., now they are observed to decrease at several times and vice versa – an increase in the volume of biogenic compounds, especially phosphates is observed. The emergence of phosphates is caused both by the ingress of phosphate fertilizers into water bodies, and by household reasons – the massive distribution of phosphate-based detergents and the inability of existing sewage treatment plants to efficiently process them. Screening monitoring of the Dnieper river basin showed extremely high levels of the predicted safe concentration of herbicides, insecticides, fungicides, as well as pharmaceutical substances such as carbamazepine, lopinavir, diclofenac, efavirenz, etc. in water.

That is, among organic pollutants, the focus changes from classic petrochemical products to the products related to agricultural and pharmaceutical production, which, in certain concentrations, can stimulate the development of phytoplankton.

The effective methods for treating surface water in modern conditions are as follows:

- physical retention of coarse fractions of phytoplankton using new designs of water intake structures;
- the use of new filter materials that effectively trap finely dispersed phytoplankton fractions at the main treatment facilities and are capable of regenerating the filter media;
- the use of new oxidizing agents-disinfectants that do not form toxic organochlorine compounds, with preliminary extraction of phytoplankton masses.

Key words: climatic and anthropogenic changes, surface waters, phytoplankton, cyanobacteria, biogenic substances, microcystin

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-301>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/301>

УДК 628.38

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОБРОБКИ ТА УТИЛІЗАЦІЇ ВТОРИННИХ ОСАДІВ ГОСПОДАРСЬКО-ПОБУТОВИХ СТІЧНИХ ВОД

О.В. Зоріна¹, докт. біолог. наук, Є.О. Маврикін², аспірант

¹ ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМНУ», Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-1557-8521>; e-mail: wateramnu@ukr.net;

² Інститут водних проблем і меліорації НААНУ, Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6193-8890>; e-mail: evgeniy_mavrikin@ukr.net

Анотація. На сьогодні забруднення довкілля, зокрема поверхневих вод, спричинило екологічну кризу у багатьох країнах світу. Одним із чинників цього є використання застарілих підходів з обробки та утилізації осадів стічних вод. У роботі проведено вивчення літературних джерел із метою аналізу запропонованих рішень щодо поводження з вторинними осадами господарсько-побутових стічних вод у різних країнах. Для знешкодження осаду стічних вод науковцями розглядається можливість отримання добрива в умовах біосульфидогенезу під час дисиміляційного відновлення малорозчинних сульфатів або застосування технології посиленого окислення. Запропоновано також нову концепцію очищення господарсько-побутових стічних вод загалом, що вирішує питання управління мулом стічних вод на місці, де він утворюється. Основними напрямками сталого управління осадами є використання в сільському господарстві в якості добрива і для рекультивації спустошених або деградованих земель, а також рекуперация енергії спалюванням і альтернативними термічними методами, такими як піроліз, квазіпіроліз і газифікація. Встановлено, що доцільність застосування тієї чи іншої технології утилізації осадів господарсько-побутових стічних вод залежить від багатьох місцевих чинників, зокрема: продуктивності каналізаційної станції; складу та методів обробки стічних вод та їх осадів; ефективності роботи очисних споруд; кліматичного поясу місця розташування каналізаційної системи; доступності енергоносіїв та матеріальних ресурсів тощо. На сьогодні актуальним завданням є запровадження моніторингу якісного складу осадів стічних вод, а також ґрунтів та природних вод за забруднюючими речовинами, що можуть виявлятися у стічних водах відповідного населеного пункту, з метою прийняття оперативних рішень для управління екологічними ризиками, а також проведення наукових досліджень з удосконалення технологій переробки та утилізації осадів стічних вод різного складу в системах сільського господарства, що сприятиме захисту навколишнього природного середовища від забруднень та раціональному використанню земель.

Ключові слова: каналізаційні очисні споруди, осади стічних вод, активний мул

Актуальність. Забруднення навколишнього природного середовища біологічними та хімічними агентами внаслідок виробничої діяльності людини та недосконале природоохоронне законодавство призводять до екологічної кризи в багатьох країнах світу. За інформацією з 4000 європейських сайтів хімічні речовини (пестициди, трибутилол, поліциклічні ароматичні вуглеводні, бромні сполуки тощо) загрожують біологічному розмаїттю майже половини водних об'єктів у континентальному масштабі [1, 2]. Пріоритетними забруднювачами поверхневої води в Україні вважаються: феноли, залізо, нафтопродукти, СПАР, іони важких металів, азот, фосфор, органічні речовини, показники епідемічної безпеки тощо [3, 4]. При цьому економічно прийнятні технології водоочищення та знезараження, що нині використовуються на водопровідних станціях, не спроможні довести

якість поверхневої води до безпечного рівня. Велика кількість небезпечних для здоров'я забруднень транзитом надходять через водопровідні очисні споруди у питну воду та призводять до інфекційних та неінфекційних захворювань населення [5–7].

Значний вплив на склад поверхневої води мають: урбанізовані території, де на фоні кліматичних змін [8] порушуються правила утримання водоохоронних зон (самовільне будівництво на берегах водойм); скиди неочищених або недостатньо очищених поверхневих, виробничих, лікарняних та господарсько-побутових стічних вод [9, 10]; неналежна утилізація утвореного осаду стічних вод [11–13]. Нещодавно дійшли висновку, що в такому осаді потенціально можуть бути присутніми близько 540 видів органічних сполук через їх використання в будівельних матеріалах, фармацевтичних препаратах і товарах

особистої гігієни, при цьому фактично виявили 192 сполуки, з-поміж яких 23 визнали пріоритетними забруднювачами [14]. У мулі стічних вод регулярно виявляються віруси та паразити [15], у великій кількості видів – бактерії та гриби [16], деякі бактерії є патогенними [17].

На жаль, традиційні технологічні підходи, що використовуються в каналізації України, морально застаріли [18]. Зокрема, технологія очищення стоків, що застосовується, дуже складна в експлуатації, має невелику ефективність та велику питому вартість [19]. При цьому захоронення відходів, що утворюються на каналізаційних очисних станціях, а саме осадів із первинних відстійників та після споруд біологічної очистки (сирого осаду, надлишкового активного мулу, надлишкової біоплівки) також називають застарілим та нерациональним використанням земель, що поширено в Україні та щодалі займає усе більші площі й призводить до забруднення довкілля [20–22]. Актуальність проблеми впровадження сучасних технологій поводження з осадами-відходами відображена в низці Законів та нормативних документів України, при цьому ігнорується сам факт відсутності технологій з їх утилізації [23].

Мета: проаналізувати запропоновані у світі рішення щодо поводження з вторинними осадами каналізаційних господарсько-побутових стічних вод.

Результати досліджень. Осади стічних вод залежно від способів їх обробки та видалення поділяють на види: первинні – грубі, важкі, жирові, сирі; вторинні – активний мул вторинних відстійників, анаеробно сброжений у метантенках, аеробно стабілізований активний мул або його суміш з осадом первинних відстійників, активний мул із згущувачів, підсушені на мулових майданчиках чи термічно висушені [24]. Склад та кількість осадів стічних вод залежить від типу, режиму експлуатації й ефективності роботи споруд для механічного та біологічного очищення стічних вод, а міських стічних вод – також від кількості й виду виробничих стічних вод, що очищаються разом із господарсько-побутовими, інших технологічних параметрів [25, 26].

Основне завдання обробки осадів стічних вод полягає в отриманні кінцевого продукту, властивості якого забезпечують можливість його утилізації або зводять до мінімуму шкоду довкіллю [25]. Загалом на очисних спорудах застосовують такі процеси обробки осадів стічних вод: попереднє ущільнення (або згущення); аеробну стабілізацію

в стабілізаторах при продуктивності станції 64–100 тис. м³/добу чи анаеробну стабілізацію в метантенках при продуктивності станції понад 100 тис. м³/добу; механічне зневоднення з попереднім кондиціонуванням осадів на вакуум-фільтрах, фільтр-пресах або центрифугах; зневоднення на мулових майданчиках; термічну обробку шляхом сушіння і спалювання. Аеробну стабілізацію здійснюють в аераційних спорудах типу аеротенків, вона полягає в тривалій аерації осаду, де частина органічної речовини осадів окиснюється в результаті аеробних біохімічних процесів за температури 14–25 °С. За такої технології не відбувається знезаражування і дегельмінтизації, тому вона не забезпечує вимог для безпечного використання осадів як органічних добрив. Аеробний біохімічний процес розкладання органічних сполук можна проводити методом компостування. Результатом є знезаражування, зниження вологості, покращення фізико-механічних властивостей осадів. За результатами досліджень економічно вигіднішими технологіями обробки осадів стічних вод є компостування у валках і тунельне компостування [27]. Метод забезпечує необхідні характеристики для використання осадів як органічного добрива [25]. Його альтернатива – вермікомпостування – становить собою сучасну, недорогу і екологічно чисту біотехнологію, в якій дощові черв'яки використовуються в якості природних біореакторів для розкладання органічних речовин. Вони також накопичують важкі метали таким чином: Cd > Co > Cu > Zn > Ni > Pb > Cr [28]. У процесі компостування та вермікомпостування осаду стічних вод спостерігалися позитивні ефекти від додавання біовугілля, отриманого з мулу стічних вод, при цьому поліпшується біодоступність фосфору та поліциклічних ароматичних вуглеводнів [29–31].

Анаеробну стабілізацію або зброджування здійснюють в інженерних спорудах: септиках (при продуктивності станції до 25 м³/доб), двоярусних відстійниках або освітлювачах (при продуктивності станції до 10 тис. м³/доб), метантенках (при продуктивності станції більше 10 тис. м³/доб), де під час метанового зброджування відбувається анаеробне розкладання близько 70 органічних речовин із виділенням переважно метану і вуглекислого газу. За умови проведення процесу в цих спорудах в термофільних умовах (температура 53 °С) забезпечується повне знезаражування осадів і повна дегельмінтизація осадів, що є достатнім для безпечного використання в подальшому як органічного

добрива [25, 32–34]. При цьому утворюється інший побічний продукт – дігестат, який все ще містить велику кількість поживних (амоній, фосфат і калій) та забруднюючих речовин і потребує обробки. Було доведено, що використання дігестатів може замінити або скоротити використання мінеральних добрив у виробництві сільськогосподарських рослин [35]. Дігестат успішно застосовується з іншими відходами в якості органічної фракції в процесі вермікомпостування [36].

Як зазначалося вище, використання мулових майданчиків для захоронення осаду стічних вод – це традиційний та, на жаль, застарілий нераціональний підхід поводження з осадом господарсько-побутових стічних вод [37], поширений в Україні (> 95%), а у Німеччині задекларовано повну відмову від такого складування осадів стічних вод, на майданчики дозволено складувати лише осади з умістом органічної речовини менше 5% [27]. Зневоднений на мулових майданчиках або механічно осад стічних вод можна змішувати з неродючим ґрунтом, торфом, іншими домішками [25]. Використання новітніх сушарок для підсушеного осаду на мулових майданчиках вологістю 60–70% дозволяє зменшити його вологість до 25% і нижче. При такому потужному термічному обробленні обсяг зневодненого осаду зменшується у 13 разів [38].

На думку деяких науковців, в Україні значного розповсюдження набуває метод спалювання осадів, що проводять для максимального зменшення їх об'єму. Процес здійснюють переважно в установках із псевдозрідженим шаром піску [25]. Після спалювання осад стічних вод все ще багатий кремнеземом, глиноземом, оксидом кальцію і оксидом заліза, тому його можна використовувати у виробництві будівельних матеріалів [39]. Науковці Інституту газу НАН стверджують, що на сьогодні представляють інтерес низькотемпературні технології утилізації осадів стічних вод, за яких важкі метали залишаються у твердому залишку: піроліз, окислювальний піроліз, газифікація. У процесі газифікації ними отримано генераторний газ та гранули високої твердості, що можна використовувати як наповнювачі у будівництві [24]. Зокрема, у процесі піролізу навіть твердих побутових відходів відсутні шкідливі викиди в довкілля, тобто цей метод є перспективним [40] та планується використовувати при розробці стратегії безпечного видалення осаду стічних вод і відходів біомаси у Китаї [41]. Результати натурних досліджень експериментальних асфальтобетонних покриттів, модифікованих

техногенними відходами (осадом стічних вод), свідчать про високу їх якість, вони не поступаються за своїми показниками покриттю з традиційного асфальтобетону [42]. На думку інших науковців [23], спалювання та використання в будівництві може бути виправдано тільки у випадку неможливості чи економічної недоцільності застосування інших методів утилізації.

У Європі дуже жорсткі нормативи для забруднюючих атмосферне повітря речовин, що виділяються при спалюванні мулового осаду (Директива 2000/76/ЄС) [23]. Однак, попри високі інвестиційні та експлуатаційні витрати, на сьогодні все більше муніципальних підприємств європейських країн споруджують сучасні комплекси із спалювання осадів [44, 45], що рекомендується доукомплектовувати камерно-мембранними фільтрами-пресами в одному закритому корпусі [46]. Загалом до переваг термічного методу утилізації мулових осадів належить висока ефективність, знезараження осадів стічних вод від патогенної мікрофлори та значне зниження обсягів депонованих мулових осадів [23].

Багато дослідників повідомляли про позитивний досвід використання мулу стічних вод для відновлення деградованого природного та антропогенного ґрунту [47], контролю ерозії, стабілізації схилів [48], виробництва харчової добавки до раціону тварин [49], у сільському господарстві [50, 51] для виробництва гумусових ґрунтів [25] та добрив. Однак, використання осадів стічних вод в якості добрив може призводити до великих ризиків для здоров'я людей та забруднення навколишнього середовища [52].

У науковій літературі [53, 54] представлено результати досліджень ступеня фітотоксичності різних за технологією виготовлення осадів стічних вод Бортницької станції аерації ВАТ АК «Київводоканал» і їх сумішей із сирими осадами. Встановлено, що за комплексом еколого-мікробіологічних показників термофільнозброджені аеробно-стабілізовані осади стічних вод є придатними для сільськогосподарської утилізації (пряме внесення, переробка на добрива). Однак існує група міст, осад стічних вод яких через біологічне забруднення треба піддавати ефективнішому знезараженню, достатній рівень якого можна досягнути за дотримання технологічних процесів у циклі оброблення на очисних спорудах, тривалішим періодом витримування на мулових майданчиках (3 роки і більше) або біотермічним переробленням з вуглецевмісними наповнювачами у біокомпости.

У Європі Директивою 86/278/ЄЕС регламентовано застосування мулових осадів стічних вод в якості добрив залежно від способу їх переробки (звичайної або поглибленої) [23]. У Люксембурзі в сільському господарстві використовується 90%, у Фінляндії – 100%, Швейцарії – 70%, Німеччині – 38%, Франції – 23%, Бельгії – 10%, а у середньому у країнах ЄС – 54%, США – 20–45% від річної кількості осадів. У Німеччині осад стічних вод заборонено застосовувати на землях водорозділу, в громадських місцях або парках. У Росії дозволено його застосовувати тільки при вирощуванні зернових, чагарників і технічних культур, а також розсад лісорозсадників. Основні фактори, що гальмують використання осадів стічних вод в якості добрив: в'язка консистенція, відсутність відповідної сільськогосподарської техніки на полях, висока вологість та нерентабельність їх транспортування на відстань більше 4 км, наявність в їх складі патогенних мікроорганізмів, гельмінів, важких металів [55–57]. На сьогодні, на думку науковців, перероблений осад стічних вод розглядається як потенційне джерело забруднення ґрунту органічними і неорганічними забруднювачами і патогенами: потенційно токсичні елементи (цинк, мідь, кадмій, свинець, срібло та ін.); поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ); поліхлорбіфеніли (ПХБ); біоциди і фітофармацевтичні препарати; фармацевтичні препарати, засоби особистої гігієни (РПСР) і залишкові продукти; синтетичні гормони; мікропластик; кінцеві продукти життєвого циклу нанотехнологій; і мікроорганізми, такі як *Escherichia coli* або *Salmonella typhimurium* [58].

З метою впровадження технологій повторного використання осадів стічних вод нині є актуальним проведення моніторингу їх складу за вмістом органічних забруднювачів та розробка технологій їх обробки, що сприятимуть зменшенню концентрацій таких речовин [60–62]. Анаеробне перетравлення, компостування, навіть термічна карбонізація осаду стічних вод не гарантують отримання продукту високої якості без забруднень [16, 59].

Науковцями розглядається можливість знешкодження осаду стічних вод шляхом отримання комплексного органо-мінерального добрива в умовах біосульфідогенезу під час дисиміляційного відновлення малорозчинних сульфатів. За характером зміни кінетики виходу біогенного сірковуглецю, зміни концентрації ацетату і швидкості поглинання сульфатів можна здійснювати прогноз процесу біосульфідогенезу та знаходити оптимальні параметри системи [63].

Велику зацікавленість на сучасному етапі розвитку технологій очищення стічних вод та утилізації осадів має технологія посиленого окислення АОР (Advanced Oxidation Process) [64–66], що використовуються для видалення біологічно стійких органічних забруднювачів (ХСК) та для інактивації патогенних мікроорганізмів, які неможливо видалити звичайними методами. Під час застосування методу АОР застосовують такі типи окиснювачів як озон, перекис водню, діоксид титану тощо. Технологія АОР може бути використана для зниження витрати реагентів (заліза, вапна) при кондиціонуванні осаду міських стічних вод у разі фільтрації на камерно-мембранному фільтр-пресі. Економічно і технологічно оптимальнішим співвідношення $Fe/Ca/H_2O_2$ є 2/5/1 при дозуванні перекису водню (H_2O_2) на рівні 1 г/л. При застосуванні відповідних реагентів у такому співвідношенні можна отримати фільтраційний шлам із залишковою вологістю 64–65%, а при використанні тільки заліза і вапна отримують фільтраційний шлам із залишковою вологістю 72–73%.

Інші науковці пропонують принципово нову технологію для малих та середніх комунальних очисних споруд, що веде до зміни концепції процесу очищення стічних вод загалом та вирішує питання управління мулом стічних вод на місці, де він утворюється. В описаному процесі мул стічних вод адекватно обробляється на спеціальному апараті і може використовуватися як джерело безпатогенного компосту або сировина для простої теплової установки [67].

Загалом українським дослідником [42] зазначено три основні напрями утилізації осаду біологічно очищених стічних вод, що мають переваги, недоліки і невирішені питання, які потребують додаткових досліджень для вибору оптимального варіанта:

- зберігання на мулових майданчиках;
- термічна обробка, що за економічними та екологічними показниками дозволяє виробляти електричну та теплову енергію або отримувати внаслідок потужної термообробки порошок, що доцільно використовувати у дорожньому будівництві;
- використання в якості добрива (звичайного, комбінованого, регуляторів росту). При цьому на кожній каналізаційній станції слід проводити дослідження складу та властивостей локального осаду.

Іспанські науковці [68] вважають, що основними напрямками сталого управління осадом стічних вод є:

а) рекуперация (перетворення стічних вод у матерію): використання в сільському господарстві (безпосередньо в якості добрива) і рекультивация спустошених або деградованих земель;

б) рекуперация енергії спалюванням і альтернативними термічними методами, такими як піроліз, квазіпіроліз і газифікація.

На жаль, нині важливіші рішення, що стосуються обробки осаду стічних вод, все ще приймаються на основі економічних і політичних критеріїв [58]. Однак, питання утилізації осаду є комплексною задачею, до рішення якої слід підходити, враховуючи ще й локальні умови, такі як: наявність існуючої інфраструктури очисних споруд водовідведення, доступність енергоносіїв, кліматичні умови, властивості ґрунту, фауни і флори, вплив осаду стічних вод на екосистеми тощо [69, 70]. Не можна вказати на універсальне рішення поводження з осадами стічних вод, оскільки це залежить від місцевих умов, які можуть сильно варіюватися залежно від регіону або країни [58].

Висновки. Аналіз запропонованих у різних країнах світу рішень щодо поводження з вторинними осадами каналізаційних господарсько-побутових стічних вод дозволив встановити:

1. До перспективних шляхів утилізації осадів господарсько-побутових стічних вод

відносять термічну обробку та використання в якості добрив в системах сільського господарства, що сприятиме захисту навколишнього природного середовища від забруднень та раціональному використанню земель.

2. Доцільність застосування тієї чи іншої технології утилізації осадів господарсько-побутових стічних вод залежить від багатьох місцевих умов, зокрема: продуктивності каналізаційної станції; складу та методів обробки стічних вод та їх осадів; ефективності роботи очисних споруд; кліматичного поясу місця розташування каналізаційної системи; доступності енергоносіїв та матеріальних ресурсів тощо.

Актуальними завданнями сьогодення є:

– проведення моніторингу якісного складу осадів стічних вод, а також ґрунтів та природних вод за забруднюючими речовинами, що можуть виявлятися у стічних водах відповідного населеного пункту, з метою прийняття оперативних рішень для управління екологічними ризиками;

– проведення наукових досліджень з удосконалення технологій переробки та утилізації осадів господарсько-побутових стічних вод різного складу в системах сільського господарства за умов мінімізації сумарних витрат матеріальних та енергетичних ресурсів.

Бібліографія

1. Malaj E., von der Ohe P.C., Grote M. et al. Organic chemicals jeopardize the health of freshwater ecosystems on the continental scale. *PNAS*. 2014. № 111(26). P. 9549–9554.
2. Carlo Fezzi, Amii R. Harwood, Andrew A. Lovett, Ian J. Bateman. The environmental impact of climate change adaptation on land use and water quality. *Nature Climate Change*. 2015. [Electronic resource]. <https://www.sciencedaily.com/releases/2015/03/150320091319.htm>
3. Пічуря В.І., Шахман І.О., Бистрянцева А.М. Просторово-часова закономірність формування якості води в річці Дніпро. *Біоресурси та природокористування*. 2018. № 1–2. С. 44–57.
4. Основи екології : підручник для студ. вищих навч. закладів / В.Г. Бардов та ін. Вінниця : Нова Книга, 2013. 424 с.
5. Зоріна О.В. Наукове обґрунтування можливості використання Дніпровського водосховища в якості джерела питного водопостачання ПАТ «Запоріжсталь» у сучасних умовах. *Біоресурси та природокористування*. 2018. Том. 10. № 1–2. С. 64–72.
6. Shih Wei Huang, Bing Mu Hsu, Yen Jui Su, et al. Occurrence of diarrheagenic *Escherichia coli* genes in raw water of water treatment plants. *Environmental Science and Pollution Research*. 2012. Vol. 19. P. 2776–2783.
7. Liu J.L., Li X.Y., Xie Y.F., Tang H. Characterization of soluble microbial products as precursors of disinfection byproducts in drinking water supply. *Science of The Total Environment*. 2014. Vol. 472. P. 818–824.
8. El-Shehawy R., Gorokhova E., Fernández-Pizas F., F. F. del Campo. Global warming and hepatotoxin production by cyanobacteria: What can we learn from experiments. *Water Research*. 2012. Vol. 46(5). P. 1420–1429.
9. Мосійчук Я.Б., Хоружий П.Д., Недашковський І.П. Удосконалення технологій замкненого водопостачання на підприємствах агропромислового комплексу. *Меліорація і водне господарство*. 2020. № 2. С. 146–153.

10. Cristina Elena, Roca Daniela. Theoretical aspects of advanced methods of wastewater treatment in order to eliminate pollutants from surface waters. *Agronomy Series of Scientific Research*. 2012. Vol. 55(2). P. 33–37.
11. Qu X, Zhao Y, Yu R, Li Y, Falzone C, Smith G, Ikehata K. Health effects associated with wastewater treatment, reuse, and disposal. *Water Environ Res*. 2016. № 88(10). P. 1823–1855.
12. Choudri BS, Charabi Y, Ahmed M. Health effects associated with wastewater treatment. *Water Environ Res*. 2018. Vol. 90(10). P. 1759–1776.
13. Muñoz-Paredes J.F., Ramos-Ramos M. Reactores discontinuos secuenciales: Una tecnología versátil en el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 2014. Vol. 24(1). P. 49–66.
14. Eriksson E., Christensen N., Schmidt J.E., Ledin A. Potential priority pollutants in sewage sludge. *Desalination*. 2008. Vol. 226. P. 371–388.
15. Fraç M., Oszust K., Lipiec J., Jezierska-Tys S., Nwaichi E.O. Soil microbial functional and fungal diversity as influenced by municipal sewage sludge accumulation. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2014. Vol. 11. P. 8891–8908.
16. Fijalkowski K., Rorat A., Grobelak A., Kacprzak M.J. The presence of contaminations in sewage sludge – the current situation. *J. Environ. Manag.* 2017. Vol. 203. P. 1126–1136.
17. Huang K., Mao Y., Zhao F., Zhang X.-X., Ju F., Ye L., Wang Y., Li B., Ren H., Zhang T. Free-living bacteria and potential bacterial pathogens in sewage treatment plants. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2018. Vol. 102. P. 2455–2464.
18. Бойко І. Модернізація біологічної очистки стічних вод на Чорноморськводоканалі. *Водопостачання. Водовідведення*. 2020. № 4. С. 56–57.
19. Кулаківський С. В., Хоружий П. Д. Удосконалення технології очищення господарсько-побутових стічних вод у локальних системах сільськогосподарської каналізації. *Меліорація і водне господарство*. 2014. Вип. 101. С. 88–97.
20. Розроблення рекомендацій щодо збереження земель завдяки утилізації вмісту мулових карт. Іванова І. М. та ін. *Технічні науки та технології*. 2015. № 1 С. 191–199. http://nbuv.gov.ua/UJRN/tnt_2015_1_32
21. Andrey Mikhailovich Dregulo, Nikolai Gennadievich Bobylev. Integrated Assessment of Groundwater Pollution from the Landfill of Sewage Sludge. *J. Ecol. Eng.* 2021. Vol. 22(1). P. 68–75. [Electronic resource]. <https://doi.org/10.12911/22998993/128872>
22. Горюх Н. П. Экологическая оценка вредных веществ при комплексной утилизации муниципальных отходов. *Коммунальное хозяйство городов*. 2005. № 63. С. 171–181.
23. Альтернативні технологічні рішення проблеми повної утилізації мулового осаду стічних вод. Бабаєв В. М. та ін. *Комунальне господарство міст*. 2018. Вип. 144. С. 32–42.
24. Карп І.М., П'яних К.Є., Нікітін Є.Є. Проблема утилізації та знешкодження мулових осадів міських стічних вод та шляхи її вирішення (огляд). *Енерготехнології і ресурсосбереження*. 2017. № 2. С. 35–48.
25. Шаманський С.Й. Науково-технологічні засади удосконалення екологічно-безпечних процесів водовідведення : дис. ... д-ра тех. наук : 21.06.01. Київ, 2019. 401 с.
26. Малєєв В.О., Безпальченко В.М., Семенченко О.О. Стічні води м. Херсона як регіональна екологічна проблема. *Євроінтеграція екологічної політики України : мат. наук.-практ. конф.*, Одеса, 2020. С. 153–155.
27. Гетманенко В.А., Скрильник Є.В. Науково-організаційні та нормативно-правові аспекти утилізації осадів комунальних стічних вод (на прикладі Європейського досвіду). *Вісник аграрної науки*. 2017. С. 43–49. https://agrovisnyk.com/pdf/ua_2017_02_08.pdf
28. Suleiman H., Rorat A., Grobelak A., Grosser A., Milczarek M., Płytycz B., Kacprzak M., Vandenbulcke F. Determination of the performance of vermicomposting process applied to sewage sludge by monitoring of the compost quality and immune responses in three earthworm species: *Eisenia fetida*, *Eisenia andrei* and *Dendrobaena veneta*. *Bioresour. Technol.* 2017. Vol. 241. P. 103–112.
29. Malińska K., Golańska M., Caceres R., Rorat A., Weisser P., Ślęzak E. Biochar amendment for integrated composting and vermicomposting of sewage sludge- the effect of biochar on the activity of *Eisenia fetida* and the obtained vermicompost. *Bioresour. Technol.* 2017. Vol. 225. P. 206–214.
30. Kończak M., Oleszczuk P. Application of biochar to sewage sludge reduces toxicity and improve organisms growth in sewage sludge-amended soil in long term field experiment. *Sci. Total Environ.* 2018. Vol. 625. P. 8–15.

31. Frišták V., Soja G. Effect of wood-based biochar and sewage sludge amendments for soil phosphorus availability. *Nova Biotechnologica et Chimica*. 2015. Vol. 14. P. 104.
32. Шаманський С.Й., Бойченко С. В. Інноваційні екологічно безпечні технології у водовідведенні : монографія. Київ : Центр учбової літератури, 2018. 320 с.
33. Айрапетян Т.С. Конспект лекцій з дисциплін «Очистка побутових стічних вод» та «Споруди та обладнання водовідведення». Харків : ХНУМГ, 2014. 121 с.
34. Копилевич А.В., Галімова В.М., Лаврик Р.В. Спецпрактикум. Стічні води, очищення та утилізація і знешкодження осадів. Київ : НУБІП, 2015. С. 136.
35. Sogn T.A., Dragicevic I., Linjordet R., Krogstad T., Eijsink V.G.H., Eich-Greatorex S. Recycling of biogas digestates in plant production: NPK fertilizer value and risk of leaching. *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.* 2018. Vol. 7. P. 49–58.
36. Happy City – How to Plan and Create the Best Livable Area for the People / R. Tomanek : edited by A. Brdulak, H. Brdulak. Springer International Publishing, 2017. 273 p.
37. Жукова В. С. Очищення стічних вод від сполук азоту з використанням іммобілізованих мікроорганізмів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.21 «Технологія водоочищення» / Нац. техн. ун-т України «КПІ». Київ, 2013. 19 с.
38. Досвід роботи КП КГ «Харківкомуночиствод» щодо утилізації осадів стічних вод з використанням технології італійських фірм VOMMTAGEOTECK. Корінько І.В. та ін. *Водопостачання та водовідведення*. 2010. № 5. С. 28–29.
39. Samolada M., Zabaniotou A. Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece. *Waste Manag.* 2014. Vol. 34. P. 411–420.
40. Капранов С.В., Шулика В.М. Почва, отходы и здоровье человека. Луганск : Янтарь, 2010. 488 с.
41. JinZhang, JunweiJin, MinyanWang et al. Co-pyrolysis of sewage sludge and rice husk/ bamboo sawdust for biochar with high aromaticity and low metal mobility. *Environmental Research*. 2020. Vol. 191. P. 118792. [Electronic resource]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935120309312?via%3Dihub>
42. Крупко В.А. Аналіз можливостей утилізації осаду очисних споруд. *Вісник Чернігівського державного технічного університету*. 2012. <https://ts-vistnic.stu.cn.ua/index.pl?task=arcls&id=1315>
43. Garrido-Baserba M., Molinos-Senante M., Abelleira-Pereira J.M., Fdez-Güelfo L.A., Poch M., Hernández-Sancho F. Selecting sewage sludge treatment alternatives in modern wastewater treatment plants using environmental decision support systems. *J. Clean. Prod.* 2015. Vol. 107. P. 410–419.
44. Kasina M., Wendorff-Belon M., Rafał Kowalski P., Michalik M. Characterization of Incineration Residues from Wastewater Treatment Plant in Polish City: a Future Waste Based Source of Valuable Elements? *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2019. Vol. 21(4). P. 885–896. doi: 10.1007/s10163-019-00845-1.
45. Vamvuka D., Alexandrakis S., Galetakis M. Combustion Performance of Sludge From a Wastewater Treatment Plant in Fluidized Bed. Factorial Modeling and Optimization of Emissions. *Front. Energy Res.* 2019. Vol. 7. doi: 10.3389/fenrg.2019.00043
46. Zlatkovskiy O., Shevchenko A., Shevchenko T. Use of Fly Ash for Conditioning Excess Activated Sludge During Dewatering on Chamber Membrane Filter Presses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3/10(99). P. 17–23.
47. Martínez F., Cuevas G., Calvo R. and Walter I. Biowaste effects on soil and native plants in a semiarid ecosystem. *Journal of Environmental Quality*. 2003. Vol. 32. P. 472–479. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.4720>
48. Sort X. and Alcañiz J.M. Effects of sewage sludge amendment on soil aggregation. *Land Degradation and Development*. 1999. Vol. 10(3). P. 3-12. [Electronic resource]. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-145X\(199901/02\)10:13.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-145X(199901/02)10:13.0.CO;2-0)
49. Singh R.P., Agrawal M. Use of sewage sludge as fertiliser supplement for *Abelmoschus esculentus* plants: Physiological, biochemical and growth responses. *International Journal of Environment and Waste Management*. 2009. Vol. 3. № 1/2. P. 91–106.
50. Wu C., Li W., Wang K. and Li Y. Usage of pumice as bulking agent in sewage sludge composting. *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 190. P. 516–521. [Electronic resource]. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.104>

51. Kominko H., Gorazda K. and Wzorek Z. The possibility of organo-mineral fertilizer production from sewage sludge. *Waste and Biomass Valorization*. 2017. Vol. 8(5). P. 1781–1791. [Electronic resource]. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9805-9>
52. Zahra Zerrouqi, Mohammed Reda Tazi, Abdelhafid Chafi, Abdessamad Zerrouqi. Impact of Sewage Sludge Leaching on Soil Constituents and Quality. *Environmental Research, Engineering and Management*. 2020. Vol. 76(4). P. 87–96.
53. Дишлюк В. С. Мікробіологічна характеристика осадів стічних вод міських очисних споруд та оцінка їх екологічної придатності для використання в землеробстві. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2016. Т. 23. С. 10–16. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.23.10-16>
54. Дишлюк В. С., Гаркавий С. І. Екологічно-гігієнічні аспекти застосування осадів стічних вод великих міст і промислових центрів України як нетрадиційних органічних добрив у землеробстві. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2020. Вип. 31. С. 3–15.
55. Colangelo F., Cioffi R., Montagnaro E., Santoro L. Soluble salt removal from MSVI fly ash and its stabilization for safer disposal and recovery as road basement material. *Waste Management*. 2012. № 32 (6). P. 1179–1185. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.12.013
56. Cusido J.A., Cremades L.V. Environmental effects of using clau bricks produced with sewage, Leach ability and toxicity studies. *Waste Management*. 2012. № 32(6). P. 1202–1208.
57. Средство повышения плодородия почв на основе осадка сточных вод. Аргунов Н.Д. и др. *Вестник ФГОУ ВПО МГАУ*. 2012. № 2. С. 83–86.
58. Agnieszka Rorat, Pauline Courtois, Franck Vandenbulcke, Sébastien Lemiere. Sanitary and environmental aspects of sewage sludge management. *Industrial and Municipal Sludge*. 2019. P. 155–180. [Electronic resource]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7149543/#bb0280> <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7149543/#bb0280>. doi: 10.1016/B978-0-12-815907-1.00008-8
59. Rojas-Flores, S., De La Cruz-Noriega M., Cabanillas-Chirinos L. et al. Using Lime (*Citrus × aurantiifolia*), Orange (*Citrus × sinensis*), and Tangerine (*Citrus reticulata*) Waste as a Substrate for Generating Bioelectricity. *Environmental Research, Engineering and Management*. 2020. Vol. 75. № 3. P. 24–34.
60. Lamastra L., Suciú N.A., Trevisan M. Sewage sludge for sustainable agriculture: contaminants' contents and potential use as fertilizer. *Chem. Biol. Technol.* 2018. [Electronic resource]. <https://doi.org/10.1186/s40538-018-0122-3>
61. Jaffar Abdul Khaliq S, Ahmed M, Al-Wardy M, Al-Busaidi A, Choudri BS. Wastewater and sludge management and research in Oman: an overview. *J Air Waste Manag Assoc*. 2017. Vol. 67(3). P. 267–278.
62. Zahra Aghalari, Hans-Uwe Dahms, Mika Sillanpää, Juan Eduardo Sosa-Hernandez, and Roberto Parra-Saldívar. Effectiveness of wastewater treatment systems in removing microbial agents: a systematic review. *Global Health*. 2020. [Electronic resource]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6998187/>
63. Пляцук Л. Д., Черниш Е. Ю. Математичне моделювання процесу знешкодження осаду стічних вод в біосульфідогенних умовах. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2013. № 37. С. 148–160.
64. Bhaskar Bethi, Shirish H. Sonawane, Bhanvase A. Bhanvase, Sarah P. Gumfekar. Nanomaterials Based Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: A Review. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. 2016. Vol. 109. P. 178–189. doi: 10.1016/j.cep.2016.08.016
65. Covinich L.G., Bengoechea D.I., Fenoglio R.J., Area M.C. Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment in the Pulp and Paper Industry: A Review. *American Journal of Environmental Engineering*. 2014. Vol. 4(3). P. 56–70. doi:10.5923/j.ajee.20140403.03
66. Krishnan S., Rawindran H., Sinnathambi C. M., Lim J. W. Comparison of Various Advanced Oxidation Processes Used in Remediation of Industrial Wastewater Laden with Recalcitrant Pollutants. *29th Symposium of Malaysian Chemical Engineers : materials Science and Engineering*, 2017. Vol. 206. [Electronic resource]. https://www.researchgate.net/publication/317798272_Comparison_of_various_advanced_oxidation_processes_used_in_remediation_of_industrial_wastewater_laden_with_recalcitrant_pollutants. doi:10.1088/1757-899X/206/1/012089
67. Grobelak A., Grosser A., Kacprzak M., Kamizela T. Sewage sludge processing and management in small and medium-sized municipal wastewater treatment plant-new technical solution. *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 234. P. 90–96.

68. Puyol D., Batstone D.J., Hülsen T., Astals S., Peces M., Krömer J.O. Resource recovery from wastewater by biological technologies: opportunities, challenges, and prospects. *Front. Microbiol.* 2016. № 7. P. 2106.

69. Шквірко О.М., Тимчук І.С., Мальований М.С. Адаптація світового досвіду утилізації осадів стічних вод до екологічних умов України. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29. № 2. https://www.researchgate.net/publication/332884102_Adaptacia_svitovogo_dosvidu_utilizacii_osadi_v_sticnih_vod_do_ekologicnih_umov_Ukraini

70. Свірідова В.А., Медведєва О.В. Основні проблеми утилізації осадів стічних вод. *Наукові записки*. 2013. Вип. 14. С. 101–105.

References

1. Egina Malaj, Peter C von der Ohe, Matthias Grote, Ralph Kühne, Cédric P Mondy, Philippe Usseglio-Polatera, Werner Brack, & Ralf B Schäfer. (2014). Organic chemicals jeopardize the health of freshwater ecosystems on the continental scale. *PNAS*, 111(26), 9549–9554.

2. Carlo, Fezzi, Amii R. Harwood, Andrew A. Lovett, & Ian J. Bateman. (2015). The environmental impact of climate change adaptation on land use and water quality. *Nature Climate Change*. Retrieved from <https://www.sciencedaily.com/releases/2015/03/150320091319.htm>

3. Pichura, V.I., Shakhman, I.O., & Bistriantseva, A. M. (2018). Prostorovo-chasova zakonomirnist formuvania iakosti vody v pichtsi Dnipro [Spatial-temporal regularity of water quality formation in the Dnieper river]. *Bioresursy ta prirodokorystuvania [Bioresources and nature management]*, 1–2, 44–57. [in Ukrainian]

4. Bardov, V.G., Fedorenko, V.I., Biletskaia, E.M., Vitrizhchak, S.V., Vlasyk, L.I., & Garkavyi, S.V. et al. (2013). *Osnovy ekologii [Principles of Ecology]*. Vinnytsia : New Book, 424. [in Ukrainian]

5. Zorina, O. V. (2018). Naukove obgruntuvanie mozhливosti vykoristania Dniprovs'kogo vodoshovishcha v iakosti dgerela pytnogo vodopostachania PAT «Zaporozhstal» u suchasnykh umovakh [Scientific substantiation of the possibility of using the Dnieper reservoir as a source of drinking water supply of PJSC “Zaporizhstal” in modern conditions]. *Bioresursy ta prirodokorystuvania [Bioresources and nature management]*, 10, 1–2, 64–72. [in Ukrainian]

6. Shih-Wei Huang, Bing-Mu Hsu, Yen-Jui Su, Dar-Der Ji, Wei-Chen Lin, Jyh-Larng Chen et al. (2012). Occurrence of diarrheagenic *Escherichia coli* genes in raw water of water treatment plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 19, 2776–2783.

7. Liu, J.L., Li X.Y., Xie Y.F., & Tang H. (2014). Characterization of soluble microbial products as precursors of disinfection byproducts in drinking water supply. *Science of The Total Environment*, 472, 818–824.

8. El-Shehawy, R., Gorokhova E., Fernández-Pizas F., F. F. del Campo. (2012). Global warming and hepatotoxin production by cyanobacteria: What can we learn from experiments? *Water Research*, 46 (5), 1420–1429.

9. Mosiychuk, Ia.B., Khoruzhchii P.D., & Nedashkovskiy I. P. (2020). Udoshkonalenia tekhnologiy zamknutogo vodopostachania na pidpryemstvakh agropromyslovogo kompleksu [Improvement of technologies of closed water supply at the enterprises of agro-industrial complex]. *Melioratsia I vodne gospodarstvo [Land reclamation and water management]*, 2020, 2, 146–153. [in Ukrainian]

10. Cristina Elena, & Roca Daniela. (2012). Theoretical aspects of advanced methods of wastewater treatment in order to eliminate pollutants from surface waters. *Agronomy Series of Scientific Research*, 55(2), 33–37.

11. Qu X, Zhao Y, Yu R, Li Y, Falzone C, Smith G, & Ikehata K. (2016). Health effects associated with wastewater treatment, reuse, and disposal. *Water Environ Res*, 88(10), 1823–1855.

12. Choudri, B.S., Charabi, Y, & Ahmed, M. (2018). Health effects associated with wastewater treatment. *Water Environ Res*, 90(10), 1759–1776.

13. Muñoz-Paredes, J.F., & Ramos-Ramos, M. (2014). Reactores discontinuos secuenciales: Una tecnología versátil en el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 24(1), 49–66.

14. Eriksson, E., Christensen, N., Schmidt, J.E., & Ledin, A. (2008). Potential priority pollutants in sewage sludge. *Desalination*, 226, 371–388.

15. Fraç, M., Oszust, K., Lipiec, J., Jezierska-Tys, S., & Nwaichi, E.O. (2014). Soil microbial functional and fungal diversity as influenced by municipal sewage sludge accumulation. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 11, 8891–8908.

16. Fijalkowski, K., Rorat, A., Grobelak, A., & Kacprzak, M. J. (2017). The presence of contaminations in sewage sludge – the current situation. *J. Environ. Manag.*, 203, 1126–1136.
17. Huang, K., Mao, Y., Zhao, F., Zhang, X.-X., Ju, F., Ye, L., Wang, Y., Li, B., Ren, H., & Zhang, T. (2018). Free-living bacteria and potential bacterial pathogens in sewage treatment plants. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 102, 2455–2464.
18. Boyko, I. (2020). Modernizatsiabiologichnoyochistkistichnykh vodnaChornomorskvodokanali [Modernization of biological wastewater treatment at Chornomorskvodokanal]. *Vodopostachannia. Vodovidvedennia [Water supply. Drainage]*, 4, 56–57. [in Ukrainian]
19. Kulakivskiy, S.V., & Khoruzhchii, P.D. (2014). Udoskanaltnia tekhnologiy ochishchenia gospodarsko-pobutovykh stichnykh vod u lokalnykh systmakh silskogospodarskoy kanalizatsii [Improving the technology of domestic wastewater treatment in local agricultural sewerage systems]. *Melioratsia I vodne gospodarstvo [Land reclamation and water management]*, 2014, 101, 88–97.
20. Ivanova, I.M., Koteychuk, A.L., Semaka, O.M., & Krupko, V.A. (2015). Rozroblenia rekomen-datsiy zhchodo zberezhennia zemel zavdiaki utilizatsii vmistu mulovykh kart [Development of recom-mendations for land conservation through disposal of silt maps]. *Tekhnichni nauki ta tekhnologii [Technical sciences and technologies]*, 1, 191–199. Retrieved from http://nbuv.gota.tekhnologii.v.ua/UJRN/tnt_2015_1_32. [in Ukrainian]
21. Andrey Mikhailovich Dregulo, & Nikolai Gennadievich Bobylev. (2021). Integrated Assessment of Groundwater Pollution from the Landfill of Sewage Sludge. *J. Ecol. Eng.*, 22(1), 68–75. Retrieved from: <https://doi.org/10.12911/22998993/128872>
22. Gorokh, N.P. (2005). Ekologicheskai otsenka vrednykh vezhestv pri kompleksnoy utilizatsii munitsipalnykh otkhodov [Ecological assessment of harmful substances in the complex utilization of municipal waste]. *Komunalnoe khoziaystvye gorodov [Municipal utilities]*, 63, 171–181. [in Russian]
23. Babaev, V.M., Panov, V.V., Khaylo, Ia.M., Volkov, V.M., Gorokh, M.P. (2018). Alternativni tekhnologichni rishennia problem povnoi utylizatsii mulovogo osady stichnykh vod [Alternative tech-nological solutions to the problem of complete utilization of sludge sludge]. *Komunalne gospodarstvo mist [Municipal utilities]*, 144, 32–42. [in Ukrainian]
24. Karp, I.M., Pianykh, K.E., & Nikitin, E. E. (2017). Problema utilizatsii ta zneshkodzhenia mulovykh osadiv miskikh stichnykh vod ta shliahi ii vyrishennia (oglyad) [The problem of utilization and disposal of sludge in urban wastewater and ways to solve it (review)]. *Energotekhnologii i resur-soberezhennia [Energy technologies and resource saving]*, 2, 35–48. [in Ukrainian]
25. Shamanskiy, S.I. (2019). Naukovo-tekhnologichni zasady udoskonalennia ekologichno bezpechnykh protsesiv vodovidvedennia [Scientific and technological principles of improving environ-mentally friendly drainage processes]: dissertation doctor of technical sciences 21. 06. 01 «ecological safety». National Aviation University. Kyiv, 401. Retrieved from <https://nau.edu.ua/site/variables/news/2019/5/dissertation%20Shamanskii.pdf>. [in Ukrainian]
26. Maleev, V.O., Bezpachenko, V. M., & Semenchenko, O.O. (2020). Stichni vody m. Khersona iak regionalna ekologichna problema [Sewage of Kherson as a regional ecological problem]. *European integration of environmental policy of Ukraine : mat. scientific-practical conf.*, Odessa, 2020, 153–155. [in Ukrainian].
27. Getmanenko, V.A., & Skrylnik, E.V. (2017). [Scientific-organizational and normative-legal aspects of municipal sewage sludge utilization (on the example of European experience)]. *Visnyk agrarnoy nauky [Visnyk agrarnoi nauki]*, 43–49. Retrieved from https://agrovisnyk.com/pdf/ua_2017_02_08.pdf
28. Suleiman, H., Rorat, A., Grobelak, A., Grosser, A., Milczarek, M., Plytycz, B., Kacprzak, M., & Vandenbulcke, F. (2017). Determination of the performance of vermicomposting process applied to sewage sludge by monitoring of the compost quality and immune responses in three earthworm species: *Eisenia fetida*, *Eisenia andrei* and *Dendrobaena veneta*. *Bioresour. Technol.*, 241, 103–112.
29. Malińska, K., Golańska, M., Caceres, R., Rorat, A., Weisser, P., & Ślęzak, E. (2017). Biochar amendment for integrated composting and vermicomposting of sewage sludge- the effect of biochar on the activity of *Eisenia fetida* and the obtained vermicompost. *Bioresour. Technol.*, 225, 206–214.
30. Kończak, M., & Oleszczuk, P. (2018). Application of biochar to sewage sludge reduces toxicity and improve organisms growth in sewage sludge-amended soil in long term field experiment. *Sci. Total Environ.*, 625, 8–15.
31. Frišták, V., & Soja, G. (2015). Effect of wood-based biochar and sewage sludge amendments for soil phosphorus availability. *Nova Biotechnologica et Chimica*, 14, 104.

32. Shamanskiy, S.I., & Boychenko, S.V. (2018). Inovatsiyni ekologichno bezpechni tekhnologii u vodovidvedenni [Innovative environmentally friendly technologies in drainage] : monograph. Kyiv : Center for Educational Literature, 320 [in Ukrainian]
33. Aypetian, T.S. (2014). Konspekt leksiy z disnsiplin “Ochistka pobutovykh stichnykh vod” ta “Sporudy ta obsldnania vodovidvedenia” [Synopsis of lectures on the disciplines “Domestic wastewater treatment” and “Sewerage facilities and equipment”]. Kharkiv : KHNUMG, 2014, 121. [in Ukrainian]
34. Kopilevich, A.V., Galimova, V.M., & Lavrik, R.V. (2015). Spetspraktikum. Stichni vody, ochizhshenia ta utylizatsia I zneshkodzhenia osadiv [Special workshop. Wastewater, treatment and disposal and disposal of sludge]. Kiyv : NUBPK, 136. [in Ukrainian]
35. Sogn, T. A., Dragicevic, I., Linjordet, R., Krogstad, T., Eijsink, V. G. H., & Eich-Greatorex, S. (2018). Recycling of biogas digestates in plant production: NPK fertilizer value and risk of leaching. *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.*, 7, 49–58.
36. Happy City – How to Plan and Create the Best Livable Area for the People / R. Tomanek : edited by A. Brdulak, H. Brdulak. Springer International Publishing, 2017. 273 p.
37. Zhukova, V.S. (2013). Ochizhchenia stichnykh vod vid spoluk azotu z vykoristaniem imobilizovanykh mikroorganizmiv [Wastewater treatment from nitrogen compounds using immobilized microorganisms]. Abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: 05.17.21 «Technology of water purification». Nat. tech. University of Ukraine «KPI». Kiyv, 19. [in Ukrainian]
38. Korinko, I.V., Piligram, S.S., Lessik, M.D., & Smirnova, G.M. (2010). Dosvid roboty KP KG «Kharkivkomunochistvod» zhodo utylizatsii osadiv stichnykh vod z vykoristanniam tekhnologii italiysky firm VOMMTAGEOTECK [Experience of KP KG «Kharkivkomunochistvod» on the disposal of sewage sludge using the technology of Italian companies VOMMTAGEOTECK]. *Vodopostachania ta vodovidvedenia [Water supply and sewerage]*, 5, 28–29. [in Ukrainian]
39. Samolada, M., & Zabaniotou, A. (2014). Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece. *Waste Manag.*, 34, 411–420.
40. Kapranov, S. V., & Shupika, V. M. (2010). Pochva, otkhody I zdorovyе cheloveka [Soil, waste and human health]. Lugansk: Amber, 488. [in Russian]
41. JinZhang, JunweiJin, MinyanWang, Ravi Naidu, Yanju Liu, Yu Bon Man, Xinqiang Liang, Ming Hung Wong, Peter Christine, Yan Zhang, Chengfang Song, & Shengdao Shan. (2020). Co-pyrolysis of sewage sludge and rice husk/ bamboo sawdust for biochar with high aromaticity and low metal mobility. *Environmental Research.*, 2020, 191, 118792. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935120309312?via%3Dihub>
42. Krupko, V.A. (2012). Analiz mozhlyvostey utilizatsii osadu ochisnykh sporud [Analysis of sewage sludge utilization possibilities]. *Visnyk Chernigivskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu [Visnyk of Chernihiv State Technical University]*. Retrieved from <https://ts-vistnic.stu.cn.ua/index.pl?task=arcls&id=1315>. [in Ukrainian]
43. Garrido-Baserba, M., Molinos-Senante, M., Abelleira-Pereira, J.M., Fdez-Güelfo, L.A., Poch, M., & Hernández-Sancho, F. (2015). Selecting sewage sludge treatment alternatives in modern wastewater treatment plants using environmental decision support systems. *J. Clean. Prod.*, 107, 410–419.
44. Kasina, M., Wendorff-Belon, M., Rafał Kowalski, P., & Michalik, M. (2019). Characterization of Incineration Residues from Wastewater Treatment Plant in Polish City: a Future Waste Based Source of Valuable Elements? *Journal of Material Cycles and Waste Management.*, 21(4), 885–896. doi: 10.1007/s10163-019-00845-1
45. Vamvuka, D., Alexandrakis, S., & Galetakis, M. (2019). Combustion Performance of Sludge From a Wastewater Treatment Plant in Fluidized Bed. Factorial Modeling and Optimization of Emissions. *Front. Energy Res.*, 7. doi: 10.3389/fenrg.2019.00043
46. Zlatkovskiy, O., Shevchenko, A., & Shevchenko, T. (2019). Use of Fly Ash for Conditioning Excess Activated Sludge During Dewatering on Chamber Membrane Filter Presses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/10(99), 17–23.
47. Martínez, F., Cuevas, G., Calvo, R., & Walter, I. (2003). Biowaste effects on soil and native plants in a semiarid ecosystem. *Journal of Environmental Quality*, 32, 472–479. Retrieved from <https://doi.org/10.2134/jeq2003.4720>
48. Sort, X., & Alcañiz, J. M. (1999). Effects of sewage sludge amendment on soil aggregation. *Land Degradation and Development*, 10(3), 3–12. Retrieved from [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-145X\(199901/02\)10:13.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-145X(199901/02)10:13.0.CO;2-0)

49. Singh, R.P., & Agrawal, M. (2009). Use of sewage sludge as fertiliser supplement for *Abelmoschus esculentus* plants: Physiological, biochemical and growth responses. *International Journal of Environment and Waste Management*, 3, 1/2, 91–106.
50. Wu, C., Li, W., Wang, K. & Li, Y. (2015). Usage of pumice as bulking agent in sewage sludge composting. *Bioresource Technology*, 190, 516–521. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.104>
51. Kominko, H., Gorazda, K. & Wzorek, Z. (2017). The possibility of organo-mineral fertilizer production from sewage sludge. *Waste and Biomass Valorization*, 8(5), 1781–1791. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9805-9>
52. Zahra Zerrouqi, Mohammed Reda Tazi, Abdelhafid Chafi, & Abdessamad Zerrouqi. (2020). Impact of Sewage Sludge Leaching on Soil Constituents and Quality. *Environmental Research, Engineering and Management*, 76(4), 87–96.
53. Dyshpliuk, V.E. (2016). Mikrobiologichna kharakteristika osadiv stichnykh vod miskykh ochisnykh sporud ta otsinka ikh ekologichnoi prudatnosti dlia vykorystania v zemlerobstvi [Microbiological characteristics of sewage sludge from urban treatment plants and assessment of their environmental suitability for use in agriculture]. *Silskogospodarska mikrobiologia [Agricultural microbiology]*, 23, 10–16. Retrieved from: <https://doi.org/10.35868/1997-3004.23.10-16>. [in Ukrainian]
54. Dyshpliuk, V.E., & Garkavyi, S.I. (2020). Ekologo-gigienichni aspekty zastosuvania osadiv stichnykh vod velykykh mist I promuslovykh tsestriv Ukrainy iak netradytsiynykh organichnykh dobryv u zemlerobstvi [Ecological and hygienic aspects of sewage sludge use in large cities and industrial centers of Ukraine as non-traditional organic fertilizers in agriculture]. *Silskogospodarska mikrobiologia [Agricultural Microbiology]*, 31, 3–15. [in Ukrainian]
55. Colangelo, F., Cioffi, R., Montagnaro, E., & Santoro, L. (2012). Soluble salt removal from MSWI fly ash and its stabilization for safer disposal and recovery as road basement material. *Waste Management*, 32 (6), 1179–1185. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.12.013
56. Cusido, J. A., & Cremades, L. V. (2012). Environmental effects of using clay bricks produced with sewage, Leach ability and toxicity studies. *Waste Management*, 32 (6), 1202–1208.
57. Argunov, N.D., Abramov, I.A.K., Salomatina, N.A., Vesiolov, V.M., Zalevskiy V.M., & Miorzlaia G.E. (2012). Sredstvo povysheniya plodorodiya pochv na osnove osadka stochnykh vod [Means of increasing soil fertility based on sewage sludge]. *Vestnik FGOU VPO MGAU [Vestnik FGOU VPO MGAU]*, 2, 83–86. [in Russian]
58. Rojas-Flores, S., De La Cruz-Noriega M., Cabanillas-Chirinos L., et al. (2020). Using Lime (*Citrus × aurantiifolia*), Orange (*Citrus × sinensis*), and Tangerine (*Citrus reticulata*) Waste as a Substrate for Generating Bioelectricity. *Environmental Research, Engineering and Management*, 75, 3, 24–34.
59. Agnieszka Rorat, Pauline Courtois, Franck Vandenbulcke, & Sébastien Lemiere. (2019). Sanitary and environmental aspects of sewage sludge management. *Industrial and Municipal Sludge*, 155–180.
60. Lamastra, L., Suciù, N. A., & Trevisan, M. (2018). Sewage sludge for sustainable agriculture: contaminants' contents and potential use as fertilizer. *Chem. Biol. Technol.* Retrieved from <https://doi.org/10.1186/s40538-018-0122-3>
61. Jaffar Abdul Khaliq S, Ahmed, M., Al-Wardy, M., Al-Busaidi, A., & Choudri, B. S. (2017). Wastewater and sludge management and research in Oman: an overview. *J Air Waste Manag. Assoc.*, 67(3), 267–278.
62. Zahra Aghalari, Hans-Uwe Dahms, Mika Sillanpää, Juan Eduardo Sosa-Hernandez, & Roberto Parra-Saldívar. (2020). Effectiveness of wastewater treatment systems in removing microbial agents: a systematic review. *Global Health*, 16, 13. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6998187/>
63. Pliatsuk L.D., & Chernysh E.Iu. (2013). Matematichne modeliuvania protsesu zneshkodzhchenia osadu stichnykh vod v bioculfidogennykh umovakh [Mathematical modeling of the process of sewage sludge disposal in biosulfidogenic conditions]. *Visnyk NTU “KHPi” [Bulletin of NTU “KhPI”]*, 37, 148–160. [in Ukrainian]
64. Bhaskar Bethi, Shirish H. Sonawane, Bhanvase A. Bhanvase, Sarahg P. Gumfekar. (2016). NanomaterialsBasedAdvanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Retrieved from. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 109, 178–189. doi: 10.1016/j.cep.2016.08.016
65. Covinich, L.G., Bengoechea, D.I., Fenoglio, R.J., & Area, M.C. (2014). Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment in the Pulp and Paper Industry: A Review. *American Journal of Environmental Engineering*, 4(3), 56–70. doi:10.5923/j.ajee.20140403.03

66. Krishnan, S., Rawindran, H., Sinnathambi, C.M., & Lim, J.W. (2017). Comparison of Various Advanced Oxidation Processes Used in Remediation of Industrial Wastewater Laden with Recalcitrant Pollutants. *29th Symposium of Malaysian Chemical Engineers : Materials Science and Engineering*, 206. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/317798272_Comparison_of_various_advanced_oxidation_processes_used_in_remediation_of_industrial_wastewater_laden_with_recalcitrant_pollutants. doi:10.1088/1757-899X/206/1/012089

67. Anna Grobelak, Anna Grosser, Małgorzata Kacprzak, & Tomasz Kamizela. (2019). Sewage sludge processing and management in small and medium-sized municipal wastewater treatment plant-new technical solution. *Journal of Environmental Management*, 90–96.

68. Puyol D., Batstone D.J., Hülsen T., Astals S., Peces M., & Krömer J.O. (2016). Resource recovery from wastewater by biological technologies: opportunities, challenges, and prospects. *Front. Microbiol.*, 7, 2106.

69. Shidko O.M., Tymchuk I.S., & Maliovanyi M. S. (2019). [Adaptation of the world experience of sewage sludge utilization to ecological conditions of Ukraine]. *Naukoviy vidnyk NLTU Ukraini [Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine]*, 29, 2. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/332884102_Adaptacia_svitovogo_dosvidu_utilizacii_osadi_v_sticnih_vod_do_ekologicnih_umov_Ukraini. [in Ukrainian]

70. Sviridova V.A., & Medvedeva O.V. (2013). Osnovni problem utilizatsii osadiv stichnykh vod [The main problems of sewage sludge disposal]. *Naukovi zapisky [Scientific notes]*, 14, 101–105. [in Ukrainian]

О.В. Зорина, Е.А. Маврикин

Современные подходы к обработке и утилизации вторичных осадков хозяйственно-бытовых сточных вод

Аннотация. На сегодняшний день загрязнение окружающей среды, в частности поверхностных вод, привело к экологическому кризису во многих странах мира. Одной из причин этого является использование устаревших подходов к обработке и утилизации осадков сточных вод. В работе проведено изучение литературных источников с целью анализа предложений по обращению с вторичными осадками хозяйственно-бытовых сточных вод в разных странах. Для обезвреживания осадка сточных вод учеными рассматривается возможность получения удобрения в условиях биосульфидогенеза во время диссимиляционного восстановления малорастворимых сульфатов или использование технологии усиленного окисления. Предложена также новая концепция очистки хозяйственно-бытовых сточных вод в целом, что решает вопросы управления илом сточной воды на месте, где он образуется. Основными направлениями устойчивого управления осадками является их использование в сельском хозяйстве в качестве удобрения и для рекультивации опустошенных или деградированных земель, а также рекуперация энергии сжиганием и альтернативными термическими методами, такими как пиролиз, квазипиролиз и газификация. Установлено, что целесообразность применения той или иной технологии утилизации осадков хозяйственно-бытовых сточных вод зависит от многих факторов, в частности: производительности канализационной станции; состава и методов обработки сточных вод и их осадков; эффективности работы очистных сооружений; климатического пояса места расположения канализационной системы; доступности энергоносителей и материальных ресурсов и т.п. Сегодня является актуальным мониторинг качественного состава осадков сточных вод, а также почв и природных вод относительно загрязняющих веществ, которые могут выявляться в сточных водах соответствующего населенного пункта, с целью принятия оперативных решений для управления экологическими рисками, а также проведение научных исследований по совершенствованию технологий переработки и утилизации осадков сточных вод различного состава в системах сельского хозяйства, что будет способствовать защите окружающей среды от загрязнений и рациональному использованию земель.

Ключевые слова: канализационные очистные сооружения, осадки сточных вод, активный ил.

O. V. Zorina, Y. O. Mavrykin

Modern approaches to treatment and recovery of secondary sludge of domestic sewage

Abstract. For today, pollution of the environment, in particular of surface waters, has led to an environmental crisis in many countries of the world. One of the reasons for this is the use of outdated approaches to the treatment and recovery of sewage sludge. The article presents the results of the study of literary sources in order to analyze the proposals for the treatment of secondary sludge of domestic sewage in different countries. To neutralize sewage sludge, scientists consider the possibility of obtaining fertilizers under conditions of biosulfidogenesis during the dissimilation recovery of poorly soluble sulfates or the use of enhanced oxidation technology.

A new concept of domestic sewage treatment has also been proposed, which can solve the issue of sewage sludge control at the place of its forming. The main areas of sustainable sludge control are its use in agriculture as fertilizer and for the reclamation of devastated or degraded lands, as well as energy recovery by burning and alternative thermal methods such as pyrolysis, quasi-pyrolysis and gasification. It was established that the applicability of this or that technology of sewage sludge recovery depends on many local factors, in particular: productivity of sewage station; composition and methods of sewage treatment and its sediments; efficiency of sewage treatment plants; climatic zone of the sewage system location; availability of energy and material resources, etc.

Today, it is relevant to monitor the qualitative composition of sewage sludge, as well as soils and natural waters regarding pollutants that can be detected in the sewage of the corresponding settlement, in order to make operational decisions to control environmental risks, as well as conduct scientific research to improve recycling and recovery technologies for sewage sludge of various composition in agricultural systems, which will help to protect the environment against pollution and rational use of land.

Key words: *sewage treatment facilities, sewage sludge, activated sludge*

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-290>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/290>

УДК 622.35/.36;626.81

ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ВИРІВСЬКОГО ГРАНІТНОГО КАР'ЄРУ НА СТАН ПОВЕРХНЕВИХ І ҐРУНТОВИХ ВОД У МЕЖАХ СЕЛА ВИРИ

С.А. Шевчук¹, канд. техн. наук, О.В. Зоріна², докт. біол. наук,
А.М. Шевченко³, канд. с-г. наук., О.М. Козицький⁴, гол. фахівець, Є.О. Маврикін⁵, аспірант

¹ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0001-5844-4980>; e-mail: sergey_shevchuk_@ukr.net;

² ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М.Марзєєва НАМНУ», Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-1557-8521>; e-mail: wateramnu@ukr.net;

³ Інститут водних проблем і меліорації НААНУ, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-2637-6538>; e-mail: monitoring_protect@ukr.net;

⁴ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-4459-6331>; e-mail: olegkoz@ukr.net;

⁵ Інститут водних проблем і меліорації НААНУ, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-6193-8890>; e-mail: evgeniy_mavrikin@ukr.net

Анотація. Проаналізовано результати власних досліджень з оцінювання впливу Вирівського гранітного кар'єру на стан поверхневих і ґрунтових вод у межах села Вири Сарненського району Рівненської області України. Методи проведення досліджень: гідрогеологічні, санітарно-хімічні, аналітичні. Встановлено, що технологічний процес видобутку граніту і виробітку будівельного щебеню не потребує використання великої кількості води. В якості технічної води використовується оборотна кар'єрна вода без додаткового забору поверхневих або підземних вод. Основні проблеми при експлуатації кар'єру, що вирішуються на підприємстві, пов'язані з водою. Вони обумовлені припливом ґрунтових і поверхневих вод та необхідністю їх відведення для забезпечення нормальних умов експлуатації кар'єру. Значне обводнення поверхні району зумовлене великою кількістю атмосферних опадів, відносно рівним рельєфом, наявністю малої товщі осадових порід, що покривають кристалічні масиви. Отже, хімічного і біологічного забруднення р. Вирівка кар'єрними водами не відбувається, оскільки згідно з даними проведених лабораторних досліджень відібрана для аналізу кар'єрна вода не містить хімічних забруднень. Загалом Вирівський гранітний кар'єр не впливає на об'єм стоку р. Вирівка, за тривалий час експлуатації Вирівського гранітного кар'єру рівні ґрунтових вод водоносного горизонту уже встановилися і зараз залишаються відносно стабільними. Подальша розробка кар'єрного масиву не впливатиме на пониження рівнів ґрунтових вод у межах с. Вири. Зниження рівнів води у криницях та колодязях у межах с. Вири в останні роки (2015-2020 рр.) пов'язано з кліматичними змінами, що призвели до зменшення кількості опадів, підвищення температури і випаровування та, як наслідок, дуже низької водності річок практично по всій території України.

Ключові слова: кар'єрний масив, якість води, об'єм стоку, кліматичні зміни

Актуальність. Видобуток каменю продовжує відігравати головну роль у процесі виробництва будівельних матеріалів. Кар'єри здебільшого використовуються для видобутку будівельних матеріалів, таких як розмірний камінь, декоративне каміння, будівельна та промислова сировина. Кар'єр – це вид відкритих розробок, з яких видобувається гірська порода або мінерали, що є руйнівними підприємствами [1] та негативно впливають на екологічну рівновагу території і передбачають повне знищення середовища проживання [2, 3]. У більшості африканських та інших країн при застосуванні кар'єрів не використовують заходи для захисту навко-

лишнього середовища [4, 5]. У розвинутих країнах Світу для вирішення проблеми відновлення та попередження забруднення довкілля через діяльність гірничодобувних підприємств використовують комплексні ресурсо- та енергозберігаючі технології відновлення техногенно-порушених територій [6, 7].

В Україні родовище «Вирівське 2» – одне з великих родовищ граніту в Рівненській області, що забезпечує щебеневу продукцією підприємства північно-західного регіону країни. Побоювання викликає ймовірна можливість забруднення зворотними (стічними) та скидними кар'єрними водами річки Вирка та погіршення її екологічного стану в посушливі

© Шевчук С.А., Зоріна О.В., Шевченко А.М.,
Козицький О.М., Маврикін Є.О., 2021

роки. На сьогодні актуальним є проведення наукових досліджень щодо впливу Вирівського гранітного кар'єру на стан поверхневих і ґрунтових вод у межах села Вири.

Аналіз останніх досліджень. За результатами проведених досліджень видобуток кар'єрів спричиняє серйозну деградацію навколишнього середовища та соціально-економічні конфлікти на досліджуваній території. Основні екологічні та соціально-економічні проблеми, пов'язані з цією діяльністю, виявлені під час цього дослідження зони включають: зміну ландшафту, вирубку пагорбів, що впливає на місцеве біорізноманіття, утворення непродуктивних пусток, забруднення пилом, шумове забруднення, незаконний видобуток каменю, аварії та в деяких районах зниження рівня підземних вод [8–11].

Кар'єри можуть порушувати існуючий рух поверхневих і підземних вод та негативно впливати на їх склад. Потік кар'єрних вод може змінювати напрямок руху природних вод або їх рівень. Наприклад, підземні води, які раніше скидалися з Big Spring (США), тепер піднімаються в кар'єрі, а потім течуть по суші, приєднуючись до Camp Creek за 100 метрів нижче за течією від Big Spring. Близько 90% підземних вод Big Spring наразі проходить через кар'єр [12].

Загалом 87 % досліджуваних кар'єрів у Світі становлять серйозну небезпеку для якості підземних вод. 272 кар'єри мають високий вплив, 657 кар'єрів мають помірний вплив, а 349 кар'єрів мають низький вплив на природні екосистеми [13]. Індійськими науков-

цями проводилися дослідження щодо впливу кар'єрів округу Бангалор на якість підземних вод [14]. Досліджувалися такі показники складу підземної води: рН, температура, каламутність, загальна кількість розчинених твердих речовин, загальна жорсткість, кальцій, магній, лужність, хлориди, фториди, сульфати, фосфати та нітрати. Виявлено, що якість підземних вод у районі дослідження за визначеними показниками задовільна для питних цілей. Інші науковці [15] досліджували якість підземних вод в селах поблизу або в межах кам'яних кар'єрів порівняно з селами, віддаленими приблизно на 1–1,5 км від цих кар'єрів, та встановили прямий і непрямий внесок кар'єрів пісковика та вапняку у збільшення вмісту солей та фтору у підземних водах. Проведені наукові дослідження підтверджують наявність впливу кар'єрів на екологічний стан довкілля.

Метою роботи є визначення впливу розробки гранітного родовища «Вирівське 2» на водно-екологічну ситуацію в межах села Вири та прилеглих територій.

Матеріали та методи. Проаналізовано результати особистих досліджень з оцінювання впливу Вирівського гранітного кар'єру на стан поверхневих і ґрунтових вод у межах села Вири Сарненського району Рівненської області. Гірничі роботи проводяться на земельній ділянці з кадастровим номером 5625480900:07:002:0015 площею 26,6982 га та державним типом власності (рис. 1), цільовим призначенням для розміщення та експлуатації основних, підсобних і допоміжних будівель та споруд підприємствами,



Рис. 1. Межі кадастрової ділянки 5625480900:07:002:0015 (позначені жовтою лінією, отримані з Публічної кадастрової карти України)

що пов'язані з користуванням надрами для розробки родовища кар'єру, будівництва та обслуговування каменещебеневого цеху і під'їзної залізничної колії.

Площа родовища в межах підрахунку запасів 18 га, потужність корисної копалини – 40 м. Гірничі роботи в кар'єрі ведуться у відповідності до проекту розробки за такою технологічною схемою:

– зняття та вивезення пухкого та скельного розкривів у відвал;

– проведення буровибухових робіт;

– видобуток корисних копалин.

Розробляється родовище відкритим способом, що спричиняє зміну ландшафтних умов території проведення гірничих робіт (вирубка лісів, порушення шару ґрунту, ґрунтоутворюючих порід, формування техногенних форм рельєфу тощо). На об'єкті прийнята транспортна система розробки з переміщенням розкривних порід на зовнішні і частково на внутрішні відвали. Кар'єр розкритий зовнішньою капітальною і розрізною траншеями. Просування фронту розкривних і видобувних порід паралельне. Породи розкриву розробляються одноковшовим екскаватором з обладнанням «пряма лопата» з відвантаженням їх в автосамоскиди без попереднього руйнування вибухом. Скельні породи (корисні копалини та скельний розкрив) розробляються тим же екскаватором із попереднім руйнуванням вибухами свердловинним і дрібношпуровим способами. Розробка відірваного блоку буде проводитись екскаваторними заходками.

Поруч із Вирівським гранітним кар'єром розташовано с. Вири. На його території нараховується 435 дворів, а населення становить 2066 осіб. Село забудоване в основному одноповерховими одноквартирними житловими будинками з присадибними ділянками та городами. Загалом район родовища знаходиться в межах північно-західної частини Українського кристалічного масиву, у верхній частині басейну малої р. Вирівка, правої притоки р. Случ.

Методи проведення досліджень: гідрологічні, санітарно-хімічні, аналітичні. Аналізування відібраних проб води проводили за загальноприйнятими методиками.

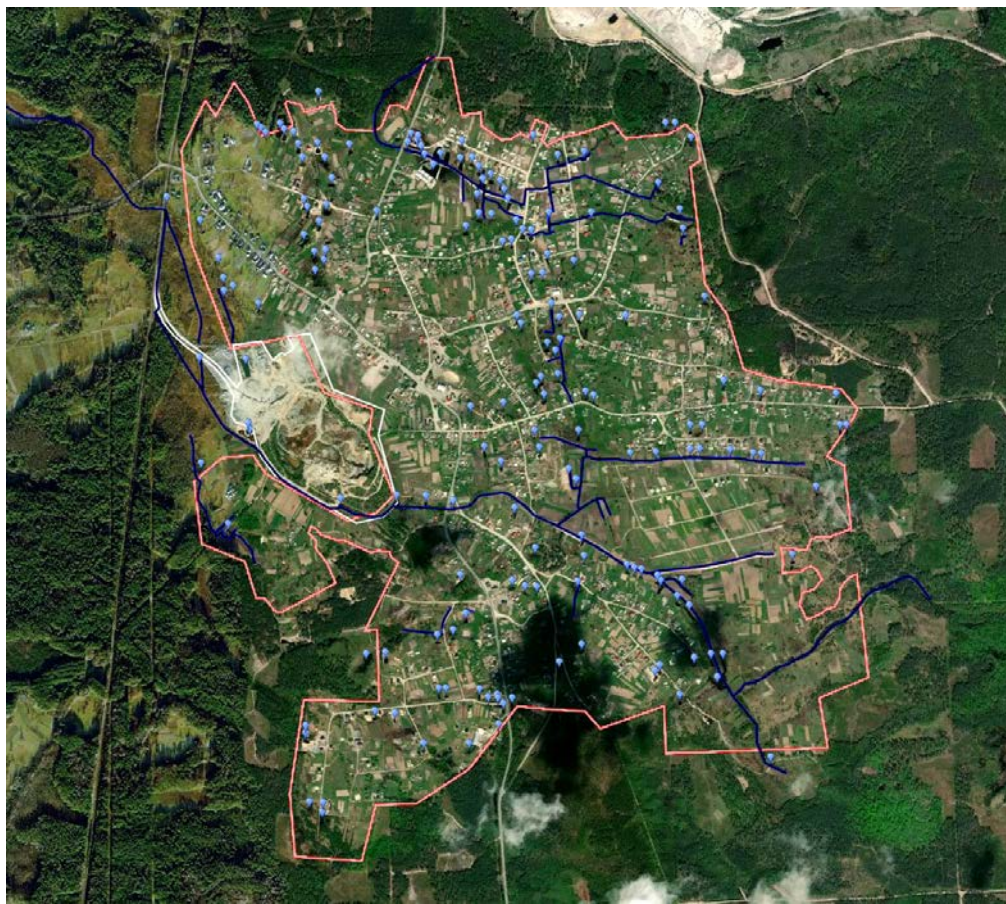
Результати проведених досліджень. Встановлено, що під родовище «Вирівське 2» виділені малопродуктивні землі, які характеризуються тонким слабозвиненим гумусним горизонтом і піщаними ґрунтами, а також болотами. Розвідані балансові запаси родовища до початку розробки кар'єру станом на 1952 р. становили 5977 тис. м³, а залишок балансових

геологічних запасів станом на 01.07.2013 р. дорівнював 3172 тис м³. Родовище представлено незмінними та порушеними вивітрюванням світлими, темно-сірими до чорного гранітами, гранодіоритами та діоритами. Товща осадових порід на родовищі складається з пісків та суглинків, що поширені на всій його площі за винятком місць виходу кристалічних порід на поверхню.

Наявні дані свідчать, що населення поруч розташованого с. Вири й досі не забезпечено безперебійним постачанням якісною питною водою. Село не підключене до централізованого водопостачання, а мешканці користуються питною водою з криниць. Частково існуюче водопостачання базується на підземних водах, розкритих свердловинами глибиною 36–185 м, які експлуатують води палеозойських відкладів. Ґрунтові води в межах забудованих територій залягають на глибині близько 3 м, а в понижених місцях рельєфу знаходяться на глибині до 1 м. Окремі ділянки села затоплюються повеневидами. Небезпечні геологічні процеси відсутні. Нині в с. Вири централизоване водовідведення відсутнє, населення користується надвірними вбиральнями. Для кожного двору існуючої садибної забудови рекомендується побудова септиків, а також водонепроникних вигребів із систематичним їх очищенням та вивозом нечистот на зливну станцію на території очисних споруд.

У с. Вири в попередні роки виконана інженерна підготовка території, що забезпечує відведення поверхневих вод, а також понижує рівень ґрунтових вод на природно підтоплених ділянках. Для територій нової забудови села проведені роботи з водовідведення підземних та дощових вод. На деяких ділянках забудови с. Вири ще необхідне проведення відновлювальних робіт або реконструкція існуючих меліоративних (осушувальних) каналів. Загалом у межах с. Вири нараховується 175 водних об'єктів: річок, каналів, ставків, копанок та інших водойм. (рис. 2).

Долина р. Случ на ділянці протікання р. Вирівка в межах с. Вири повністю меліорована (каналізована). Меліоративні канали збудовані переважно в другій половині минулого століття з метою відведення води з верхових боліт для збільшення площ сіножатей і пасовищ. Окремі канали є каналізованими руслами малих природних водотоків (як і р. Вирівка), здебільшого періодичних водотоків – струмків або потічків. Упродовж практично усієї довжини в межах с. Вири в річку впадають численні дренажні канали, прокладені для пониження рівнів ґрунтових вод на





-  — русло річки, мережа відкритих каналів
-  — замкнені водні об'єкти: озера, ставки, копанки

Рис. 2. Позначення на карті в межах села Вири ставків, копанок, каналів та інших водойм (виділено синім кольором)

присадибних ділянках (рис. 3). У багатоводні і середні за водністю періоди ґрунтові води на значній частині с. Вири залягають на глибині до 1 м і для вирощування сільськогосподарських культур місцеві мешканці на присадибних ділянках вимушені влаштовувати в міжряддях тимчасові осушувальні канали.

Гідрогеологічні та гідрологічні умови формування притоку до кар'єру. Технологічний процес видобутку граніту і виробітку будівельного щебеню не передбачає використання великої кількості води. Розкритті і добувні роботи на кар'єрі ведуться механічними способами без використання гідралічних методів розпушування і транспортування породи. Технічна вода в невеликій кількості необхідна лише в процесі механічного дроблення каменю, здебільшого для зменшення викидів пороховатих частинок. Для цього використовується оборотна кар'єрна вода без додаткового забору поверхневих або підземних вод. Для незначних за об'ємом

питних і господарських потреб використовується джерельна вода. Основні проблеми, що пов'язані з водою, обумовлені припливом ґрунтових і поверхневих вод та необхідністю їх відведення для забезпечення нормальних умов експлуатації кар'єру (рис. 4).

У районі родовища широко поширені підземні води водоносного горизонту докембрійських кристалічних порід та продуктів їх вивітрювання і водоносний горизонт осадової товщі. У зв'язку зі слаборозвинutoю природною озерно-балковою мережею та високим місцевим базисом ерозії підземний стік району незначний. Водонасичена товща четвертинних порід слабо дренується, від чого в районі робіт має місце значне заболочення. Продукти вивітрювання кристалічних порід представлені переважно каолінізованою жорсткою, вони є водонепроникною товщею для ґрунтових вод, додатково їх можна вважати своєрідним водотривом між тріщинними та четвертинними водами. Водночас гідралічний



Рис. 3. Розчистка та днопоглиблення русла р. Вирівка з влаштуванням захисної дамби



Рис. 4. Фільтраційні потоки з кристалічних порід до Вирівського гранітного кар'єру

зв'язок між водоносними горизонтами є через те, що жорстка не витримана по площі.

Живлення водоносного горизонту у кристалічних породах докембрію відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів та перетікання із вищезалегаючого водоносного горизонту. На даний час ґрунтові води повністю здреновані через тривалу експлуатацію родовища.

Виконані в ході розробки проекту гідргеологічні вишукування водоносного горизонту у тріщинуватих породах показали, що дебіти свердловин, які були пробурені на кристалічні породи, складали від 0,367 до 1,54 м³/год. При дебіті 1,12 м³/год зниження рівня дорівнювало 1,3 м, коефіцієнт фільтрації дорівнював 0,438 м/добу.

Водоприплив у кар'єр розраховується переважно на прикінцевий термін розробки родовища. У період розробки проекту водоприплив до кар'єру розраховано гідравлічним

методом, із врахуванням геолого-гідргеологічних умов та інтенсивності видобутку корисної копалини. В результаті виконаних розрахунків встановлено, що на сьогодні розрахунковий водоприплив до кар'єру становить 4,054 тис. м³/добу, а на прикінцевий термін розробки – 4,869 тис. м³.

Іншою важливою складовою притоку води до родовища є поверхневий стік. Оскільки для захисту кар'єру від поверхневих вод по всьому його периметру кар'єрне поле огорожене нагірною канавою, то об'єм дощового стоку в кар'єрі визначається тільки кількістю атмосферних опадів, що випадають безпосередньо на ділянку кар'єру. Розрахований з урахуванням середньої багаторічної кількості атмосферних опадів і випарування об'єм притоку становить 78,11 тис. м³/рік, або 214 м³ за добу. Відповідно сумарний притік до кар'єру на прикінцевий період експлуатації родовища становить 5,083 тис. м³/добу.

Враховуючи, що максимальна добова кількість опадів тут становить 170 мм, максимальний водоприплив до кар'єру в період зливових опадів може сягнути 1,325 тис. м³/добу.

У відповідності до «Журналу обліку водоспоживання (водовідведення) побічними методами», який ведеться у ТОВ «Вирівський гранітний кар'єр», у 2021 р. фактичне щомісячне водовідведення з кар'єру становило: у січні – 12 тис. м³, лютому – 15 тис. м³, березні – 30 тис. м³, квітні – 33,6 тис. м³, травні –

36,3 тис. м³. Максимальне добове водовідведення з кар'єру при цьому становить 1,171 тис. м³/добу, що значно менше розрахункових добових значень.

Хімічного і біологічного забруднення р. Вирівка кар'єрними водами не відбувається, оскільки згідно з даними проведених лабораторних досліджень відібрана для аналізу кар'єрна вода не містить хімічних домішок і солей, вміст яких перевищує гігієнічні нормативи для питної води (табл. 1).

1. Результати розгорнутих лабораторних випробувань води з поверхневої водойми в руслі річки Вирівка (скид кар'єрної води Вирівського гранітного кар'єру) від 08.06.2021 р.

Назва показника	Одиниці вимірювання	Результати вимірювання	Оцінка невідповідності значеності вимірювань, δ	Гранично допустима концентрація за НД*	Назва показника	Одиниці вимірювання	Результати вимірювання	Оцінка невідповідності значеності вимірювань, δ	Гранично допустима концентрація за НД*
Водневий показник, рН	од. рН	6,54	±0,05рН	6,5-9,0	Кальцій (Ca)	мг/дм ³	25,6	0,025	180,0
Температура	°С	14,0	±0,1 °С	≤40	Кадмій (Cd)	мг/дм ³	<0,001	–	0,005
Завислі речовини	мг/дм ³	<10	±10%	25	Кобальт (Co)	мг/дм ³	<0,01	–	0,01
Сухий залишок	мг/дм ³	174	±10%	1000	Хром (Cr)	мг/дм ³	<0,001	–	0,001
Фосфати (за PO ₄ ³⁻)	мг/дм ³	0,03	±10%	0,7	Мідь (Cu)	мг/дм ³	<0,001	0,001	0,001
Сульфати (SO ₄ ²⁻)	мг/дм ³	69	±10%	100	Калій (K)	мг/дм ³	9,5	0,095	50,0
Хлориди (Cl ⁻)	мг/дм ³	24	±15%	300	Галій (Ga)	мг/дм ³	<0,01	–	–
Амоній (за NH ₄ ⁺)	мг/дм ³	<0,01	±9%	1,0	Індій (In)	мг/дм ³	<0,01	–	–
Нітриди (за NO ₂ ⁻)	мг/дм ³	<0,01	±25%	0,08	Літій (Li)	мг/дм ³	<0,01	0,01	–
Нітрати (за NO ₃ ⁻)	мг/дм ³	9,7	±25%	40,0	Магній (Mg)	мг/дм ³	10,0	0,001	40,0
ХСК	мгО/дм ³	29	±15%	50	Марганець (Mn)	мг/дм ³	<0,01	–	0,01
БСК ₅	мгО/дм ³	<3	±25%	3,0	Молибден (Mo)	мг/дм ³	<0,001	–	0,0012
АПАР	мг/дм ³	<0,01	±25%	20,0	Нікель (Ni)	мг/дм ³	<0,01	–	0,01
Нафтопродукти	мг/дм ³	<0,01	±25%	0,05	Натрій (Na)	мг/дм ³	26,0	0,02	120
Жири та масла	мг/дм ³	<1	±32%	50	Свинець (Pb)	мг/дм ³	<0,01	–	0,1
Залізо (Fe)	мг/дм ³	0,03	0,08	0,1	Стронцій (Sr)	мг/дм ³	0,034	0,003	–
Аргентум (Ag)	мг/дм ³	<0,01	–	0,1	Селен (Se)	мг/дм ³	<0,01	–	–
Алюміній (Al)	мг/дм ³	0,025	–	0,036	Талій (Tl)	мг/дм ³	<0,01	–	–
Бор (B)	мг/дм ³	0,06	–	0,1	Цинк (Zn)	мг/дм ³	<0,01	–	0,01
Барій (Ba)	мг/дм ³	<0,01	0,01	–	Ртуть (Hg)	мг/дм ³	<0,00001	–	0,00001
Вісмут (Bi)	мг/дм ³	<0,01	–	0,1	Миш'як (As)	мг/дм ³	<0,01	–	0,05

*Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України від 30.07.12 № 471 та «Загального переліку гранично допустимої концентрації (ГДК) і орієнтовано безпечних рівнів впливу (ОБРВ) шкідливих речовин для води рибогосподарських водойм».

Оцінювання можливого впливу розробки Вирівського-2 родовища гранітів на ресурси підземних вод. У геоморфологічному відношенні район розробки родовища становить собою ділянку плоскої денудаційної рівнини, на якій зустрічаються заболочені зниження та болота, переважно невеликі за площею. Більшість болотних масивів на сьогодні осушена. Існуючі заболочені ділянки і болота часто пересихають у теплий період року, тому їх екологічна цінність як регулятора річкового стоку невисока.

У гідрогеологічному відношенні басейн належить до ділянки із сповільненим гідрогеологічним режимом. Значне обводнення поверхні району зумовлене великою кількістю атмосферних опадів, відносно рівним рельєфом, наявністю малої товщі осадових порід, що покривають кристалічні масиви. Грунтові води на значній площі ділянки залягають на невеликих глибинах (від 0,3 м до 1,5 м), місцями 4,0 м. На окремих ділянках ґрунтові води у високі і середні за водністю роки піднімаються до денної поверхні, створюючи заболочені низини і болота. Це насамперед пов'язано із слабким дренаванням товщі четвертинних порід і практично суцільним поширенням продуктів вивітрювання кристалічних порід, що представлені водонепроникною товщею каолінізованої жорстви. За тривалий час експлуатації кар'єру рівні ґрунтових вод водоносного горизонту докембрійських кристалічних порід уже встановилися

і нині залишаються відносно стабільними. Подальша розробка кар'єрного масиву практично не впливатиме на їх рівні.

Безпосередньо на ділянці родовища відсутні меліоративні системи, як діючі, так і виведені з експлуатації (окрім осушувальної мережі в межах с. Вири). Безпосередньо біля кар'єру протікає р. Вирівка, яка повністю перехоплює поверхневий стік із південно-західної сторони кар'єру. Відповідно поверхневий стік із лівобережної частини водозбору річки в кар'єр не потрапляє.

З північно-східної частини кар'єру притоку поверхневих вод також практично немає, оскільки відмітки поверхні тут понижуються на північ, у бік басейну малої р. Люблинки і на захід, у сторону заплави Случа. Окрім того, вздовж кар'єру влаштовано протиерозійний вал, що також обмежує надходження поверхневого стоку. Відповідно кар'єр є водоприймачем лише тієї кількості опадів, що безпосередньо випадають на його поверхню, а також тріщинуватих фільтраційних вод водоносного горизонту докембрійських кристалічних порід, об'єм яких є відносно невеликим.

Свідченням низького впливу кар'єру на рівні ґрунтових вод навколишньої території є результати обстеження, що виконані в червні 2021 р. Практично на всій площі села спостерігалися дуже високі рівні ґрунтових вод, а в окремих місцях їх вихід на денну поверхню. У селі влаштовано десятки малих штучних водойм, що на час обстеження були заповнені

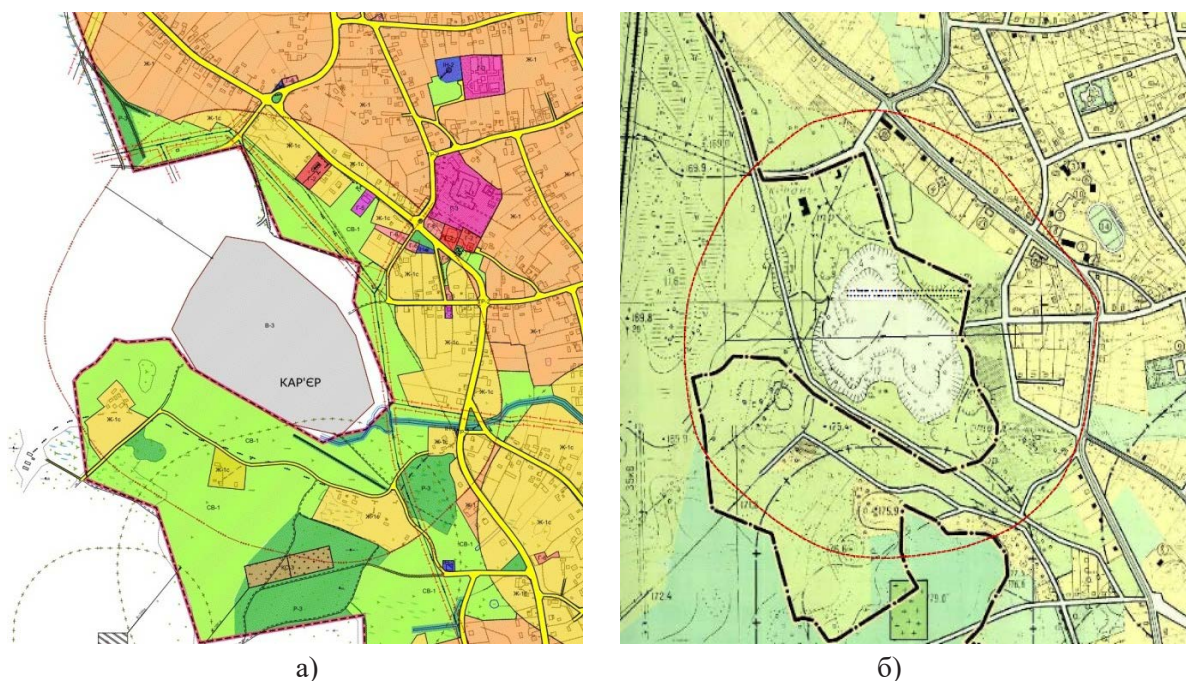


Рис. 5. Схема зонування території с. Вири (а) та санітарно-захисна зона Вирівського гранітного кар'єру, яка позначена червоною лінією (б)

майже до брівок і за свідченням мешканців практично не пересихають. Наповненими були також дренажні канали, глибина яких в основному не перевищує 1,5 м. Пониження (в останні роки) рівнів води в криницях не мало місцевих причин, а було пов'язано з дуже низькою водністю річок і кліматичними змінами практично по всій рівнинній території України [16, 17].

Генеральним планом 2013 р. в с. Вири передбачено встановлення нормативних санітарно-захисних зон, винесення їх у природу та подальша організація (рис. 5).

У відповідності до Генерального плану с. Вири від 2013 р. Вирівський гранітний кар'єр знаходиться в зоні підприємств III класу шкідливості, для якого встановлена санітарно-захисна зона шириною 300 м від межі гірничого відводу. У межах санітарно-захисної зони цим Генеральним планом не дозволяється нове житлове будівництво та влаштування джерел питного водопостачання для населення с. Вири.

Висновки. Хімічного і біологічного забруднення р. Вирівка кар'єрними водами не

відбувається, оскільки згідно з даними проведених лабораторних досліджень відібрана для аналізу кар'єрна вода не містить хімічних домішок і солей, вміст яких перевищує гігієнічні нормативи для питної води.

Загалом Вирівський гранітний кар'єр не впливає на об'єм стоку р. Вирівка, оскільки практично всі фільтраційні кар'єрні води, що надходять із водозбору, повертаються після очищення безпосередньо в цю річку.

За тривалий час експлуатації Вирівського гранітного кар'єру рівні ґрунтових вод водоносного горизонту докембрійських кристалічних порід уже встановилися і нині залишаються відносно стабільними. Подальша розробка кар'єрного масиву не впливатиме на пониження рівнів ґрунтових вод у межах с. Вири.

Зниження рівнів води в криницях та колодязях у межах с. Вири в останні роки (2015–2020 рр.) пов'язано з кліматичними змінами, що призвели до зменшення кількості опадів, підвищення температури і випаровування та, як наслідок, дуже низької водності річок практично по всій території України.

Бібліографія

1. Sinha, R.K., Pandey, D.K. and A. K., Sinha. Mining and the environment: a case study from Bijolia quarrying site in Rajasthan. *The Environmentalist*. 2000. Vol. 20. P. 195–203.
2. Martínez-Ruiz, C., Fernández-Santos, B., Putwain, P.D. and M.J.Fernández-Gomez. Natural and man-induced revegetation on mining wastes: changes in floristic composition during early succession. *Ecological Engineering*. 2007. Vol. 30 P. 286–294.
3. S. Bewiadzi, R. Awubomul and N. Glover-Meni. Searching and Cracking: Stone Quarrying, Livelihood and the Environment in the Daglama Quarry Site in the Ho Municipality. *West African Journal of Applied Ecology*. 2018. Vol. 26. P. 149–166.
4. Darwish T., Khater C., Jomaa I., Stehouwer R., Shaban A., Hamze M. Environmental impact of quarries on natural resources in Lebanon. *Land Degrad. Develop.* 2011. Vol. 22. P. 345–358.
5. Awoke Endalew, Endalew tasew, Solomon tolahun. Environment and Social Impacts of Stone Quarrying: South Western Ethiopia, in Case of Bahir Dar Zuria Wereda Zenzelma Kebele. *International Journal of Research in Environmental Science*. 2019. Vol. 5(2). P. 29–38.
6. Ульрих Д. В. Научное обоснование и разработка технологий комплексного восстановления техногенно-нарушенных территорий в районах добычи и переработки медных руд : дис. ... д-ра тех. наук : геоэкология. Москва, 2020. 361 с.
7. Xing Fang, Ni-Bin Chang, Ming-Kuo Lee and Lorraine Wolf. Environmental Impacts on Surface Water and Groundwater for Expanding Urban Water. *World Environmental and Water Resources Congress*. 2009. URL: <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/41036%28342%29189>
8. Lad R. J. and Samant J. S. Environmental and social impacts of stone quarrying-a case study of kolhapur district. *International Journal of Current Research*. 2014. Vol. 6(3). P. 5664–5669.
9. Xing Fang, Ni-Bin Chang, Ming-Kuo Lee and Lorraine Wolf. Environmental Impacts on Surface Water and Groundwater for Expanding Urban Water. *World Environmental and Water Resources Congress*. 2009. URL: <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/41036%28342%29189>
10. Камруков А.С., Кострица В.Н., Багров В.В., Тарасенко А.Б. Влияние техногенных отходов и сточных вод на окружающую среду. 2019. *Voda magazin*. URL: <https://watermagazine.ru/nauchnye-statii/novye-statii/23194-vliyanie-tekhnogennykh-otkhodov-i-stochnykh-vod-na-okruzhayushchuyu-sredu.html>
11. Назаренко Н.В., Петин А.Н., Фурманова Т.Н. Воздействие разработки месторождений по добыче общераспространенных полезных ископаемых на окружающую природную среду. *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 6. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7401>

12. Jeffrey A. Green, Jeremy A. Pavlish, Jeanette H. Leete, E. Calvin Alexander, Jr. QUARRYING IMPACTS ON GROUNDWATER FLOW PATHS. *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*. 2003. P. 216–222.
13. Talal Darwish, Carla Khater, Ihab Jomaa, Richard Charles Stehouwer, Amin Shaban, M. Hamzé. Environmental impact of quarries on natural resources in Lebanon. *Land Degradation and Development*. 2011. Vol. 22(3). P. 345–358.
14. D. Paramesha Naik, Ushamalini and R.K. Somashekar. Ground Water Quality Evaluation in Stone Quarry area. *Journal of Industrial Pollution Control*. 2021. Vol. 37 (3). P. 15–18.
15. Anil Kumar Misra. Influence of stone quarries on groundwater quality and health in Fatehpur Sikri, India. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2013. Vol. 2. P. 73–78.
16. Шевчук С.А., Вишневецький С.А. Зміни зволоженості Українського Полісся та їх наслідки. *Екологічні науки*. 2019. Вип. 26. С. 35–39.
17. Козицький О.М., Шевчук С.А., Шевченко І.А., Лагунова Н.В. Причини пониження рівня озера Сине та заходи щодо покращення його екологічного стану. *Меліорація і водне господарство*. 2020. Вип. 112. С. 101–111.

References

1. Sinha, R.K., Pandey, D.K., & A. K., Sinha (2000). Mining and the environment: a case study from Bijolia quarrying site in Rajasthan. *The Environmentalist*, 20, 195–203.
2. Martínez-Ruiz, C., Fernández-Santos, B., Putwain, P.D., & M.J.Fernández-Gomez (2007). Natural and man-induced revegetation on mining wastes: changes in floristic composition during early succession. *Ecological Engineering*, 30, 286–294.
3. Bewiadzi, S., Awubomul, R., & Glover-Meni, N. (2018). Searching and Cracking: Stone Quarrying, Livelihood and the Environment in the Daglama Quarry Site in the Ho Municipality. *West African Journal of Applied Ecology*, 26, 149–166.
4. Darwish, T., Khater, C., Jomaa, I., Stehouwer, R., Shaban, A., & Hamze, M. (2011). Environmental impact of quarries on natural resources in Lebanon. *Land Degrad. Develop.*, 22, 345–358.
5. Endalew, A., Tasew, E., & Tolahun, S. (2019). Environment and Social Impacts of Stone Quarrying: South Western Ethiopia, in Case of Bahir Dar Zuria Wereda Zenzelma Kebele. *International Journal of Research in Environmental Science*, 5(2), 29–38.
6. Ul'rikh, D.V. (2020). Nauchnoe obosnovanie i razrabotka tekhnologiy kompleksnogo vosstanovleniya tekhnogenno-narushenykh teritoriy v rayonakh dobychi i pererobki mednykh rud [Scientific substantiation and development of technologies for the complex restoration of technogenically disturbed territories in the areas of mining and processing of copper ores] dissertation for a doctor of technical sciences: geocology. Moscow, 361. [in Russian]
7. Fang, X., Chang, N-B., Lee, M.-K., & Wolf, L. (2009). Environmental Impacts on Surface Water and Groundwater for Expanding Urban Water. *World Environmental and Water Resources Congress*. URL: <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/41036%28342%29189>
8. Lad, R.J., & Samant, J.S. (2014). Environmental and social impacts of stone quarrying—a case study of kolhapur district. *International Journal of Current Research*, 6(3), 5664–5669.
9. Fang, X., Chang, N-B., Lee, M.-K., & Wolf, L. (2009). Environmental Impacts on Surface Water and Groundwater for Expanding Urban Water. *World Environmental and Water Resources Congress*. URL: <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/41036%28342%29189>
10. Kamrukov, A.S., Kostritsa, V.N., Bagrov, V.V., & Tarasenko, A.B. (2019). Vliyanie tekhnogennykh otkhodov i stochnykh vod na okruzhaiushchuyu sredu [The impact of industrial waste and wastewater on the environment]. *Water magazin*. URL: <https://watermagazine.ru/nauchnye-stati2/novye-stati/23194-vliyanie-tekhnogennykh-otkhodov-i-stochnykh-vod-na-okruzhayushchuyu-sredu.html> [in Russian]
11. Nazarenko, N.B., Petin, A.N., & Furmanova, T.N. (2012). Vozdeystvie razrabotki mestorozhdeniy po dobuche obshcherasprostranionykh poleznukh iskopaemukh na okruzhaiushchuyu sredu [The impact of the development of deposits for the extraction of common minerals on the environment]. *Modern problems of science and education*, 6. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7401> [in Russian]
12. Green, J.A., Pavlish J.A., Leete J.H., & Calvin, E.A. Jr. (2003). QUARRYING IMPACTS ON GROUNDWATER FLOW PATHS. *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*, 216–222.

13. Darwish, T., Khater, C., Jomaa, I., Stehouwer, R. C., Shaban, A., & Hamzé M. (2011). Environmental impact of quarries on natural resources in Lebanon. *Land Degradation and Development*, 22(3), 345–358.

14. Naik, D., Ushamalini, P., & Somashekar R.K. (2021). Ground Water Quality Evaluation in Stone Quarry area. *Journal of Industrial Pollution Control.*, 37(3), 15–18.

15. Misra, A. K. (2013). Influence of stone quarries on groundwater quality and health in Fatehpur Sikri, India. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2, 73–78.

16. Shevchuk, S.A., & Vishnevskiy, S.A. (2019). Zminy zvolozhenosti Ukrain's kogo Polissia ta ii naslidki [Serpents of fecundity of the Ukrainian Polissya and her inheritance]. *Ecological sciences*, 26, 35–39. [in Ukrainian]

17. Kozitskiy, O.M., Shevchuk, S.A., Shevchenko, I.A., & Lagunova, N.V. (2020). Prichinu ponizhenia rivnia ozera Sune ta zakhody shchodo pokrazhchenia yogo ekologichnogo stanu [The reasons for the decrease in the level of Lake Sinta are coming in today for the reduced level of the ecological camp]. *Melioration and non-government gift*, 112, 101–111. [in Ukrainian]

**С.А.Шевчук, О.В.Зорина, А.Н.Шевченко,
О.Н. Козицкий, Э.А. Маврикин**

Оценка влияния Выровского гранитного карьера на состояние поверхностных и грунтовых вод в пределах села Выры

Аннотация. Проанализированы результаты собственных исследований по оценке влияния Выровского гранитного карьера на состояние поверхностных и грунтовых вод в пределах села Выры Сарненского района Ровенской области Украины. Методы проведения исследований: гидрогеологические, санитарно-химические, аналитические. Установлено, что технологический процесс добычи гранита и выработки строительного щебня не предусматривает использование большого количества воды. В качестве технической воды используется карьерная вода без дополнительного забора поверхностных или подземных вод. Основные проблемы при эксплуатации карьера, решаемые на предприятии, связаны с водой. Они обусловлены притоком грунтовых и поверхностных вод и необходимостью их отвода для обеспечения обычных условий эксплуатации карьера. Значительное обводнение поверхности района обусловлено обилием атмосферных осадков, относительно ровным рельефом, наличием малой толщи осадочных пород, покрывающих кристаллические массивы. Итак, химического и биологического загрязнения р. Выровка карьерными водами не происходит, поскольку результаты лабораторных исследований карьерной воды не показали ее загрязнения. В целом, Выровский гранитный карьер не влияет на объем стока р. Выровка, за длительное время эксплуатации Выровского гранитного карьера уровни грунтовых вод водоносного горизонта уже установились и в настоящее время остаются относительно стабильными. Дальнейшая разработка карьерного массива не повлияет на понижение уровня грунтовых вод в пределах с. Выры. Снижение уровней воды в колодцах и колодцах в пределах с. Выры в последние годы (2015–2020 гг.) связано с климатическими изменениями, которые привели к уменьшению количества осадков, повышению температуры и испарению и, как следствие, очень низкой водности рек практически по всей территории Украины.

Ключевые слова: карьерный массив, качество воды, объем стока, климатические изменения

**S.A. Shevchuk, O.V. Zorina, A.M. Shevchenko,
O.M. Kozitsky, Y.O. Mavrykin**

Assessment of the influence of the Viriva granite quarry on the condition of the surface and ground waters within the Vyry village

Abstract. Analyzed the results of their own research to assess the impact of the Vyrovsky granite quarry on the state of surface and ground waters within the village of Vyry, Sarny district, Rivne region of Ukraine. Research methods: hydrogeological, sanitary-chemical, analytical. It has been established that the technological process of extracting granite and producing construction crushed stone does not involve the use of a large amount of water. Pit water is used as process water without additional intake of surface or groundwater. The main problems during the exploitation of the car, which are found on the enterprises, are connected with water. The stench is overwhelmed by the surging of ground and surface waters and the need for input for the safety of normal minds of their exploitation. Significant watering of the area's surface is due to the abundance of atmospheric precipitation, relatively flat relief, the presence of a small thickness of sedimentary rocks covering the crystalline massifs. So, the chemical and biological pollution of the river. The extraction by quarry waters does not occur, since the results of laboratory studies of the quarry water did not show its contamination. In general, the Vyrovsky granite quarry does not affect the volume of the river flow. Alignment, for a long time of operation of the Vyrovsky granite quarry, the groundwater levels of the aquifer have already been established and currently remain relatively stable. Further development of the open pit area will not affect the lowering of the groundwater level within the village. Vyry. Decrease in water levels in wells and wells within the village. Vyry in recent years (2015–2020) is associated with climatic changes, which led to a decrease in precipitation, an increase in temperature and evaporation and, as a consequence, a very low water content in rivers practically throughout Ukraine.

Key words: quarry area, water quality, runoff volume, climatic changes

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-293>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/293>

UDC 631.421.1:633.62:628.381.1

RECYCLING BIOSOLIDS TO IMPROVE MARGINAL LANDS FOR BIOENERGY FEEDSTOCK PRODUCTION IN UKRAINE

N.O. Didenko¹, Ph.D., Y.B. Mosiichuk², Ph.D., M.D. Zosymchuk³, Ph.D., M.M. Kharytonov⁴, D.A. Sci, M.G. Babenko⁵, Ph.D., B.O. Mazurenko⁶, Ph.D., S.O. Lavrenko⁷, Ph.D., M.A. Rahman⁸, Ph.D., K.R. Islam⁹, Ph.D.

¹ Institute of Water Problems and Land Reclamation of NAAS of Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-0654-4231>; e-mail: 9449308nd@gmail.com;

² Institute of Water Problems and Land Reclamation of NAAS of Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-9754-6522>; e-mail: y.mosiichuk@gmail.com;

³ Institute of Water Problems and Land Reclamation of NAAS of Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-7162-8300>; e-mail: zosimchykm@gmail.com;

⁴ Dnipro State Agrarian and Economic University, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-4650-5819>; e-mail: kharytonov.m.m@dsau.dp.ua;

⁵ Dnipro State Agrarian and Economic University, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-0920-3846>; e-mail: mg.babenko@gmail.com;

⁶ National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-4177-9909>; e-mail: mazurenko.bohdan@nubip.edu.ua;

⁷ Kherson State Agrarian and Economic University, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0003-3491-1438>; e-mail: lavrenko.sr@gmail.com;

⁸ The Ohio State University South Centers, Piketon, Ohio, U.S.; <https://orcid.org/0000-0002-5215-3506>; e-mail: rahman.220@osu.edu;

⁹ The Ohio State University South Centers, Piketon, Ohio, U.S.; <https://orcid.org/0000-0002-2244-0395>; e-mail: islam.27@osu.edu;

Abstract. Energy independence is one of the national priorities facing Ukraine today. Plant-based feedstocks have the potential to diversify Ukraine's energy independence by decreasing dependence on petroleum-based energy, reducing greenhouse gas emissions, expanding renewable fuel industries and creating job opportunities. However, biofeedstock needs to be competitive on availability, performance, and price to produce, market, and produce fuels. We hypothesize that domestically produced feedstocks from sweet sorghum, using proactive recycling of nutrient-rich biosolids on vast areas of degraded and marginal lands, could be a win-win energy independence strategy in Ukraine. Our goal is to create for generating a steady-state source of biofeedstock and disseminate science-based knowledge and training to the clientele. Specific objectives are to: (1) establish research studies to evaluate growth and feedstock productivity, nutrient removal, and feedstock characteristics of sweet sorghum fertilized with biosolids on degraded and marginal lands in Rivne, Kherson, Dnipro, and Kyiv regions of Ukraine; and (2) determine the impact of biosolids and sweet sorghum on soil quality. Data collected on growth, feedstock production, feedstock characteristics, fuel potential, and high-value co-products (biochar) of sweet sorghum and soil quality will be evaluated by multivariate statistics. Input, output, and outreach data will be subject to techno-economic analyses to evaluate the economically viability, environmentally compatibility, and social acceptability of the project. Traditional and electronic outlet activities will be utilized to disseminate outcomes and outputs and to evaluate project impacts.

Key words: biofuels, professional development, soil quality, sweet sorghum, waste recycling

1. Introduction. Energy independence is one of the national priorities facing Ukraine (Velychko & Tretiako, 2010; Kharytonov, 2019a) as Ukraine is the net importers of geo-thermal energy. In recent years, the Government of Ukrainian has prioritized to derive 25% of its total energy generation from alternate sources by 2035.

Ukraine is the 2nd largest country in Europe with 70% of its land with various degrees of

degradation is under conventional agriculture. While using best farmlands to grow energy crops is not a logical choice, and the question is: how can the economic benefits of growing crops for energy and bio-based products in degraded lands be balanced by the environmental concerns? The prospect of using existing prime land for harvesting corn, wheat, and soybean for ethanol, biodiesel, or bioenergy feedstock production is highly debated. So, while agronomic crops

represent a significant biofuel source, it can also cause environmental degradation with increased agroecosystem disservices.

Energy crops that are already widely grown, or being developed, include corn (*Zea mays*, L.), soybeans (*Glycine max*), sunflower, switchgrass, big bluestem, Eastern Gamma grass, Sudan-sorghum, sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench species), energy beet, sugarcane, Miscanthus (*Miscanthus giganteus*), Arundo, Guayule, Eucalyptus, and hybrid willow and poplar (Lavrenko et al., 2007; Tilman et al., 2011; Dweikat et al., 2012; Soudani et al., 2017; Islam, 2020).

Among them, sweet sorghum is one of the dedicated multipurpose bioenergy crops, which can be grown on degraded and marginal soils to withstand diverse conditions due to its versatile adaptability, high biomass yield potential (C_4 pathway), high sugar contents, greater water- and nutrient-use efficiency, and low maintenance life cycle when compared to other agronomic and bioenergy crops (Wortmann et al. 2010). Growing sweet sorghum on marginal lands can be a promising eco-friendly win-win situation to supplement Ukraine's growing energy needs due to its unique mechanism of moisture regulation, sorghum is highly tolerant to drought and salinity stresses, insects, pests, and diseases (Reddy et al., 2007; Dalla Marta et al., 2014; Rakhmetov et al., 2018; Kharytonov et al., 2019ab) (Fig. 1).

Biosolids are nutrient-rich organic byproducts of municipal water treatment facilities that can be used to rejuvenate marginal land productivity for growing sweet sorghum (Yucel et al., 2015; Soudani et al., 2017; Kharytonov et al., 2019abc, Islam et al., 2020). It is expected that proactive recycling of biosolids will sustain energy feedstock production on marginal lands by providing labile organic matter, increasing availability of essential plant nutrients, and sustain plant growth. Moreover, the impact of biosolids amendments under relatively less disturbed soil

environment is expected to support microbial diversity and efficiency (anabolism), increase C:N stoichiometry to decrease greenhouse gas emissions, increase soil carbon sequestration, and improve soil quality. However, very limited studies were conducted to evaluate the effects of municipal biosolids on the growth, yield, and feedstock characteristics of sweet sorghum when grown on marginal lands in Ukraine (Kharytonov et al., 2019).

The goal of the research is to create possibilities for generating a steady-state source of biofeedstock to support energy independence. Specific objectives are to: (1) establish research studies to evaluate growth and feedstock productivity, nutrient removal, and feedstock characteristics of sweet sorghum fertilized with biosolids on degraded and marginal lands in the Rivne, Kherson, Dnipro, and Kyiv regions of Ukraine; (2) determine the impact of biosolids and sweet sorghum cropping on soil quality; (3) provide research training to Ukrainian scientists for professional development and institutional capacity building; and (4) develop outreach educational materials.

2. Materials and methods. The study area. Field experiments will be conducted simultaneously at Rivne (northwest), Kyiv (north), Dnipro (southeast), and Kherson (south) regions of Ukraine under contrasting soil and climatic conditions (Fig. 2).

Experimental design. A randomized complete block (RCB) design in a 4 (biosolids rates) x 2 (sweet sorghum varieties) split-plot experiment with four replications will be established at four different locations, as described above (Fig. 2). Biosolids rates, as the main plot, will be 0 (control), 10, 20, and 40 kiloliters (KL), equivalent to 0, 24, 48 and 96 kg N; 0, 10, 20 and 40 kg P; and 0, 8, 17, and 34 kg K per ha, respectively, compared with a standard chemical NPK fertilization treatment. Sweet sorghum variety (U.S vs. Ukrainian) will be the



Fig. 1. Sweet sorghum growth and cane production (Dweikat et al., 2012)

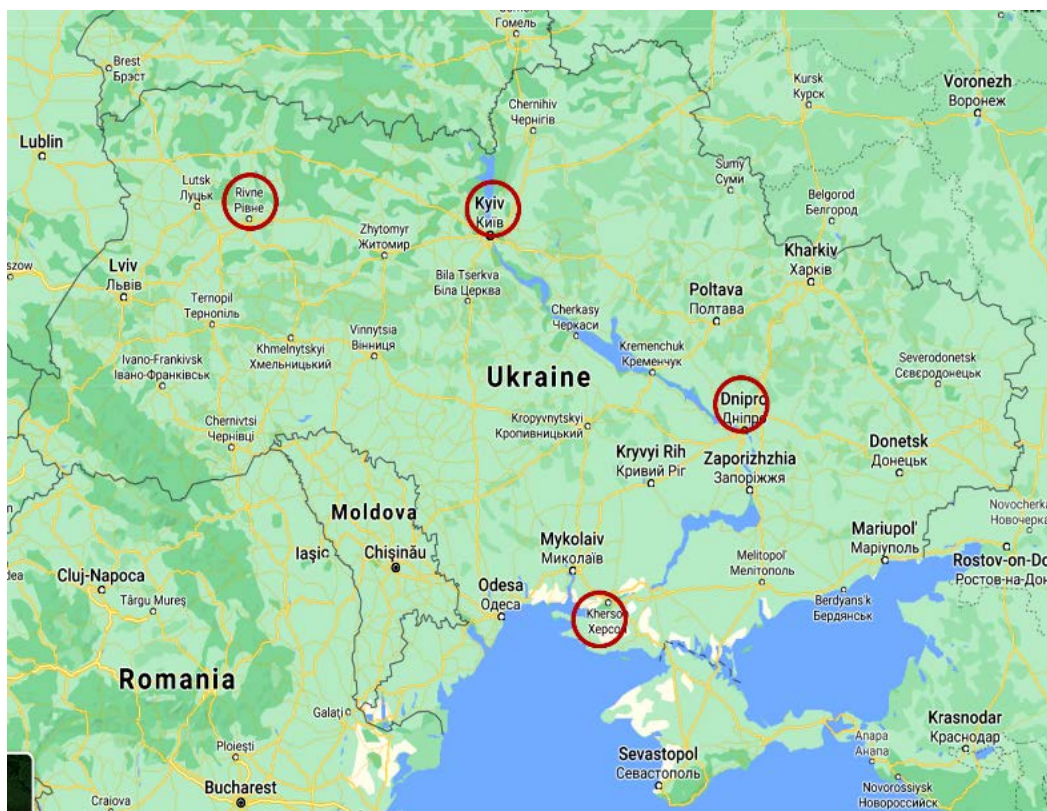


Fig. 2. Experimental location (red)
(<https://www.google.com/maps/place/Ukraine>)

sub-plot. Each replicated plot will be 35-m long x 15-m long with a 2-m buffer between plots.

Based on our preliminary studies (Kharytonov et al., 2019abc), we have selected *Zubr* (Ukrainian variety) and *Mohawk* (U.S. RAE LIN company and University of Nebraska-Lincoln) varieties of sweet sorghum due to their versatility, site and climatic adaptability in Ukraine, higher water and nutrient-use efficiency, biomass production, and cane sugar concentration. The rates of biosolids amendments were calculated based on currently available data on Ukrainian biosolids nutrient concentration (Mosiichuk, 2017). Biosolids will be collected from domestic wastewater treatment plants at respective sites.

Field operation and cultural practices. In early autumn 2021, all the experimental sites will be prepared to lay-out the experimental plots. Within a week, biosolids as the main plot will be surface applied at the proposed rates at each site. After 48-h, biosolids amended will be chisel plowed to incorporate the biosolids into the soil followed by planting of winter rye as a cover crop. In the early spring (late March), rye will be rolled over or terminated by applying herbicides followed by no-till (NT) planting of sweet sorghum in mid-April, as per cultural practices. Sweet sorghum at Rivne and Kyiv will

be grown under rainfed conditions, in contrast to those grown under deficit irrigation in Dnipro and Kherson sites.

Growth, biomass productivity, and feedstock quality. Sweet sorghum growth, physiological and metabolic processes (photosynthesis, transpiration, respiration, and stomatal conductance) will be determined and recorded, using a portable photosynthesis system at different growth stages. Cane yield and total biomass production will be recorded at harvest. Based on on-site weather data, the reference evapotranspiration (ET) and crop coefficients (Kc) will be determined for irrigation scheduling and to calculate for water-use efficiency of sweet sorghum. Crop residues on the surface and in the soil (roots) after annual harvesting, will be sampled from 2-m x 2-m blocks to calculate for annual flow of organic residue (carbon) in ecosystems. Using all the data, several drought stress tolerant and adaptivity indices of sweet sorghum will be calculated.

Sweet sorghum cane will be mechanically squeezed to extract juice for measuring sugar content, brix, conservative sugar yield (CSY), and theoretical ethanol yields (TEY). The TEY will be calculated as sugar yield multiplied by 0.58-L ethanol per kg of CSY (Rutto et al., 2013). While a modified Anthrone-reactive method will

be used to determine for total glucose equivalent sugar content (Islam & Weil, 2000), the brix will be determined by reflectometry. The CSY (ton/ha) will be calculated (Wortmann et al., 2010) as:

$$CSY = (FSY - DSY) \cdot \text{brix} \cdot 0.75$$

where FSY and DSY are fresh and dry cane yields, respectively.

Biomass samples will be oven-dried at $55 \pm 2^\circ\text{C}$, ground, and analyzed for total C and N contents by CNS analyzer, and for total P, K, Ca, Mg, S, and micronutrients (Fe, Mn, Cu, and Zn) using Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometry. Moreover, bioprocessing characteristics of feedstock will be analyzed for different lignocelluloses, caloric values, and silica (Si) and heavy metals (Al, Pb, Cd, Cr, and Ni) contents. Lignocelluloses will be determined by hydrolysis and HPLC analysis for monosaccharides. The ash content of biomass will be determined by the loss of ignition method. The EPA-3051 method will be used for heavy metals content of feedstock by ICPE Spectrometry. Moreover, a thermogravimetric analysis of biomass will be carried out to obtain information on thermal stability to estimate for differential mass loss and heating effects of biomass.

Biomass Yield (t/acre)	Juice Sugar Content (%)		
	13	15	17
25	250	288	326
35	351	404	457
45	451	518	586

Assumes .55 juice expression ratio and 90% fermentation efficiency

Fig. 3. Potential bioenergy (ethanol) yield of sweet sorghum (Dweikat et al., 2014)

Soil sampling and analysis. To evaluate the effects of sweet sorghum cropping and biosolids amendments on soil quality, composite soils (as baseline) will be sampled from all sites in early autumn prior to laying out the experiments and at the end of the experiment. The soil will be collected from 0-45 cm depth with a 15 cm interval from each replicated plot following the systematic sampling technique. While a portion of the field-moist soil will be processed to analyze for key biological properties, another portion of the soil will be air-dried and processed to analyze for key chemical and physical properties using standard methods.

Soil biological properties. Soil total microbial biomass will be determined by using the rapid

microwaved soil irradiation and extraction method (Islam & Weil, 1998). Basal respiration (BR), as an indicator of soil biological activity, will be determined by following the *in vitro* static incubation method (Islam & Weil, 2000). Several metabolic quotients (qR and qCO_2) as measures of ecosystem stress or recovery on soil will be calculated (Anderson & Domsch, 1990; Islam & Weil, 2000).

Soil chemical properties. Total soil organic C (SOC) and total N (TN) contents will be determined using the automated dry combustion CNS analyzer. Soil active C (AC) and N (AN), as composite indicators of soil quality and N availability, will be determined using a modified $KMnO_4$ oxidation method (Islam et al., 2021). Soil macro- (P, Ca, Mg, K, and S) and micronutrients (Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo), and heavy metals (Al, Pb, Co, Cr, and Ni) will be analyzed by Melich-3 extraction and inductively coupled plasma emission spectrometry. Soil pH and electrical conductivity will also be measured using electrode methods.

Soil physical properties. Soil bulk density and penetration resistance will be determined using the standard core method and digital penetrometer. Soil moisture-holding capacity will be measured using thermo-gravimetric methods. Soil aggregate stability will be evaluated by determining macro- and microaggregate stability and aggregation and persistence indices (Kempers & Rosenau, 1986; Jahangir et al., 2020; Islam et al., 2021).

Quantification of soil quality. Both inductive (key soil properties) and deductive (biomass, sugar yield) additive approaches will be used to calculate for soil quality index (Amoakwah et al., 2021; Islam et al., 2021). Using the standardized scoring functions that state «higher, lower, or mean values ($SQ_{Index} = [\sum(X_0 X_{max}^{-1}) + (X_0 X_{mean}^{-1}) + \{1 - (X_0 X_{max}^{-1})\}] n^{-1}$) are better indicators of soil quality», a half of the data will be normalized in a scale (>0 to ≤ 100) relative to the maximum value of that indicator in the dataset to remove variability (Fig. 4). The normalized scores will be evaluated by principal components analysis (PCA) to select key soil quality indicators as a minimum dataset (MDS) to calculate a generalized soil quality index (>0 to ≤ 100), with 100 being excellent in quality and 0 being extremely poor quality.

Based on the PCA analysis to select MDS (first set), the other half of the data will be normalized, summed, and calculated for soil quality index (second set). Finally, soil quality index calculated based on the first and second sets will be correlated and subjected to the analysis

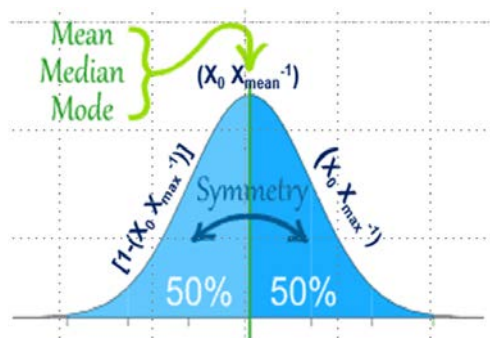


Fig. 4. Concept of soil quality modeling

of variance to control redundancy and validate the quantification on changes in soil quality (Amoakwah et al., 2021).

Modeling of soil carbon sequestration. The stocks of SOC and TN data in different pools at each depth and within the soil profile will be calculated by multiplying their concentration with the concurrently measured bulk density (variable mass). However, to account for extra soil mass from using concurrently measured bulk density among and/or between soils from different treatments, an “equivalent soil depth” will be used to convert SOC and TN concentration into mass-per-unit area (Aziz et al., 2013). The stocks of SOC and TN in different pools, based of calculation of antecedent bulk density or equivalent soil depth, will be regressed over time to calculate for SOC sequestration and TN accumulation rates and C: N stoichiometry in soil organic matter.

Statistical analysis and techno-economical assessment. Multivariate procedures will be used for data analysis and interpretation of results. These procedures will provide the most up-to-date capabilities for ANOVA by allowing the calculation of F and P values to separate simple and interactive effects of predictor variables on dependent variables using the least square difference (LSD) test at $p \leq 0.05$, unless otherwise mentioned. The PCA will be performed to identify core soil and crop properties as minimum datasets to account for soil quality variations in response independent variables. Regression and correlation analyses will be performed to calculate for SOC sequestration using polynomial, hyperbola, exponential, and power models.

We will also log all inputs, operating costs, feedstock yields, biofuel potential, nutrient removal, heavy metal impact, greenhouse gas emissions, and SOC sequestration. Using all these inputs and outputs, we will perform a techno-economic analysis to evaluate the prospects of raising sweet sorghum energy plantations on biosolids amended marginal lands in Ukraine. The methodology outlined in published papers will be used as a guide for techno-economic analysis (Perrin et al., 2008).

Conclusions. Municipal biosolids are a nutrient-rich organic byproduct of water treatment facilities, also can be used as a potentially viable source of biochemical amendment to rejuvenate the soil quality of marginal lands. Municipalities all over Ukraine have an abundance of biosolids, so the appeal of using them as an amendment to improve the soil quality is quite logical because the approach, as a natural system, will facilitate an environmentally compatible disposal system for efficient nutrient recycling to support biofeedstock production. While energy crops are not grown for food, forage, or feed, applying municipal biosolids to rejuvenate marginal lands for producing biofeedstock poses no danger to human or animal health. By adopting traditional and electronic outreach approaches, we will document project outcomes and outputs, which will include: increased knowledge on sweet sorghum biofeedstock production on marginal lands; increased economic activity associated with the recycling of biosolids, biofeedstock production, processing and marketing, and creation of green jobs to improve the rural economy; change in public policy for recycling biosolids to rejuvenate marginal land; and utilization of 25 % of marginal lands in Ukraine for biofeedstock production by 2050.

Acknowledgement. U.S. National Science Foundation (NSF) via Civilian Research and Development Foundation (CRDF) Global and the Ministry of Education and Science of Ukraine (MES) have funded our project research as part of the U.S.-Ukrainian Alternative Energy Research Competition.

References

1. Velichko, S.A., & Tretyakov, O.S. (2010). *Alternatyvna enerhetyka Ukrainy [Alternative energy of Ukraine]*. Kharkiv : Osnova.
2. Kharytonov, M.M., Martynova, N.V., Tokar, A.V., Rula, I.V., Babenko, M.G., & Bagorka, M.O. (2019). Sweet sorghum biomass quantitative and qualitative characteristic depending on hybrid and type of soil. *INMATEH – Agricultural Engineering Journal*, 59 (3), 189–196. http://www.inmateh.eu/INMATEH_3_2019/59-21-Kharytonov%20M.pdf

3. Mrynsky, I.M., & Lavrenko S.O. (2007). Bioenergetic efficiency of elements of technology of cultivation of hybrid seed (F1) of sunflower “Visit”. *Taurian Scientific Bulletin: Collection of scientific papers*, 52, 98–102.
4. Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B.L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *PNAS*, 108 (50), 20260–20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
5. Dweikat, I., Weil, C., Moose, S., Kochian, L., Mosier, N., Ileleji, K., Brown, P., Peer, W., Murphy, A., Taheripour, F., McCann, M., & Carpita, N. (2012). Envisioning the transition to a next-generation biofuels industry in the US Midwest. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6, 376–386. <https://doi.org/10.1002/bbb.1342>
6. Soudani, L., Woloszyn, M., Fabbri, A., Morel, J., & Grillet, A., (2017). Energy evaluation of rammed earth walls using long term in-situ measurements. *Solar Energy*, 141, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.002>
7. Islam, K.R. (2020) Growing Miscanthus for biofuels on marginal land amended with sewage sludge and flue gas desulfurized gypsum. *JBRA*, 1.
8. Wortmann, C.S., Liska, A., Ferguson, R.B., Lyon, D.J., Klein, R. N., & Dweikat, I.M. (2010). Dryland performance of sweet sorghum and grain crops for biofuel in Nebraska. *Agronomy & Horticulture – Faculty Publications*, 387. <https://digitalcommons.unl.edu/agronomyfacpub/387>
9. Reddy, M.V., Yu, T., Sow, C.H., Shen, Z.X., Lim, C.T., SubbaRao, G.V., & Chowdari, B.V.R. (2007). α -Fe₂O₃ Nanoflakes as an Anode Material for Li-Ion Batteries. *Advanced Functional Materials*, 17(15), 2792–2799. <https://doi.org/10.1002/adfm.200601186>
10. Marta, A.D., Mancini, M., Orlando, F., Natali, F., Capecchi, L., & Orlandini, S. (2014). Sweet sorghum for bioethanol production: Crop responses to different water stress levels. *Biomass and Bioenergy*, 64, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.033>
11. Rakhmetov, D.B., Vergun, O.M., Blum, Ya.B., Rakhmetova, S.O., & Fishchenko, V.V. (2018). Biochemical composition of plant raw material of sweet sorghum (*Sorghum saccharatum* (L.) Moench) genotypes. *Introduktsiia roslyn*, 3, 93–90. http://nbuv.gov.ua/UJRN/IR_2018_3_11
12. Kharytonov, M., Martynova, N., Babenko, M., Rula, I., Sytnyk, S., Bagorka, M, & Gavryushenko, O. (2019). Bioenergetic assesment of sweet sorghum grown on reclaimed lands. *Acta technica corviniensis – Bulletin of Engineering*, 12(3), 89–92. <http://acta.fih.upt.ro/pdf/2019-3/ACTA-2019-3-18.pdf>
13. Yucel, I., Onen, A., Yilmaz, K.K., & Gochis, D.J. (2015). Calibration and evaluation of a flood forecasting system: Utility of numerical weather prediction model, data assimilation and satellite-based rainfall. *Journal of Hydrology*, 523, 49–66. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.042>
14. Shedekar, V.S., King, K.W., Fausey, N.R., Islam, K.R., Soboyejo, A.B.O., Kalcic, M., & Brown, L.C. (2020). Exploring the effectiveness of drainage water management on water budgets and nitrate loss using three evaluation approaches. *Agricultural Water Management. Agric. Water Manage.* 243, 106501.
15. Kharytonov, M., Martynova, N., Babenko, M., Rula, I., Gumentyk, M., Bagorka, & Pashova, V. (2019). The production of biofuel feedstock on reclaimed land based on sweet sorghum biomass. *AgricultForest*, 65(4), 233–240. DOI:10.17707/AgricultForest.65.4.21
16. Mosiichuk, Y.B., & Walery, M. (2017). Purification of domestic wastewater in closed water systems in agribusiness biofilters floating loading. *Environmental Engineering – Through a young eye*, 36, 99–109. Retrieved from <https://ismo.pb.edu.pl/wp-content/uploads/2017/05/VOLUME-36-ENVIRONMENTAL-ENGINEERING-SYSTEMS.pdf#page=99>
17. Rutto, L., Xu, Y., Brandt, M., Ren, S., & Kering, M. (2013). Juice, Ethanol, and Grain Yield Potential of Five Sweet Sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) Cultivars. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 3, 113–118. doi:10.4236/jsbs.2013.32016
18. Islam, K., & Weil, R. (2000). Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. *Journal of Soil and Water Conservation*, 55(1), 69–78.
19. Islam, K., & Weil, R. (1998). Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. *Biol Fertil Soils*, 27, 408–416. <https://doi.org/10.1007/s003740050451>
20. Anderson, T.H., & Domsch, K.H. (1990). Application of eco-physiological quotients (qCO_2 and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biology & Biochemistry*, 22, 251–255.
21. Dweikat, I., Damasceno, C.M.B., Schaffert, R. (2014). Mining genetic diversity of sorgum as a Bioenergy feedstock. *Plants and BioEnergy*. Vol. 4, p. 81–106. DOI: 10.1007/978-1-4614-9329-7_6
22. Islam, K.R., Roth, G., Rahman, M.A., Didenko, N.O., & Reeder, R.C. (2021). Cover crop complements flue gas desulfurized gypsum to improve no-till soil quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(9), 926–947. <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1872594>

23. Kemper, W.D., & Rosenau, R.C. (1986). Aggregate stability and size distribution. *American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, 677 South Segoe Road, Madison, WI 53711, USA. Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods-Agronomy Monograph no. 9 (2nd Edition)*, 425–442.

24. Jahangir, M.H., & Cheraghi, R. (2020). Economic and environmental assessment of solar-wind-biomass hybrid renewable energy system supplying rural settlement load. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100895. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100895>

25. Amoakwah, E., Arthur, E., & Frimpong, K.A. (2020). Soil organic carbon storage and quality are impacted by corn cob biochar application on a tropical sandy loam. *J Soils Sediments*, 20, 1960–1969. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02547-5>

26. Aziz, R.F., & Hafez, S.M. (2013). Applying lean thinking in construction and performance improvement. *Alexandria Engineering Journal*, 52 (4), 679–695. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.04.008>

27. Perrin, R., Vogel, K., Schmer, M., & Mitchell, R. (2008). Farm-Scale Production Cost of Switchgrass for Biomass. *BioEnergy Research*, 1, 91–97. <https://doi.org/10.1007/s12155-008-9005-y>

**Н.О. Діденко, Я.Б. Мосійчук, М.Д. Зосимчук, М.М. Харитонов,
М.Г. Бабенко, Б.О. Мазуренко, С.О. Лавренко, А.М. Рахман, К.Р. Іслам**
**Використання біосолідів для покращення якості маргінальних земель
та виробництва біоенергетичної сировини в Україні**

Анотація. Енергетична незалежність є одним із національних пріоритетів, які сьогодні стоять перед Україною. Рослинна сировина має потенціал для диверсифікації енергетичної незалежності України шляхом зменшення залежності від нафтової енергії, скорочення викидів парникових газів, розширення виробництва відновлюваних джерел палива та створення робочих місць. Однак біосировина повинна бути конкурентоспроможною за доступністю, характеристиками та вартістю для виготовлення, продажу та виробництва палива. Припускаємо, що сировина, отримана із солодкового сорго, може бути використана в біоенергетиці для подальшого формування стратегії енергетичної незалежності в Україні. І особливо актуально, коли для вирощування будуть задіяні площі деградованих і маргінальних земель з попереднім внесенням біосолідів (осаду стічних вод), багатих поживними речовинами. Мета роботи полягає у розвитку взаємопродуктивної та технічно-інноваційної дослідницької співпраці між Університетом штату Огайо та кількома науково-дослідними установами в Україні для створення стабільного джерела біосировини та поширення науково обґрунтованих знань і навчання зацікавлених сторін. Основними цілями є: (1) провести наукові дослідження для оцінки приросту та продуктивності, виносу поживних речовин та характеристик цукрового сорго, удобреного осадам стічних вод на деградованих та маргінальних землях у Рівненській, Херсонській, Дніпропетровській та Київській областях України; та (2) оцінити вплив біотвердих речовин та посівів цукрового сорго на якість ґрунту. Дані щодо росту, виробництва, якісних характеристик отриманої сировини, паливного потенціалу та високоцінних побічних продуктів (біовугілля) солодкового сорго та якості ґрунту, будуть проаналізовані за допомогою багатомірної статистики. Вхідні, вихідні та інформаційні дані підлягатимуть техніко-економічному аналізу для оцінки економічної доцільності, екологічної сумісності та соціальної прийнятності проекту. Традиційні та електронні засоби поширення інформації будуть використовуватися для розповсюдження результатів та висновків, а також для оцінки впливу проекту.

Ключові слова: біопаливо, підвищення кваліфікації, якість ґрунту, солодке сорго, утилізація відходів

**Н.А. Диденко, Я.Б. Мосейчук, М.Д. Зосимчук, М.М. Харитонов,
М.Г. Бабенко, Б.А. Мазуренко, С.А. Лавренко, А.М. Рахман, К.Р. Іслам**
**Использование биосолидов для улучшения качества маргинальных земель
и производства биоэнергетического сырья в Украине**

Аннотация. Энергетическая независимость – одна из национальных приоритетов, стоящих сегодня перед Украиной. Растительное сырье имеет потенциал для диверсификации энергетической независимости Украины за счет уменьшения зависимости от энергии на основе нефти, сокращения выбросов парниковых газов, расширения производства возобновляемого топлива и создания рабочих мест. Однако биотопливо должно быть конкурентоспособным по доступности, характеристикам и цене для производства, сбыта и производства топлива. Предполагаем, что сырье, полученное из сладкого сорго, может использоваться в биоэнергетике для дальнейшего формирования стратегии энергетической независимости в Украине. И особенно актуально, когда для выращивания будут задействованы площади деградированных и маргинальных земель с предварительным. Цель работы состоит в развитии взаимопроductивного и технически инновационного исследовательского сотрудничества между Университетом штата Огайо и несколькими научно-исследовательскими учреждениями в Украине для создания стабильного источника биосырья

и распространения научно обоснованных знаний и обучения заинтересованных сторон. Основные задачи проекта заключаются в следующем: (1) проведение научных исследований для оценки прироста и производительности, выноса питательных веществ и характеристик сахарного сорго, удобренного осадком сточных вод на деградированных и маргинальных землях в Ровенской, Херсонской, Днепропетровской и Киевской областях Украины; и (2) определить влияние твердых биологических веществ и сладкого сорго на качество почвы. Собранные данные о росте производства, качественных характеристик полученного сырья, топливном потенциале и ценных побочных продуктах (биоуголь) сладкого сорго и качестве почвы будут проанализированы с помощью многомерной статистики. Входящие, исходящие и информационные данные подлежат технико-экономическому анализу для оценки экономической целесообразности, экологической совместимости и социальной приемлемости проекта. Традиционные и электронные источники информации будут использоваться для распространения результатов и выводов, а также для оценки воздействия проекта.

Ключевые слова: биотопливо, повышение квалификации, качество почвы, сладкое сорго, утилизация отходов.

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-304>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/304>

УДК 631.1:631.192

ПОТЕНЦІАЛ БІОПРОДУКТИВНОСТІ ЧОРНОЗЕМУ ТИПОВОГО В ЛІВОБЕРЕЖНОМУ ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ ЗА СПРИЯТЛИВИХ УМОВ ЗВОЛОЖЕННЯ

Ю.О. Тараріко¹, докт. с.-г. наук, Р.В. Сайдак², канд. с.-г. наук, Р.В. Олєпір³, канд. с.-г. наук,
Ю.В. Сорока⁴, канд. с.-г. наук, С.В. Вітвіцький⁵

¹ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0001-8475-240X>; e-mail: urtar@bigmir.net;

² Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-0213-0496>; e-mail: saidak_r@ukr.net;

³ Полтавська ДС ІС і АПВ НААН, Полтавська обл., с. Степне, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-0825-7914>; e-mail: roman.olepir@pdaa.edu.ua;

⁴ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0001-6228-4131>; e-mail: soroka_2020@ukr.net;

⁵ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0003-1497-137X>; e-mail: svit0505492234@ukr.net

Анотація. У статті наведено результати досліджень щодо оцінювання сучасних кліматичних змін і впливу погодних умов на врожайність основних польових культур за різних систем живлення та обробітку ґрунту. Встановлено, що за 1991–2020 рр. середньорічна температура повітря в регіоні зросла на 1,1°C, а річна кількість опадів зменшилась на 5%. За таких умов частота повторень сильно- та середньопосушливих умов вегетаційного періоду збільшилась від 47% у 1961–1990 рр. до 61% у 1991–2020 рр., натомість імовірність формування достатнього рівня зволоження зменшилась вдвічі. За результатами оцінювання кліматичного водного балансу (КВБ) встановлено, що в західній частині Лівобережного Лісостепу за середньобагаторічним значенням, починаючи з червня, формується від'ємний КВБ, а до кінця серпня його дефіцит сягає понад 140 мм або 1400 м³/га. Загалом до кінця року за 1991–2020 рр. дефіцит КВБ підвищується на 82 мм. На основі інформаційної бази даних, сформованої за результатами довгострокового стаціонарного польового дослідження Полтавської дослідної станції Інституту свинарства і агропромислового виробництва НААН, визначено потенціал врожайності основних культур та продуктивності чорнозему типового за оптимізації сівозмінного фактора, поживного і водно-повітряного режимів. Встановлено, що загальна продуктивність сівозміни за різних систем основного обробітку ґрунту практично залишається беззмінною і дає змогу отримувати в середньому по роках досліджень 3,6–3,8 т к.од./га на фоні природної родючості ґрунту. З органічних систем удобрення ефективність використання добрива побічної продукції рослинництва переважає гній на 10% і практично не поступається органо-мінеральним системам. В результаті досліджень виявлено, що в регіоні останнім часом відбувається погіршення умов вирощування основних польових культур, що проявляється у формуванні невисокої їх врожайності і продуктивності сівозміни, значній варіації цих показників стосовно особливостей погоди, зокрема на високих агрофонах.

Ключові слова: кліматичні зміни, умови зволоження, водний баланс, система удобрення, обробіток ґрунту, польові культури, продуктивність

Актуальність дослідження. Глобальні зміни клімату по-різному проявляються в різних регіонах земної кулі, а їх вплив на аграрне виробництво стає все відчутнішим. За сучасних змін клімату умови зволоження на території України є головним лімітуючим чинником, що обмежує не лише рівень продуктивності рослинництва, а й використання природного та антропогенного потенціалу землеробства.

Загальновідомо, що найбільш дієвим та ефективним засобом підвищення врожайності

сільськогосподарських культур та забезпечення сталості землеробства в умовах дефіциту природного вологозабезпечення є зрошення. Застосування зрошення дозволяє підвищити врожайність сільськогосподарських культур у 2–3 рази порівняно з богарними умовами та знизити залежність землеробства від несприятливих природних умов. Проте, враховуючи незначний та нерівномірний рівень забезпеченості території України водними ресурсами, важливого значення щодо адаптації

© Тараріко Ю.О., Сайдак Р.В., Олєпір Р.В.,
Сорока Ю.В., Вітвіцький С.В., 2021

землеробства до змін клімату набувають і інші агротехнічні заходи, передусім системи обробітку ґрунту, удобрення та сівозмін.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Численні дослідження останніх років свідчать, що в умовах стрімкого погіршення умов зволоження меліоровані землі в зонах зрошення і осушення характеризуються високим і стабільним потенціалом біопродуктивності [1–5]. За усередненими багаторічними даними зональні сівозміни на природному фоні родючості органогенних і мінеральних ґрунтів Полісся дають змогу отримувати відповідно 40 і 45 ц/га кормових одиниць (к. од.) основної і побічної продукції, в Степу на чорноземі звичайному – 30 ц к. од./га. За покращення поживного режиму продуктивність ріллі зростає відповідно до 65, 75, і 40 ц к. од./га, оптимізація сівозміни і поживного режиму забезпечує 90, 100 і 50 ц к. од./га. На меліорованих землях регулювання водно-повітряного режиму органогенного ґрунту дозволяє отримувати 140 ц к. од./га, мінерального – 150 ц к. од./га, чорнозему звичайного у Степу – 130 ц к. од./га [6–7].

Водночас були проведені дослідження щодо тенденцій змін клімату в різних ґрунтово-кліматичних зонах України [8–10]. Якщо в Степу такі зміни призводять до зниження сприятливості умов вирощування усіх польових культур, то в гумідній зоні спостерігаються позитивні тенденції в напрямку зростання їх продуктивності. В умовах лісостепової зони, з високою вірогідністю формування і сприятливих, і несприятливих гідротермічних умов, вказані тенденції дають підстави очікувати підвищення варіабельності або нестабільності продуктивності посівів і прибутковості аграрного виробництва [11].

Станом на 1994 р. в Україні площа зрошуваних земель становила 2604,9 тис. га. З них у лісостеповій зоні в межах Вінницької, Київської, Полтавської, Сумської, Тернопільської, Харківської, Хмельницької, Черкаської та Чернівецької областей зрошувальною мережею охоплювалося 791,8 тис. га. Зокрема в Полтавській області загальна площа меліорованих земель складала 88,0 тис. га, в т. ч. 69 зрошувальних систем площею 50,8 тис. га, на території Харківської області облікова площа меліорованих земель сягала 94,2 тис. га, з них зрошувані землі – 82,4 тис. га, у Вінницькій області нараховувалося 81,1 тис. га меліорованих земель, із них 23,8 тис. га зрошуваних угідь, у Черкаській області – 118,9 тис. га меліорованих земель, в т. ч. 63,2 тис. га зрошуваних, на території

Київської області площа меліорованих земель становила 232,7 тис. га, з них зрошуваних 43,9 тис. га [12, 13]. На жаль щодо можливості регулювання водно-повітряного режиму ґрунту нині ці землі використовуються незадовільно, що за стрімкого погіршення умов зволоження потребує прийняття відповідних заходів.

Мета досліджень – здійснити аналіз кліматичних змін у західній частині Лівобережного Лісостепу, встановити потенціал врожайності основних культур та продуктивності чорнозему типового за оптимізації сівозмінного фактора, поживного і водно-повітряного режимів.

Методи дослідження. Оцінювання кліматичних змін проводили на основі значень кліматичного водного балансу (КВБ) і гідротермічного коефіцієнта (ГТК). Для вирішення цих завдань використовувалися інформаційна база довгострокового стаціонарного польового дослідження та багаторічні гідротермічні показники по метеостанції Полтавської дослідної станції Інституту свинарства і агропромислового виробництва НААН. Дослід «Вплив систематичного застосування добрив при різних обробках ґрунту на продуктивність культур польової сівозміни, якість урожаю і родючість ґрунту» закладений у 1987 в с. Степне Полтавського району [14]. Ґрунт – чорнозем типовий з умістом гумусу 5%, низькою забезпеченістю доступними для рослин сполуками азоту, середньою – фосфору і калію. Досліджувані культури: кукурудза на силос, пшениця озима, соя, цукрові буряки, ячмінь, горох, пшениця озима, кукурудза на зерно.

Вивчали системи основного обробітку ґрунту: 1. Комбінована (оранка під просапні, поверхневий під інші); 2. Мілка безвідвальна (поверхневий обробіток під усі культури) та системи удобрення: 1. Без добрив – контроль (К); 2. Гній 10 т/га сівозмінної площі (Гн); 3. Гній + N52P52K52 (Гн + NPK); 4. Побічна продукція (ПП); 5. Побічна продукція + NPK (ПП + NPK).

Варіанти з використанням на добриво гною імітують галузеву структуру виробничої діяльності з розвинутим тваринництвом, контроль без добрив та варіанти з побічною продукцією на добриво моделюють суто рослинницьку спрямованість аграрного виробництва. Сприятливі роки з максимальною врожайністю досліджуваних культур імітують дію зрошення.

Природний фон продуктивності встановлювався на варіантах без добрив за показниками середньої по роках врожайності культур. Максимальний рівень продуктивності посівів на цьому фоні в найсприятливіший за історію

ведення дослідів рік визначає роль оптимізації водно-повітряного режиму ґрунту. Середня за роки досліджень врожайність за тривалого застосування органічних та органо-мінеральних систем удобрення підкреслює роль поліпшення поживного режиму ґрунтового покриву. Максимальна продуктивність культур на фоні тривалого застосування добрив імітує одночасне покращення умов вологозабезпечення і живлення рослин.

Для оцінювання розмаху коливань урожайності культур і продуктивності сівозміни по роках використовували коефіцієнт варіації [15]. Розрахунковий коефіцієнт варіації (K_v) досліджуваного показника може групуватись відповідно до прийнятої шкали якісної оцінки: менше 15% – низький; 15–30 – середній; понад 30 – високий.

Результати досліджень. Середньорічна температура повітря в Хорольському районі Полтавської області відзначається стійким підвищенням від 7,5°C на початку 60-х років минулого століття до 9,5–9,7°C в 2015–2020 рр. Нині термічний режим регіону відповідає значенням, що відмічались в 1961–1990 рр. у південних областях України.

Загалом, за 1991–2020 рр. середньорічна температура повітря регіону підвищилась проти 1961–1990 рр. на 1,1°C. Найбільш істотне зростання температури повітря спостерігається впродовж січня-березня (1,6–2,2°C) та червня-серпня (1,1–1,5°C), тоді як у вересні-грудні на 0,4–0,7°C.

На фоні зростання температурного режиму в регіоні відмічається незначне (у межах похибки) зменшення річної кількості опадів. Загалом за 1991–2020 рр. середньорічна сума опадів зменшилась на 5% або на 28 мм.

Для оцінювання умов зволоження вегетаційного періоду в регіоні, а в результаті і прийняття рішення щодо доцільності зрошення, можна також використовувати і гідротермічний коефіцієнт (ГТК). Якщо до середини 80-х років минулого століття ГТК вегетаційного періоду в середньому становив близько 1,2 (відповідав слабкому зволо-

женню), то в останні роки рідко перевищує 1,0 (середньопосушливі умови).

Окрім цього, за 1991–2020 рр. у регіоні в 60% випадків (тобто 6 років із десяти) спостерігаються сильно та середньопосушливі умови вегетаційного періоду і лише в 13% випадків – достатнє зволоження, тоді як за 1961–1990 рр. – 48 і 26% відповідно (табл. 1).

За річним кліматичним водним балансом (КВБ – різниця між річною кількістю опадів і потенційним випаровуванням) також спостерігається погіршення умов природного вологозабезпечення. Якщо до кінця 2000-х років дефіцит КВБ становив в середньому близько 40–60 мм, то за останнє десятиріччя досяг 120–200 мм, а у 2019 і 2020 рр. – близько 400 мм, що притаманно крайньому півдню країни (рис. 1).

Оцінка динаміки КВБ наростаючим підсумком по місяцях року засвідчила, що в регіоні до кінця травня в середньому зберігається позитивний водний баланс, проте вже з червня, а особливо з липня – серпня його дефіцит сягає 67–146 мм (табл. 2). Тобто, у період дозрівання основних ранніх культур та в середині вегетації пізніх здебільшого спостерігається значний дефіцит вологозабезпечення.

Згідно з середньо- та довгостроковим кліматичним прогнозом, за умов збереження сучасної тенденції кліматичних змін, умов вологозабезпечення регіону значно погіршаться. До 2050 р. дефіцит КВБ до кінця травня збільшиться до 16 мм, а до 2100 р. – 41 мм, а у вересні може сягати 300–420 мм (рис. 2). Такий рівень дефіциту потребуватиме додаткового залучення вологи близько 3000–4000 м³/га.

Отже, вірогідність настання посушливих умов нині є високою, що відповідним чином відбивається на врожайності окремих культур по роках. Аналізуючи представлені нижче рисунки (6–12) можна порівнювати подекадну динаміку гідротермічних умов у найбільш сприятливому та в інших за сприятливістю роках і встановлювати ключові періоди

1. Частота повторень різних рівнів зволоження вегетаційного періоду (квітень – серпень) за 1961–2020 рр.

ГТК	Ступінь посушливості	Частота, %	
		1961–1990 рр.	1991–2020 рр.
менше 0,7	сильно посушливо	7	13
0,71–1,00	середньо посушливо	41	48
1,01–1,20	слабке зволоження	26	26
1,21–1,80	достатнє зволоження	26	13

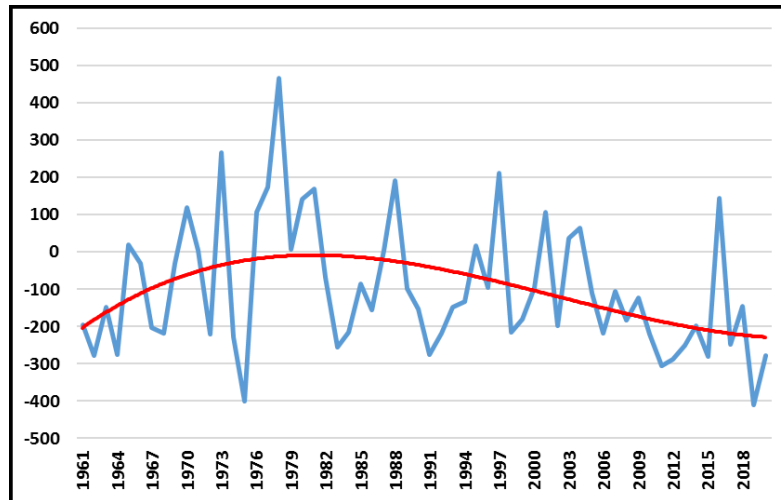


Рис. 1. Динаміка річного КВБ за 1961–2020 рр.

2. Зміна КВБ по місяцях року наростаючим підсумком за 1991–2020 рр., мм

Роки	Місяці											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII/рік
1961–1990	47	86	110	104	61	21	-20	-76	-111	-116	-82	-29
1991–2020	45	77	101	88	47	-1	-67	-146	-178	-178	-154	-111
±до 1961–1990 рр.	-2	-9	-8	-16	-14	-22	-48	-70	-66	-62	-72	-82

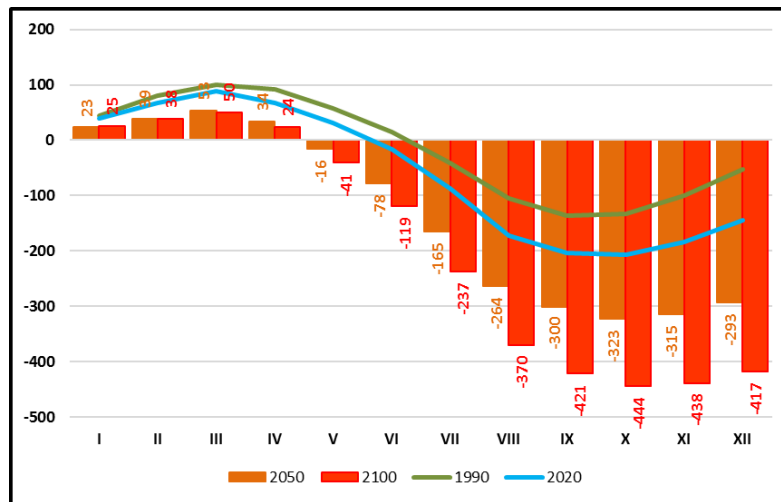


Рис. 2. Динаміка КВБ по місяцях року наростаючим підсумком за 1991–2020 рр. та прогноз до 2050 і 2100 рр., мм

з оптимальними або критичними для кожної з культур температурним режимом або кількістю опадів.

Так, найбільш несприятливими для росту і розвитку кукурудзи на силос виявилися 1998 і 2002 роки, коли вихід зеленої маси на контролі становив лише 14 т/га (рис. 3).

Ці роки відрізняються від найбільш сприятливого і врожайного (65 т/га зеленої маси на фоні без добрив) 2011 р. нижчою температурою повітря впродовж періоду від серпня по грудень попереднього року, значно вищою

температурою у період від січня по березень, а також більш прохолодними травнем, червнем і липнем. За умовами зволоження сприятливий рік відрізняється від несприятливих меншою кількістю опадів у холодний період від 3 декади грудня по 1 декаду березня та більш вологим весняно-літнім періодом від 1 декади квітня по 1 декаду липня. Загалом природний фон без добрив має потенціал виробництва зеленої маси кукурудзи на рівні 30 т/га, у сприятливих умовах зволоження досягається рубіж у 65 т/га, використання добрив дозволяє

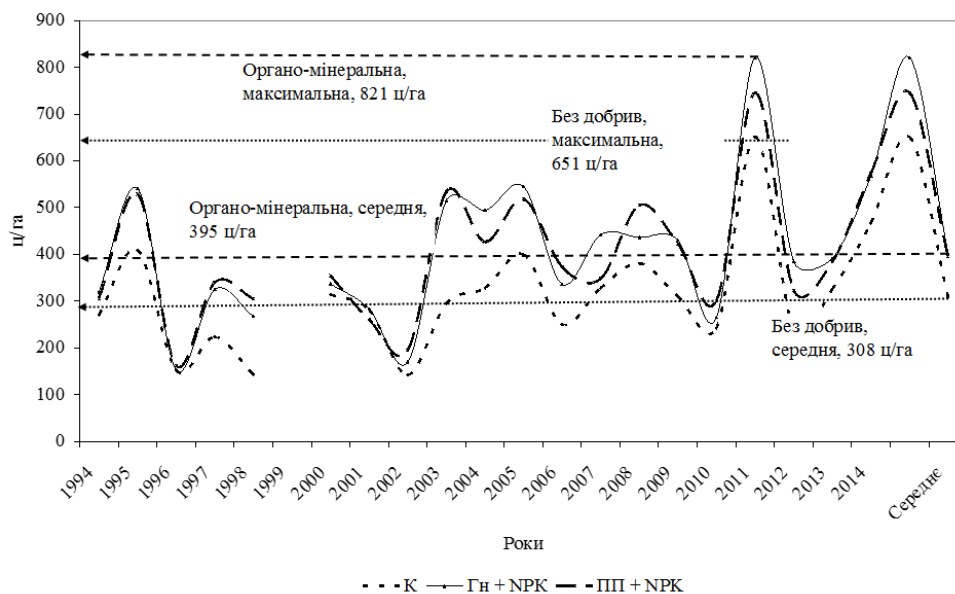


Рис. 3. Коливання врожайності кукурудзи на силос за різних умов живлення і зволоження

у середньому отримувати 35–40 т/га. За сприятливих гідротермічних показників органо-мінеральні системи удобрення забезпечують 75–80 т/га, органічні – 70–75 т/га.

На фоні без добрив врожайність пшениці озимої після кукурудзи МВС протягом 20 років коливалася від 2,6 ц/га у 1998 р. до рівня 36 ц/га у 2001, 2005, 2008 і 2014 роках із середнім показником 22,0 ц/га (рис. 4).

За систематичного використання на добриво всієї побічної продукції рослинництва цей показник був у межах 8,0–53,6 ц/га із середнім значенням 32,0 ц/га. Доповнення

соломи зернових і гички цукрових буряків мінеральними добривами найбільш ефективним було у несприятливому 1998 році із понад 6-разовим зростанням до контролю. Слід відзначити, що цей рік відрізняється від інших більшою кількістю опадів і значно нижчою сумою температур у попередній літньо-осінній період (липень-листопад). При цьому максимальний рівень майже у 60 ц/га досягнуто у сприятливому для культури 2005 р. із середнім по роках значенням 35,8 ц/га. Слід також відзначити рівноцінність органо-мінеральних систем удобрення як із гноєм, так

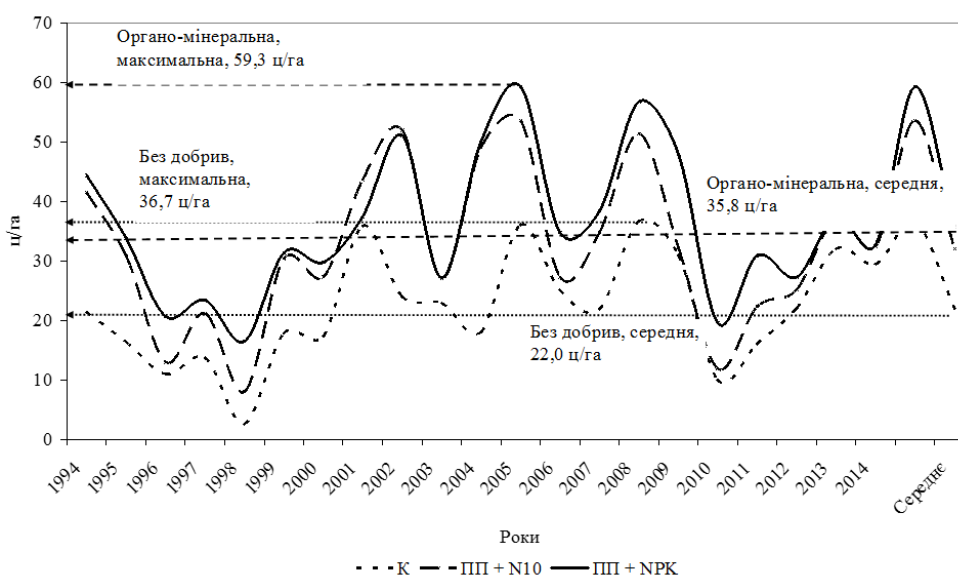


Рис. 4. Коливання врожайності пшениці озимої після кукурудзи на силос за різних умов живлення і зволоження

і з побічною продукцією на добриво. В сприятливих гідротермічних умовах органічні системи удобрення забезпечують 4,8–5,4 т/га, органо-мінеральні – 5,6–5,9 т/га зерна. Тобто потенціал продуктивності пшениці озимої після кукурудзи на природному фоні без добрив можна оцінювати у 2 т/га, за окремого поліпшення умов зволоження і живлення – на рівні 3,5–4,0 т/га, за поєднання цих факторів – 6 т/га.

Як і на кукурудзі найбільш сприятливим для вирощування сої виявився 2011 р., що може свідчити про аналогічні вимоги цих культур до динаміки формування тепло-і вологозабезпечення як попереднього осінньо-зимового періоду, так і протягом вегетації.

Середній потенціал продуктивності сої на природному фоні родючості за характерних для регіону змінних гідротермічних показників невисокий і складає 1,2 т/га, хоча у сприятливих умовах потенціал родючості чорнозему типового реалізується у вигляді 2 т/га зерна (рис. 5).

Фон тривалого застосування органічних систем удобрення у середньому дозволяє отримувати 1,4–1,5 т/га, органо-мінеральні системи забезпечують 1,6–1,7 т/га. Поліпшення гідротермічних умов істотно посилює вплив тривалого внесення добрив на врожайність культури з максимальним рівнем 3,1 т/га на фоні поєднання гною і мінеральних туків.

За комбінованого обробітку ґрунту у середньому за 10 років цукрові буряки дають змогу отримувати за рахунок природної родючості чорнозему типового 25 т/га коренів із коливанням від 16 до 38 т/га (рис. 6).

Несприятливий сезон 1997–1998 рр. відрізняється від інших нижчою сумою температур за період вересень – грудень і більш високою протягом вегетації при значно меншій кількості опадів у літній період. У близьких до оптимальних умовах 2003–2004 років на фоні без добрив вихід коренів цукрових буряків сягнув майже 38 т/га, системи удобрення із заорюванням побічної продукції у середньому по роках досліджень забезпечують на рівні 40 т/га, у сприятливих умовах добрива дають змогу підвищувати продуктивність посівів культури до контролю на 30% до 53 т/га. Причём органічна система удобрення із систематичним внесенням гною значно поступається за ефективністю побічній продукції рослинництва на добриво.

Середня по роках досліджень врожайність ячменю ярого на контролі без добрив є невисокою – менше 2 т/га зерна (рис. 7). Однак за формування сприятливих агрометеорологічних умов продуктивність культури на природному фоні родючості чорнозему типового зростає до 3 т/га. Сприятливий 1994 р. відрізнявся від несприятливого 2013 р. значно меншою кількістю опадів у попередній осінньо-зимовий період із вересня по січень та істотно нижчою сумою температур за лютий – березень. Середня багаторічна врожайність ячменю ярого сягала максимального рівня за тривалого використання органо-мінеральних систем удобрення – 2,7 т/га, у сприятливих погодних умовах продуктивність посівів культури майже подвоюється. Оскільки ячмінь вважається культурою-індикатором, то це

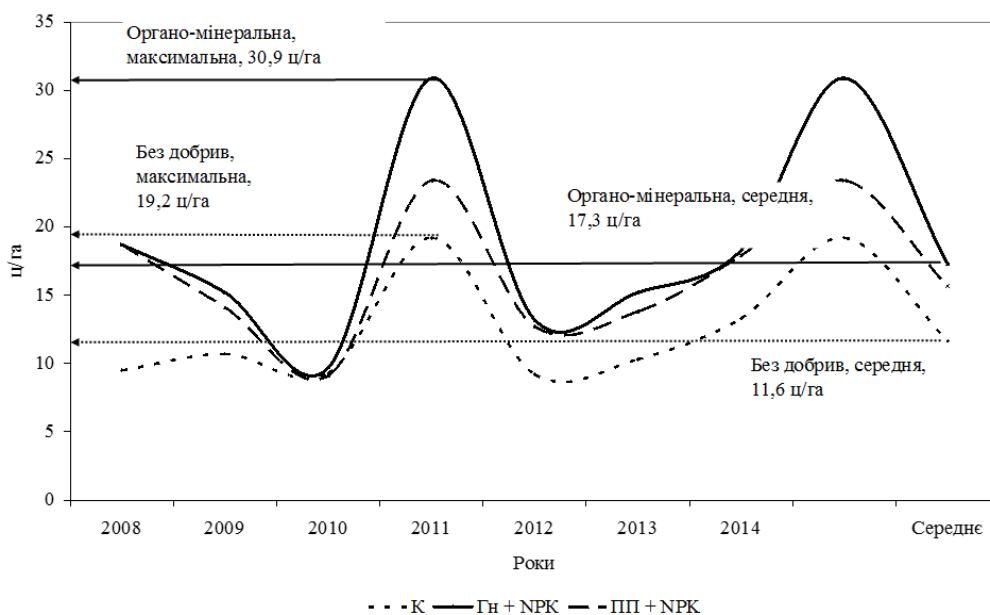


Рис. 5. Коливання врожайності сої за різних умов живлення і зволоження

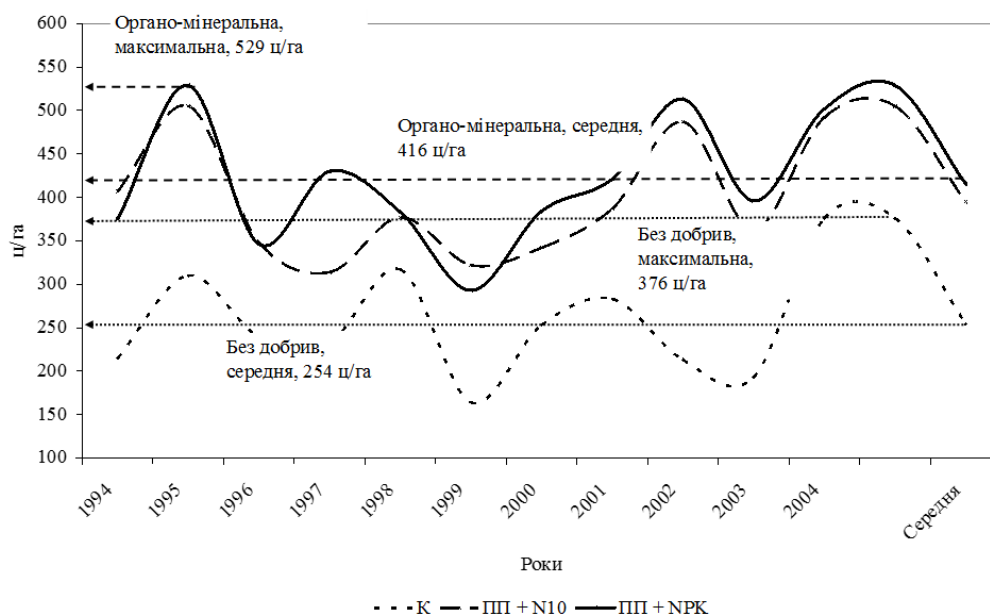


Рис. 6. Коливання врожайності буряків цукрових за різних умов живлення і зволоження

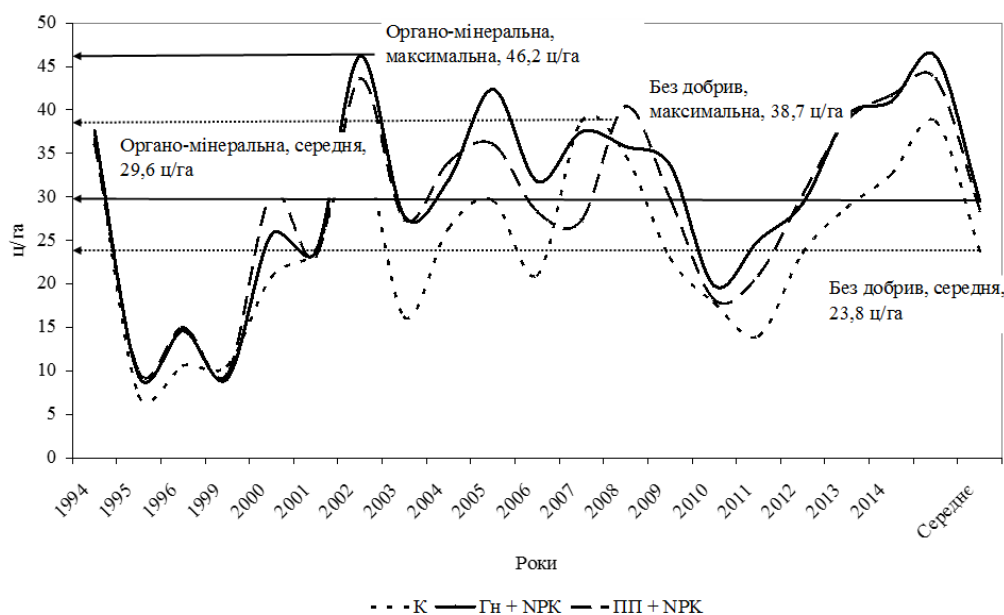


Рис. 7. Коливання врожайності ячменю ярого за різних умов живлення і зволоження

свідчить про значення одночасної оптимізації водно-повітряного і поживного режимів ґрунту в умовах регіону.

На фоні без добрив врожайність гороху протягом 20 років коливалася від 0,7 до майже 4,0 т/га із середнім значенням 2,4 т/га (рис. 8). Невдалий для культури 1996 р. відрізнявся від інших років значно більшою кількістю опадів протягом попереднього осіннього і поточного зимово-весняного періоду. Сума температур за цей проміжок часу була навпаки значно нижчою і протягом із листопада по квітень

становила мінус 300°С проти плюс 20°С у сприятливому 2007 р. із врожайністю майже 4,0 т/га. Середня врожайність культури за органічних систем удобрення становила 2,6–2,8 т/га, за органо-мінеральних – 2,9–3,0 т/га. Формування сприятливих для росту і розвитку гідротермічних умов супроводжувалося різким зростанням ефективності добрив, особливо за тривалого застосування гною.

За використання лише природного потенціалу родючості чорнозему типового середня по роках досліджень врожайність пшениці

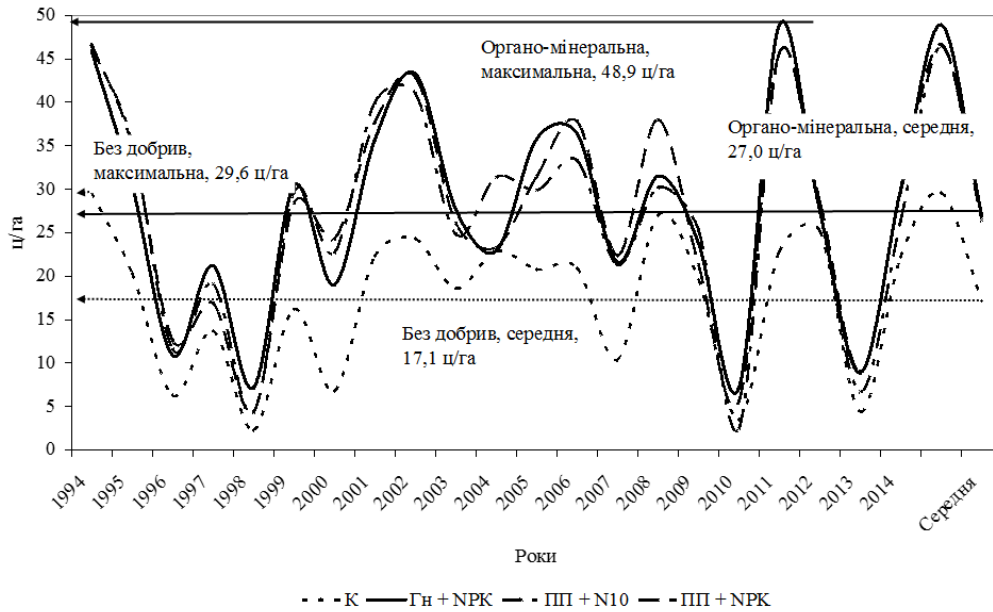


Рис. 8. Коливання врожайності гороху за різних умов живлення і зволоження

озимої після гороху становить на рівні 3 т/га, що істотно вище ніж цей показник після кукурудзи на силос (2,2 т/га). В умовах сприятливого року, що імітують штучне регулювання водно-повітряного режиму ґрунту, продуктивність посівів цієї культури на контролі сягає рівня вище 5 т/га (рис. 9). Цей врожайний рік відрізняється від неврожайного значно більшою кількістю опадів за період серпень – жовтень, що очевидно забезпечує кращий розвиток рослин перед зимівлею. Назадня ситуація спостерігається

в проміжок часу від грудня по березень, коли значно більша кількість опадів відзначається в несприятливі роки порівняно з найбільш врожайним. Період квітень – червень також був набагато вологішим у сприятливому році. За температурним режимом врожайний рік характеризується більш прохолодними осінніми місяцями і більш теплими зимовими. Середня по роках врожайність на удобрених фонах була в межах 3,4–3,9 т/га з перевагою побічної продукції на добриво над гноем. Як на пшениці після кукурудзи максимальний

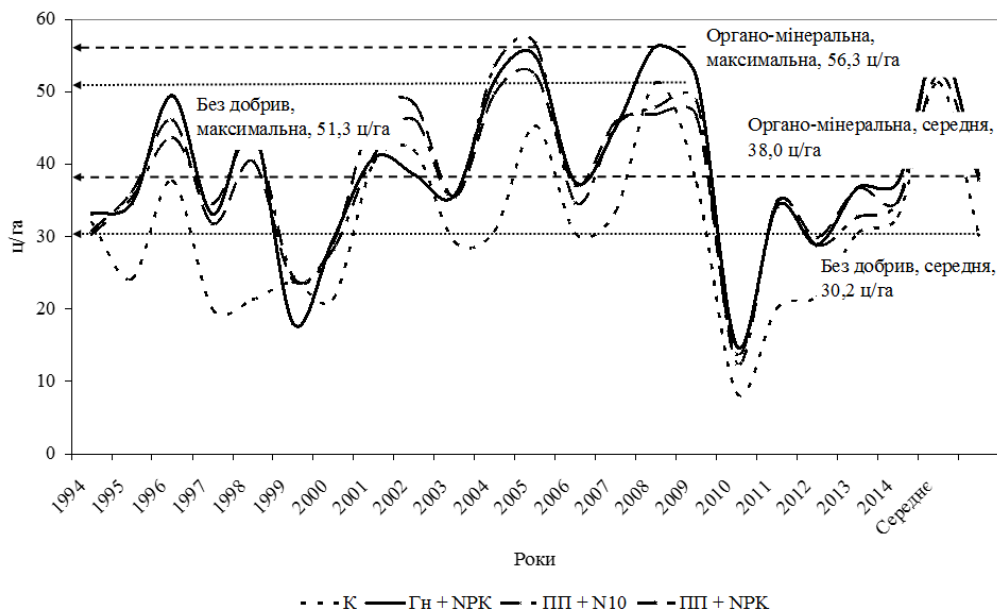


Рис. 9. Коливання врожайності пшениці озимої після гороху за різних умов живлення і зволоження

рівень продуктивності посівів, що відповідає близьким до оптимальних умовам зволоження і живлення, складає на рівні 6 т/га.

Продуктивність посівів кукурудзи на зерно без застосування добрив на чорноземі типовому протягом 20 років коливалася від 2,5 до 7,4 т/га із середнім значенням 4,5 т/га, що значно вище порівняно з іншими зерновими культурами сівозміни (рис. 10). Це свідчить про доцільність збільшення частки культури у структурі посівних площ сільськогосподарських підприємств регіону. Більш врожайні по кукурудзі роки відрізняються від інших більшою сумою опадів за осінньо-зимовий період та більш теплою другою половиною літа. Досліджувані системи удобрення дозволяють підняти середню по роках врожайність культури до 5,2–5,5 т/га з максимальним показником за сприятливих гідротермічних умов майже 10,0 т/га.

У таблиці 3 наведено результати опрацювання врожайних даних по культурах сівозміни за ступенем коливання в часі в розрізі досліджуваних систем удобрення і технологій обробітку ґрунту. Ці результати вказують на те, що на всіх культурах по варіантах дослідів коефіцієнт варіації продуктивності посівів є високим. Таке положення, своєю чергою, свідчить про істотний вплив сильно змінних погодних умов на процеси росту і розвитку рослин. З досліджуваних культур більшою мірою коливається продуктивність буряків цукрових, меншою – пшениці озимої по гороху і кукурудзи на зерно.

На силосній і зерновій кукурудзі мілкий обробіток сприяє збільшенню амплітуди коли-

вання її врожайності, на сої – зниженню. На фоні органо-мінеральних систем удобрення можна відзначити тенденцію до зменшення варіації тільки на пшениці озимій по обох попередниках.

Зависокої нестабільності по роках стосовно змінних гідротермічних умов урожайності всіх досліджуваних культур продуктивність сівозміни загалом коливається по роках значно меншою мірою. Коефіцієнт варіації за цим показником по системах удобрення варіював у межах 15–18%, при 13% на контролі без добрив. В цьому і полягає одна з найважливіших функцій сівозміни – на різні агрометеорологічні умови окремих років культури реагують також по-різному. Відповідно, чим більше культур, тим система різноманітніша, що загалом істотно підвищує сталість землеробства. Якщо враховувати, що коливання цін реалізації на різні види продукції рослинництва тісно пов'язано з врожайністю відповідних культур, то стає очевидною роль сівозмінного фактора в підвищенні економічної стабільності аграрного виробництва: більше культур більша вірогідність отримати вищий прибуток за одну з них.

Оцінювання продуктивності сівозміни в кормових одиницях показало, що природний фон без застосування добрив дає змогу отримувати у середньому по роках досліджень 3,6–3,8 т к.од./га (рис. 11).

Спосіб обробітку ґрунту на цей показник практично не впливає. З органічних систем удобрення побічна продукція на добриво переважає гній на 10% і практично не

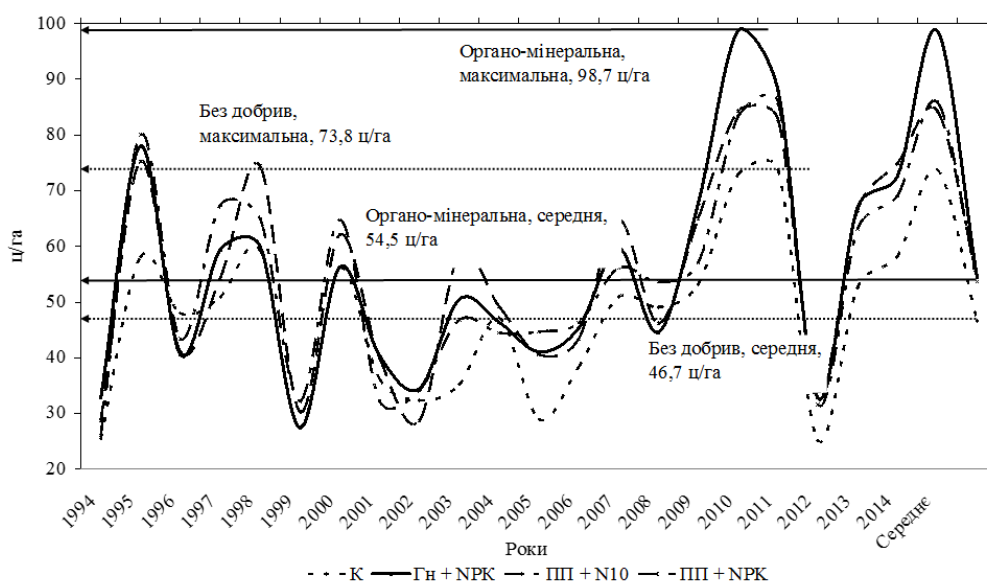


Рис. 10. Коливання врожайності кукурудзи на зерно за різних умов живлення і зволоження

3. Коефіцієнти варіації врожайності культур по варіантах досліду, %

Культури	Обробіток ґрунту	Варіанти досліду				
		К	Гн	Гн+NPK	ПП+N10	ПП+NPK
Кукурудза на силос	комбінований	39	41	39	36	35
	мілкий	43	44	40	38	39
Пшениця озима	комбінований	42	42	36	41	34
	мілкий	40	45	38	36	37
Буряки цукрові	комбінований	50	49	48	47	47
	мілкий	53	49	46	49	48
Соя	комбінований	31	31	39	37	30
	мілкий	28	29	7	11	24
Ячмінь ярий	комбінований	48	47	45	47	46
	мілкий	47	46	42	46	43
Горох	комбінований	40	39	36	36	36
	мілкий	36	44	43	38	40
Пшениця озима	комбінований	33	33	29	28	25
	мілкий	30	31	27	30	27
Кукурудза на зерно	комбінований	31	33	35	33	33
	мілкий	38	36	37	36	37

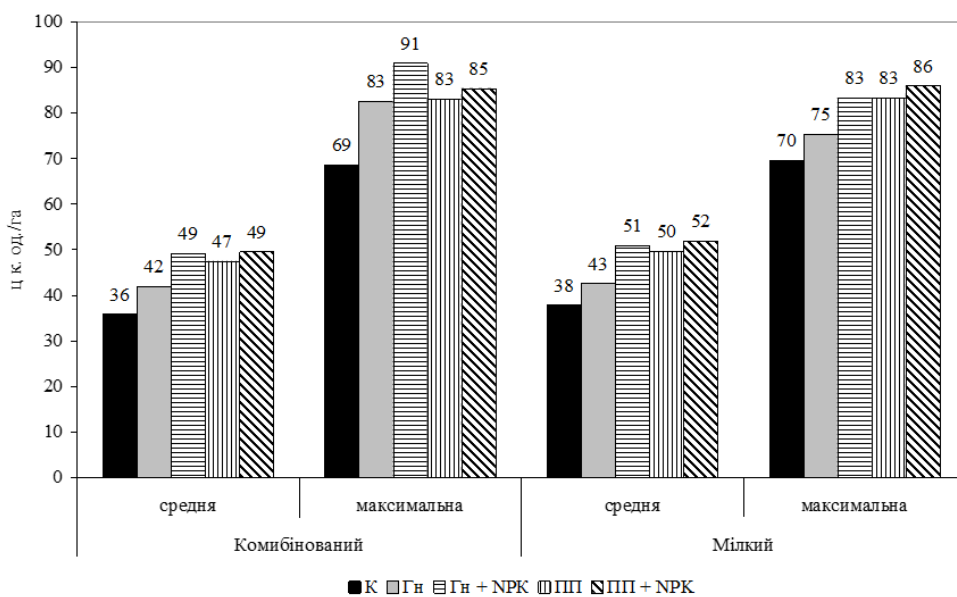


Рис. 11. Продуктивність сівозміни за різних систем удобрення і технологій обробітку ґрунту

поступається органо-мінеральним системам – 47 к.од./га проти 49 к.од./га. Можна очікувати, що за поліпшення гідротермічних умов комбінований обробіток буде більш ефективним за тваринницької спеціалізації аграрного виробництва із систематичним застосуванням гною 8,3 проти 7,5 т к.од./га за мілкого розпушення. Доповнення гною мінеральними добривами в таких умовах забезпечить зростання продуктивності ріллі на рівні 9,1 т к.од./га. За рослинницької спеціалізації виробничої діяльності з використанням на добриво усієї малоцінної частини врожаю культур сіво-

зміни її максимальну продуктивність на обох фонах обробітку ґрунту слід очікувати на рівні 8,3 т к.од./га. Доповнення побічної продукції мінеральними добривами до істотного зростання даного показника не призводить.

Отже, природний потенціал чорнозему типового за впровадження типової зональної сівозміни дозволяє отримувати у середньому по роках 3,6 т к. од./га (рис. 12).

Поліпшення поживного режиму ґрунту забезпечує 5,2 т к. од./га, оптимізація умов зволоження – 7,0 т к. од./га, перехід до 4-пільної сівозміни з найбільш продуктивних

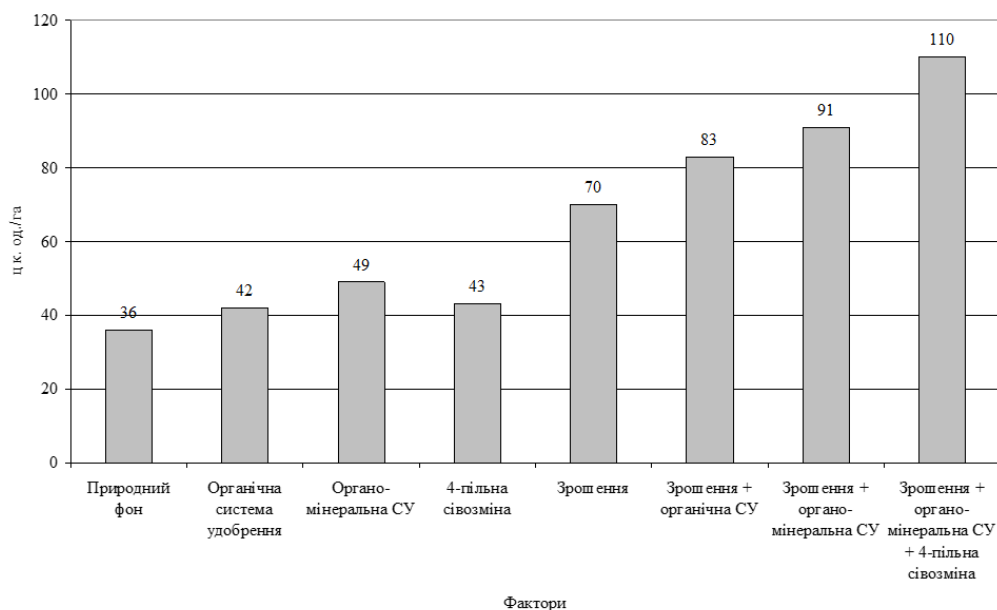


Рис. 12. Фактори підвищення продуктивності чорнозему типового в Лівобережному Лісостепу

культури – 4,3 т к. од./га, зрошення за органічної системи удобрення – 8,3 т к. од./га, за органо-мінеральної системи удобрення – 9,1 т к. од./га, одночасна оптимізація усіх факторів буде супроводжуватися зростанням продуктивності ріллі до 11,0 т к. од./га. Отримані показники доцільно використовувати при поточному і перспективному плануванні виробничої діяльності сільськогосподарських підприємств регіону. Вони дають можливість моделювати різні сценарії, порівнюючи параметри сучасної найбільш поширеної рослинницької практики з варіантами залучення різних нових складових галузевої структури аграрного виробництва: органічне землеробство, тваринництво, біоенергетика, переробка, зберігання тощо.

Висновки. У регіоні останніми десятиліттями відбувається погіршення умов вирощування основних польових культур, що виражається у формуванні невисокої у середньому по роках їх врожайності і продуктивності сівозміни, значній варіації цих показників стосовно особливостей погоди, зокрема на високих агрофонах. Деякою мірою, таке положення стабілізується тим, що різні культури сівозміни по різному реагують на змінні гідротермічні умови.

Прогнозування рівня сприятливості умов вирощування різних культур доцільно шляхом порівняння подекадної динаміки

гідротермічних умов у найбільш сприятливому і в інших за сприятливістю роках та встановлення ключових періодів з оптимальними або критичними для кожної з культур температурним режимом або кількістю опадів.

Як за середніми багаторічними, так і за максимальними показниками врожайності культур сівозміни удобрювальна дія побічної продукції рослинництва без мінеральних добрив істотно переважає органічні добрива тваринницького походження, що слід враховувати при формуванні систем виробництва органічної продукції. Це пояснюється надходженням у ґрунт більшої кількості органічної біомаси з відносно вузьким співвідношенням C/N та більш тривалою удобрювальною і мульчуючою дією.

Відповідні інтенсивні органо-мінеральні системи удобрення за впливом на продуктивність сівозміни є рівноцінними.

Організація штучного регулювання водно-повітряного режиму ґрунту буде супроводжуватися збільшенням виходу кормових одиниць за усіх досліджуваних систем удобрення в 1,6–1,8 рази. Одночасна оптимізація водно-повітряного, поживного та сівозмінного факторів дає змогу підвищити продуктивність чорнозему типового у 3 рази.

Отримані результати доцільно використовувати при поточному і перспективному плануванні виробничої діяльності в регіоні.

Бібліографія

1. Інтегроване управління водними і земельними ресурсами на меліорованих територіях : монографія / за заг. ред. П.І. Коваленка. Київ : Аграрна наука, 2016. 784 с.

2. Концепція відновлення та розвитку зрошення у південному регіоні України. Київ : ЦП «Компринт», 2014. 28 с.
3. Концепція ефективного використання осушуваних земель гумідної зони України (наукові засади). Київ : ЦП «Компринт», 2015. 22 с.
4. Меліоровані агроєкосистеми / за ред. М.І. Ромащенко, Ю.О. Тараріко. Київ – Ніжин : Видавець ПП Лисенко М.М., 2017. 696 с.
5. Наукові засади розвитку аграрного сектора економіки південного регіону України / за науковою редакцією: Ромащенко М.І., Вожегової Р.А., Шатковського А.П. Херсон : ОЛДІ-ПЛІУС, 2017. 438 с.
6. Біоенергетичні зрошувані агроєкосистеми. Науково-технологічне забезпечення аграрного виробництва (Південний Степ України) / за ред. Ю. Тараріко. Київ : ДІА, 2010. 86 с.
7. Біоорганічні системи землеробства в зоні осушення (Рекомендації) / за ред. чл.-кор. Ю.О. Тараріка. Київ : ДІА, 2013. 216 с
8. Romashchenko M.I., Saydak R.V., Matyash T.V. Development of irrigation and drainage as the basis of sustainable agriculture in Ukraine in climate change/IX International scientific and technical conference «Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction», 22–27 July. Georgia. С. 243–250.
9. Районування території України за рівнем забезпеченості гідротермічними ресурсами та обсягами використання сільськогосподарських меліорацій / Ю.О. Тараріко, та ін. Київ : ЦП «Компринт», 2015. 62 с.
10. Тараріко Ю.О., Величко В.А., Сайдак Р.В. Сучасна практика та перспективи розвитку аграрного виробництва в Одеському регіоні / *Вісник аграрної науки*, № 3. 2020. С. 32–46.
11. Стан та перспективи розвитку аграрного виробництва в Лісостепу в умовах змін клімату / Тараріко Ю.О., та ін. *Вісник аграрної науки*, № 6. 2019. С. 52–59.
12. Наличие и распределение земельного фонда в Украинской ССР // Киев : ГОСАГРОПРОМ УССР. Управление землепользования и землеустройства. 1987. 99 с.
13. Державний земельний кадастр України // Київ : Державний комітет України по земельних ресурсах. 1994. 179 с.
14. Стационарні польові досліді України. Реєстр атестатів. Київ : Аграрна наука, 2014. 146 с.
15. Математическая статистика. Иванова В.М., и др. Учебник, 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Высш. школа, 1981. 371 с.

References

1. Kovalenko, P.I. (Ed.) (2016). *Intehrovane upravlinnya vodnymy i zemel'nymy resursamy na meliorovanykh terytoriyakh: monohrafiya [Integrated management of water and land resources in reclaimed territories: a monograph]*. Kyiv: Ahrarna nauka. [in Ukrainian]
2. Kontseptsiya vidnovlennya ta rozvytku zroshennya u pivdennomu rehioni Ukrayiny [The concept of restoration and development of irrigation in the southern region of Ukraine] (2014). Kyiv : TSP «Komprynt». [in Ukrainian]
3. Kontseptsiya efektyvnoho vykorystannya osushuvanykh zemel' humidnoyi zony Ukrayiny. Naukovi zasady [The concept of effective use of drained lands of the humid zone of Ukraine. Scientific principles]. (2015). Kyiv : TSP «Komprynt». [in Ukrainian]
- 4 Romashchenko, M.I., & Tarariko, Yu.O (Ed.). (2017). *Meliorovani ahroekosystemy [Reclaimed agroecosystems]*. Nizhyn : Vydavets' PP Lysenko M.M. [in Ukrainian]
5. Romashchenko, M.I., Vozhehova, R.A., & Shatkovskiyi, A.P. (2017). *Naukovi zasady rozvytku agrarnoho sektoru ekonomiky pivdennoho region Ukrainy [Scientific bases of development of agrarian sector of economy of the southern region of Ukraine]*. Kherson : OLDI-PLJUS. [in Ukrainian]
6. Tarariko, Yu.O. (Ed). (2010). *Bioenerhetychni zroshuvani ahroekosystemy. Naukovo-tekhnologichne zabezpechennya aharnoho vyrobnytstva (Pivdennyy Step Ukrayiny) [Bioenergy irrigated agroecosystems. Scientific and technological support of agricultural production (Southern Steppe of Ukraine)]*. Kyiv : DIA. [in Ukrainian]
7. Tarariko, Yu.O. (Ed). (2013). *Bioorhanichni systemy zemlerobstva v zoni osushennya, Rekomendatsiyi [Bioorganic systems of agriculture in the drainage zone. Recommendations]*. Kyiv : DIA. [in Ukrainian]
8. Romashchenko, M.I., Saydak, R.V., & Matyash, T.V. (2019). *Development of irrigation and drainage as the basis of sustainable agriculture in Ukraine in climate change/IX International scientific and technical conference «Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction»*. [in Georgia]

9. Tarariko, Yu.O., Saydak, R.V., Soroka, Yu.V., & Vitvits'kyi, S.V. (2015). Rayonuvannya terytoryi Ukrayiny za rivnem zabezpechenosti hidrotermichnymy resursamy ta obsyahamy vykorystannya sil's'kohospodars'kykh melioratsiy [Zoning of the territory of Ukraine according to the level of provision with hydrothermal resources and volumes of use of agricultural reclamation]. Kyiv : TSP «Komprynt». [in Ukrainian].
10. Tarariko, Yu.O., Velychko, V.A., & Saydak, R.V. (2020). Suchasna praktyka ta perspektyvy rozvytku ahrarnoho vyrobnytstva v Odes'komu rehioni [Modern practice and prospects for the development of agricultural production in the Odessa region]. Visnyk ahrarnoyi nauky, 3, 32–46. [in Ukrainian]
11. Tarariko, Yu.O., Soroka, Yu.V., Saydak, R.V., & Lukashuk, V.P. (2019). Stan ta perspektyvy rozvytku ahrarnoho vyrobnytstva v Lisostepu v umovakh zmin klimatu [Status and prospects of agricultural production in the Forest-Steppe in the conditions of climate change]. Visnyk ahrarnoyi nauky, 6, 52–59. [in Ukrainian]
12. Nalychye y raspredelenye zemel'noho fonda v Ukraynskoj SSR. [Availability and distribution of the land fund in the Ukrainian SSR]. (1987). Kiev : HOSAHROPROM USSR. Upravlyenye zemlepol'zovannya y zemleustroystva. [in Russian]
13. Derzhavnyy zemel'niy kadastr Ukrayiny [State Land Cadastre of Ukraine]. (1994). Kyiv : Derzhavnyy komitet Ukrayiny po zemel'nykh resursakh. [in Ukrainian]
14. Statsionarni pol'ovi doslidy Ukrayiny. Reyestr atestativ. [Stationary field experiments in Ukraine. Register of certificates]. (2014). Kyiv : Ahrar. Nauka. [in Ukrainian]
15. Ivanova, V.M., & Kalinina, V.M. (1981). Matematycheckayastatystyka. Uchebnyk. [Mathematical Statistics: A Textbook]. (2nd ed.). Moscow : Vyshchaya Shkola. [in Russian]

Ю.А. Тарарико, Р.В. Сайдак, Р.В. Олэпир,
Ю.В. Сорока, С.В. Витвицкий

**Потенциал биопродуктивности чернозема типичного в Левобережной Лесостепи
Украины в условиях достаточного увлажнения**

Аннотация. В статье отражены результаты оценивания современных климатических изменений и влияния погодных условий на урожайность основных полевых культур при различных системах удобрения и обработки почвы. Установлено, что за 1991–2020 гг. среднегодовая температура воздуха в регионе выросла на 1,10С, а годовое количество осадков уменьшилось на 5%. При таких условиях частота повторений сильно- и среднезасушливых условий вегетационного периода увеличилась от 47% в 1961–1990 гг. до 61% в 1991–2020 гг. По результатам оценивания климатического водного баланса (КВБ) установлено, что в западной части Левобережной Лесостепи по среднемноголетнему значению, начиная с июня, формируется отрицательный КВБ, а к концу августа его дефицит достигает более 140 мм или 1400 м³/га. В целом к концу года за 1991–2020 гг. дефицит КВБ вырос на 82 мм. На основе информационной базы данных, сформированной по результатам долгосрочного стационарного полевого опыта Полтавской опытной станции Института свиноводства и агропромышленного производства НААН, определен потенциал урожайности основных культур и продуктивности чернозема типичного при оптимизации севооборотного фактора, питательного и водно-воздушного режимов. Установлено, что общая производительность севооборота при различных системах основного возделывания почвы практически остается бесменной и позволяет получать в среднем по годам исследований 3,6–3,8 т к.ед./га на фоне естественного плодородия почвы. Из органических систем удобрения эффективность использования на удобрения побочной продукции растениеводства преобладает навоз на 10% и практически не уступает органо-минеральным системам. В результате исследований установлено, что в регионе в последние десятилетия происходит ухудшение условий выращивания основных полевых культур, что отображается на формировании невысокой их урожайности и продуктивности севооборота, значительной вариации этих показателей в связи с погодой, в частности на высоких агрофонах.

Ключевые слова: климатические изменения, условия увлажнения, водный баланс, система удобрения, обработка почвы, полевые культуры, продуктивность

Yu. O. Tararico, R.V. Saidak, R.V. Olepir,
Yu.V. Soroka, S.V. Vitvitskiy

**Bioproductive capacity of typical chernozem in the Left-Bank Forest-Steppe
of Ukraine under favorable humid conditions**

Abstract. The article presents the results of research on the assessment of modern climate change and the impact of weather conditions on the yield of main field crops when using different feeding systems and tillage. It was established that during 1991–2020 the average annual air temperature in the region

increased by 1,1°C, and the annual precipitation decreased by 5%. Under such conditions, the frequency of recurrence of highly and moderately arid conditions of the growing season increased from 47% in 1961–1990 to 61% in 1991–2020, however the probability of forming a sufficient moisture supply decreased by half. Based on the results of the Climate Water Balance (CWB) assessment, it was specified that in the western part of the Left-Bank Forest-Steppe, according to average long-term data a negative WBC has been formed since June, and by the end of August its deficit reaches over 140 mm or 1,400 m³ / ha. In general, by the end of the period for 1991–2020, the deficit of WBC increased by 82 mm. Based on the information database made on the results of long-term stationary field experiment at Poltava Research Station of the Institute of Pig Farming and Agroindustrial Production of NAAS, the yield potential of main crops and the productivity of typical chernozem subject to the optimization of crop rotation and nutrient and water-air regimes, were evaluated.

It was determined that optimization of crop rotations increases plant productivity by 19%, fertilizer systems – by 19–36%, irrigation – by 94%, irrigation and fertilization – by 130–153%, and a comprehensive combination of all agronomic measures – by 200% and more. It was also established that the total productivity of crop rotation under different systems of basic tillage remains virtually unchanged and enables to obtain average by year 3.6–3.8 t kd / ha against the background of natural soil fertility. From the organic fertilizer systems, the efficiency of using crop by – products as fertilizers is 10% higher than using manure and practically does not concede to organomineral fertilizer systems. As a result of research it was found that in the region in recent decades there is a tendency of deteriorating growing conditions of main field crops, which is reflected in the formation of low yields and poorer crop rotation productivity, significant variation of these factors in terms of weather, especially when having high soil fertility.

Key words: climate change, humidification conditions, water balance, fertilizer system, tillage, field crops, productivity

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-289>

Available at: <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/289>

УДК 631.421.2;631.43

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОФІЛЬНОЇ МІНЛИВОСТІ ВОДНО-ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧОРНОЗЕМУ ПРИ ДОВГОТРИВАЛОМУ ЗАСТОСУВАННІ ОРАНКИ ТА NO-TILL ТЕХНОЛОГІЙ (НА ПРИКЛАДІ ПАНФІЛЬСЬКОЇ ДОСЛІДНОЇ СТАНЦІЇ)

С.С. Коломієць ¹, канд. с.-г. наук, А.С. Білоброва ², аспірант, В.М. Віршовка ³, канд. с.-г. наук, Т.В.Тарасенко ⁴

¹ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-4329-4382>; e-mail: kss2006@ukr.net;

² Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-0540-9492>; e-mail: anastasiabilobrova1993@gmail.com;

³ Панфільська дослідна станція ННЦ «Інститут землеробства НААН», Київська обл., Яготинський р-н., с. Панфили вул. Центральна, 2, Україна; <https://orcid.org/0000-0001-8828-8309>; e-mail: volodimiv@ukr.net;

⁴ Панфільська дослідна станція ННЦ «Інститут землеробства НААН», Київська обл., Яготинський р-н., с. Панфили вул. Центральна, 2, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-6463-7014>; e-mail: sanenia@ukr.net.

Анотація. Наведено результати актуальних досліджень профільної мінливості водно-фізичних властивостей ґрунтів непорушеної структури на ділянках 11-річного застосування традиційної оранки та no-till технології. Порівняльні дослідження проведені на базі стаціонарного польового досліді на Панфільській дослідній станції ННЦ «ІЗ НААН» із використанням новоствореної в ІВПіМ НААН системи лабораторного діагностування водно-фізичних властивостей на основі гідрофізичних методів. Одержані для трьох інтервалів глибини основні гідрофізичні функції – вологopровідності та водоутримувальної здатності, а також гідрологічні константи – максимальна гігроскопічність, вологість в'янення, найменша вологомiсткість, повна вологомiсткість, питома поверхня ґрунту та діапазон активної вологи. За результатами порівняння встановлено, що на ділянці оранки у ґрунтах більше розвинута мезопористість, а на ділянці no-till більше розвинута макропористість. Фундаментальним результатом є встановлення інверсійного типу профільного розподілу вологopровідності ненасиченого ґрунту: на ділянці no-till найвищі значення вологopровідності спостерігаються у найглибшому горизонті (0,70–0,85 м), зменшуючись із наближенням до поверхні ґрунту, а на ділянці оранки найвищі значення вологopровідності зафіксовані в оброблювальному горизонті (0,00–0,15 м), які закономірно знижувались із глибиною. Профільний розподіл вологopровідності на ділянці no-till сприяє інфільтраційному живленню підземних вод і капілярному підживленню кореневого шару ґрунту з глибоких горизонтів.

Ключові слова: оранка, no-till, ґрунтова матриця, структура порового простору, водоутримувальна здатність, вологopровідність ґрунту, інверсія вологopровідності

Актуальність дослідження. У сільськогосподарській літературі досить жваво дискутується доцільність запровадження в землеробстві України no-till технологій, які в Америці і Західній Європі вже широко впроваджуються у виробництво. Загалом технології мінімального і нульового обробітку, окрім зниження енергоємності землеробства, наближають процеси ґрунтоутворення на виробничих угіддях до природного стану. Недостатньо вивченим залишається питання продуктивності цих агротехнологій і відтворюваності родючості ґрунтів. Засобами сучасного ґрунтознавства і агрофізики досить складно оцінювати порівняно повільні процеси еволюційних змін власти-

востей ґрунтів за використання різних агротехнологій як через відсутність чіткої теорії агрогенної еволюції ґрунтів, так і через брак досить тонкого інструментарію контролю перебігу змін їх об'ємної будови [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження еволюційних змін властивостей ґрунтів при запровадженні no-till технологій проводили за традиційними загальноприйнятими методиками. Зокрема вивчали профільну мінливість щільності складення ґрунту, водопроникність, твердість, структурно-агрегатний склад, водотривкість агрегатів, водоутримувальну здатність тощо. Найсистемніше результати цих досліджень представлені в узагальню-

ючій роботі [2]. Однак більшість дослідників акцентують увагу на відхиленні щільності за no-till від оптимальної для конкретного типу ґрунту [3, 4, 5, 6, 7, 8], як критерію обґрунтування можливості застосування no-till технологій на ґрунтах України. Відзначають при цьому також позитивну зміну водопроникності, вологонакопичувальну здатність ґрунтового профілю, зміну структурно-агрегатного складу і водотривкості агрегатів, однак практично відсутні публікації, де розглядали б внутрішню будову ґрунтового профілю з деталізацією структури порового простору ґрунту, яка змінюється за відсутності його обробітків шляхом прямого посіву.

Для вирішення цих питань в Інституті водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук (ІВПіМ НААН) створена динамічна модель функціонування і розвитку ґрунтового середовища, що була презентована 2015 р. у Міжнародний рік ґрунту на ґрунтовій конференції у Вагенінгені (Нідерланди) [9]. Згідно з презентованою динамічною моделлю основою саморегулювання і самоорганізації властивостей ґрунтів є гомеостатичні ґрунтові процеси, що виникають у них при взаємодії з циклічно змінними зовнішніми збуреннями [10]. Створена модель є актуальною для нинішніх досить швидких глобальних змін клімату в Україні в бік аридизації [11], що підтверджує визначальну роль клімату у прискоренні еволюційних змін ґрунтів України в мінливих кліматичних умовах.

Основою еволюційних змін властивостей ґрунту є зміна структури порового простору ґрунтової матриці, тобто конструкції термодинамічної системи ґрунту за загального прогресивного розвитку ґрунтоутворення у бік розущільнення материнської породи [12]. Отже досить тонкі еволюційні зміни властивостей ґрунтової матриці в масштабі реального часу характеризують за допомогою новоствореного способу контролю структури порового простору ґрунту [13]. Розроблена в ІВПіМ система комплексного лабораторного діагностування водно-фізичних властивостей ґрунтів є високоінформативною з визначенням якісно нових показників [14], яка стала інструментарієм порівняльного аналізу профільної мінливості водно-фізичних властивостей чорноземних ґрунтів при довготривалому застосуванні оранки і технології no-till.

Метою досліджень є порівняльна оцінка тривалого понад 11 років застосування оранки і no-till технологій на профільну зміну водно-фізичних і агрофізичних властивостей

ґрунтів та деталізація процесів зміни об'ємної будови ґрунтової матриці при зміні інтенсивності гомеостатичних процесів за різної інтенсивності обробітків.

Матеріали і методи дослідження. Порівняння двох технологій землекористування проводили на базі стаціонарного дослідження в короткоротаційних сівозмінах на Панфільській дослідній станції ННЦ «Інститут землеробства НААН». Стаціонарний дослід закладено у 2009 році на полі № 7 на чорноземах типових легкосуглинкових пилуватих. На час закладання дослідження за агрохімічними та агрофізичними показниками ґрунт стаціонарного дослідження мав щільність складення $1,18 \text{ г/см}^3$, запаси продуктивної вологи в метровому шарі становили 190 мм; гідролітична кислотність ґрунту становила $2,1 \text{ мг-екв/100 г}$ ґрунту; реакція ґрунтового розчину $\text{pH}_{(\text{КСІ})}$ близька до нейтральної – 5,7; вміст гумусу (за Тюрнімом) був на рівні підвищеної забезпеченості 3,18%; вміст легкодоступних біогенних елементів становив: гідролізованого азоту (за Корнфілдом) на рівні низької забезпеченості – 123 мг/кг, фосфору – 102 мг/кг ґрунту – на рівні підвищеної забезпеченості і калію – 146 мг/кг ґрунту, був на рівні високої забезпеченості (за методом Чирикова).

Розмір посівної ділянки складає 150 м^2 ($25 \text{ м} \times 6 \text{ м}$), облікової 100 м^2 , повторення триразове. У стаціонарному дослідженні вивчали дві зернопросапні сівозміни з 50–70% зернових і 25–50% олійних культур. У дослідженні вивчали чотири системи мінеральних добрив і три способи обробітку ґрунту: no-till, мінімальний (дискування) і класичний полицевий (оранка). Розміщення варіантів і повторень систематичне.

Опробування ґрунтового профілю було проведено 24 жовтня 2019 р. Тоді з кожного ґрунтового профілю на ділянках no-till технологій та традиційної (оранки) відібрали з трьох інтервалів глибини моноліти ґрунту непорушеної структури у спеціальні ріжучі пластикові циліндри діаметром 12 см і висотою 15 см. Паралельно з відбором монолітів із тих же інтервалів відібрані у триразовій повторності за стандартними методами в ріжучі кільця проби ґрунту для визначення вологості та щільності складення. Результати цих визначень представлені в табл. 1.

Моноліти ґрунту оснащували відповідно до [14], насичували у вакуумній камері до повної вологомісткості (ПВ) та проводили власне гідрофізичні випробування водоутримувальної здатності ґрунту у циклі: швидка

1. Результати визначення природної вологості та щільності складення ґрунту по профілю ділянок no-till та оранки (Панфільська ДС ННЦ «ІЗ НААН», 24.10.2019 р.)

Інтервал глибини, м	№ зразка моноліта	Вологість за масою, W, %	Середня вологість за масою, $W_{\text{ср}}$, %	Вологість за об'ємом, θ , %	Середня вологість за об'ємом, $\theta_{\text{ср}}$, %	Щільність складення ρ , г/см ³	Середня щільність складення, $\rho_{\text{ср}}$, г/см ³
no-till							
0,00–0,15	6	12,90	11,03	16,30	14,47	1,26	1,31
		11,51		16,00		1,39	
		8,67		11,12		1,28	
0,25–0,40	10	8,16	8,29	11,20	10,61	1,37	1,28
		8,36		10,18		1,22	
		8,36		10,46		1,25	
0,70–0,85	12	9,61	9,99	12,04	12,03	1,25	1,21
		9,91		12,04		1,21	
		10,44		12,00		1,15	
оранка							
0,00–0,15	48	11,41	10,82	12,44	12,82	1,09	1,20
		11,80		13,62		1,15	
		9,25		12,40		1,34	
0,25–0,40	53	6,98	7,44	9,30	9,69	1,33	1,30
		7,62		9,86		1,29	
		7,74		9,92		1,28	
0,70–0,85	80	10,02	10,05	12,88	12,09	1,29	1,20
		10,18		11,34		1,11	
		9,94		12,04		1,21	

десорбція – повільна рівноважна сорбція – повторна швидка десорбція. У подальшому порівнювали профільну мінливість з глибиною багатьох кількісних параметрів, а також порівнювали їх між профілями з різними системами обробітки ґрунту.

Паралельно з гідрофізичними випробуваннями відбирали проби ґрунту для визначення максимальної гігроскопічності (МГ) та похідних розрахункових величин – вологості в'янення (ВВ) та питомої поверхні ґрунту відповідно до чинного ГОСТ 28268-89 [15] та рекомендацій [16,17].

Результати дослідження і їх обговорення.

Перші результати порівняльної характеристики стану ґрунтового профілю на ділянках з оранкою та no-till технологією були отримані за результатами польового опробування ґрунтового профілю в жовтні 2019 р. (табл. 1). Профільний розподіл вологості та щільності складення став результатом різних ґрунтових режимів на цих ділянках. Зокрема привертає увагу монотонне зниження щільності складення ґрунту з глибиною на ділянці no-till, тоді як у підорному шарі ораної ділянки фіксується ущільнення на 0,1 г/см³ плужна підшва. Вологість ґрунту була відносно нижчою

в підорному горизонті обох ділянок, однак на ділянці no-till порівняно з оранкою вона була вищою майже на 1%, а у приповерхневому шарі була вищою на 1,65%. Це свідчить про сприятливіші умови накопичення (заощадження) вологи у ґрунті на ділянці no-till технологій, порівняно з ділянкою оранки.

Особливістю опробування верхнього інтервалу 0,00–0,15 м було опробування ґрунту у триразовій повторності в ріжучі кільця не з одного горизонту, а послідовно по вертикалі. Тому отримані у такий спосіб значення вологості та щільності складення ґрунту на ділянках характеризують ступінь диференціації цього інтервалу за названими параметрами (табл. 1), які в подальшому осереднені для всього інтервалу.

Дослідженнями встановлено, що на ділянці no-till вологість найпоказовішого приповерхневого шару 0,00–0,15 м монотонно знижується з глибиною (табл. 1), однак на ділянці оранки максимум вологи спостерігається у середньому інтервалі (0,05–0,10 м). Щільність складення ґрунту за no-till була найвищою в середньому інтервалі (0,05–0,10 м), тоді як з оранки щільність складення ґрунту монотонно зростала з глибиною від 1,09 до 1,34 г/см³.

Результатом комплексних лабораторних досліджень ґрунтів стало визначення основних водно-фізичних констант – максимальної гігроскопічної вологості (МГ), вологості в'янення (ВВ), повної вологомісткості (ПВ), найменшої вологомісткості (НВ), питомої поверхні ґрунту (S , m^2/g), діапазону активної вологи (ДАВ) та встановлення гранулометричного класу ґрунту за значеннями ВВ [10] для всіх інтервалів опробування обох ділянок (табл. 2).

Надзвичайно інформативними стали гідрофізичні випробування водоутримувальної здатності зразків ґрунту непорушеної структури (монолітів) у режимі отримання петлі капілярного гістерезису. В результаті випробувань одержані гідрофізичні функції водоутримувальної здатності $\theta = f(P)$ та вологопровідності $k_p = f(P)$ за перемінного вологонасичення ґрунту. Зокрема на основі використання гістерезису отримана кількісна характеристика структури порового простору ґрунтів, що по суті є диференціальною кривою розподілу пор за розмірами, яка є чутливою до епігенетичної еволюційної перебудови структури порового простору ґрунту за зміни інтенсивності гомеостатичних процесів, до яких призводять різні системи обробітку ґрунту [12, 13, 14]. Крім того, за аналізом кінетики десорбції ґрунту розроблений і проходить патентування оригінальний лабораторний спосіб визначення найменшої вологомісткості (НВ) [14], який був використаний для визначення цієї константи для досліджених зразків.

Порівняльний аналіз властивостей. Оцінку впливу довготривалого застосування різних агротехнологій на властивості ґрунтів

доцільно проводити за графічним аналізом епюр розподілу параметрів по глибині двох ґрунтових профілів. На рис. 1 побудовані такі епюри за значеннями параметрів, що наведені в табл. 1 та 2, які дають уяву як про профільну їхню мінливість, так і різницю між ділянками 11-річного використання оранки та no-till технологій. Зокрема закономірні відмінності природної вологості і щільності складення вже були розглянуті вище (рис. 1 а, б).

Профільний розподіл максимальної гігроскопічної вологості (МГ) засвідчує дещо відмінні гігроскопічні властивості ґрунтів між ділянками (рис. 1, в). Зокрема досить невеликі відмінності значень МГ суттєво посилюються в похідних розрахункових величинах: вологості в'янення (ВВ, %), де рекомендовано визначати $ВВ = 1,34 \cdot МГ$ та питомої поверхні S , m^2/g , де $S = 4 \cdot МГ$ [9] (рис. 1, г, е). Причини розбіжностей профільної мінливості між ділянками можуть бути інтерпретовані як просторова варіація дисперсності ґрунтів, зокрема вмісту високодисперсної органічної речовини (гумусу). Зростання дисперсності в підорному горизонті 0,25–0,40 м обох ділянок, що найпоказовіше відбиває величина питомої поверхні (S , m^2/g) (рис. 1.Е), найвірогідніше свідчить про наявність ілювіального процесу вмивання до цього горизонту високодисперсного матеріалу – мулу, глини, полуторних оксидів, органічних колоїдів тощо. Причому на ораній ділянці цей процес є більш інтенсивним, з більшою диференціацією властивостей ґрунтового профілю, принаймні за питомою поверхнею ґрунту (S), однак абсолютні значення S вищі на ділянці no-till по всіх інтервалах глибини, що, найвірогідніше,

2. Результати визначення водно-фізичних властивостей ґрунту на ділянках no-till та оранки

Номер зразка	Інтервал, м	Питома поверхня S , m^2/g	МГ, %, за масою	ВВ, %, за масою	ПВ, % за об'ємом	НВ, % за об'ємом	НВ, % за масою	ДАВ= ПВ-ВВ %	Гранулометричний клас ґрунту за ВВ [17]
no-till									
6	0,00–0,15	18,21	4,55	6,10	47,61	29,85	21,73	41,51	легкосуглинковий – середньосуглинковий
10	0,25–0,40	18,38	4,59	6,16	50,46	28,48	21,92	44,30	легкосуглинковий – середньосуглинковий
12	0,70–0,85	17,92	4,48	6,00	55,42	34,24	26,29	49,42	легкосуглинковий – середньосуглинковий
оранка									
48	0,00–0,15	16,54	4,14	5,54	51,58	26,44	20,10	46,04	легкосуглинковий – середньосуглинковий
53	0,25–0,40	17,84	4,46	5,98	50,96	29,22	20,87	44,98	легкосуглинковий – середньосуглинковий
80	0,70–0,85	17,13	4,28	5,74	52,49	33,84	25,26	46,75	легкосуглинковий – середньосуглинковий

пов'язане із сингенетичними чинниками. Спільний характер профільної мінливості $\rho_{пр}$, НВ та ПВ (рис. 1 б, д, ж) засвідчує зниження щільності складення та зростання значень НВ і ПВ на обох ділянках з наближенням до лесовидної материнської породи.

На рис. 2, 3 та 4 наведені попарно суміщені по трьох інтервалах криві водоутримувальної здатності $\theta_i = f(P)$, з урахуванням капілярного гістерезису, та графіки структурних характеристик, які становлять собою диференційні

криві розподілу сумарного об'єму пор за радіусами $V_{зп} = f(P) = f(r)$, адже за залежністю Жюрена капілярний тиск однозначно пов'язаний з радіусом пористості $r \approx \frac{0,15}{|P|}$ [см].

Аналіз розбіжностей цих графіків дає підставу для таких висновків:

– у першому інтервалі 0,00–0,15 м власне в оброблювальному шарі ґрунту криві водоутримувальної здатності суттєво відрізняються – похил кривої першої десорбції від ПВ на ділянці

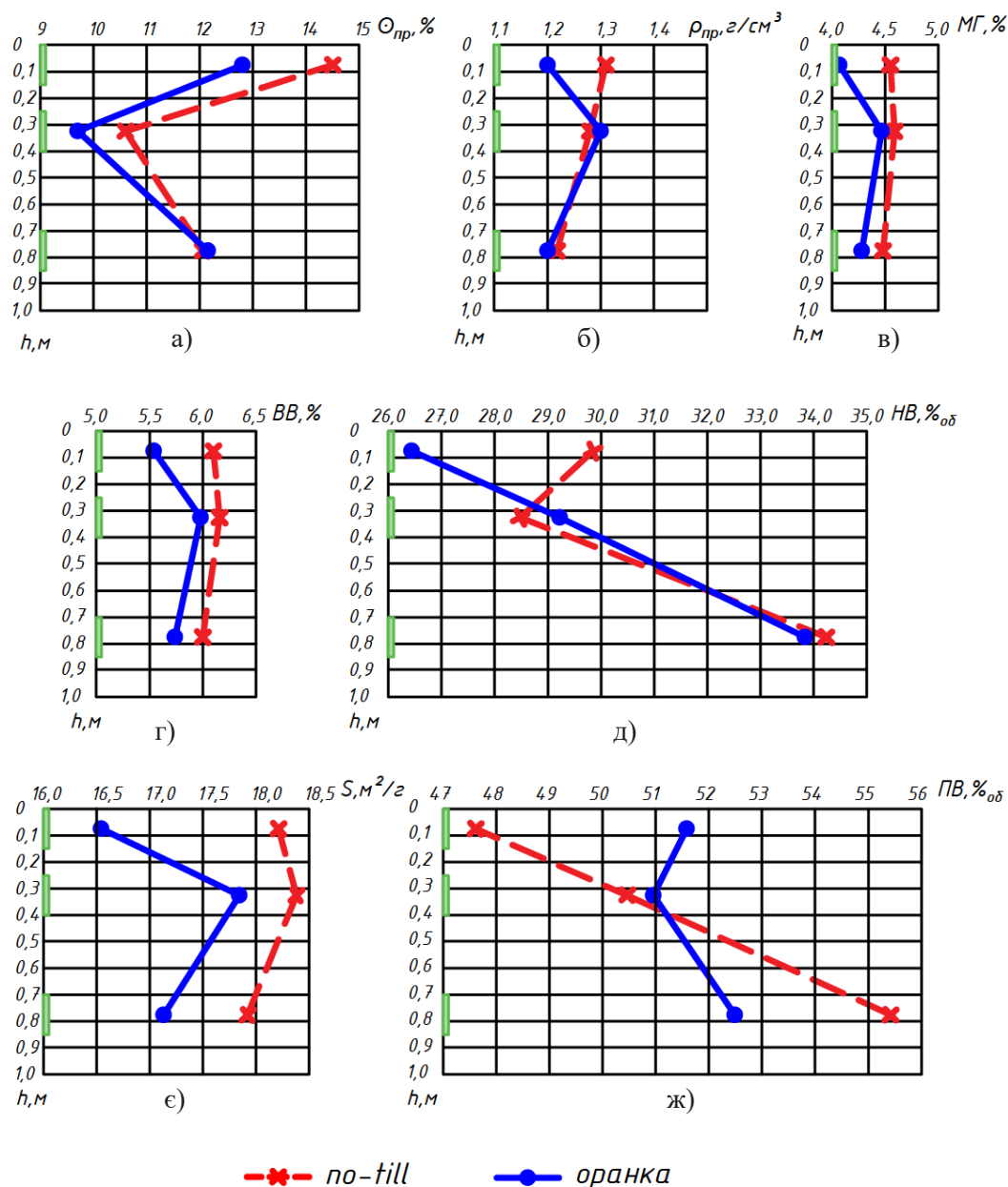


Рис. 1. Епюри розподілу по глибині ділянок оранки та no-till: природної вологості, $\theta_{пр}$, % (а); щільності складення, ρ , г/см³ (б); максимальної гігроскопічності, МГ, % (в); вологості в'янення, ВВ, % (г); найменшої вологомісткості, НВ, %_{об} (д); питомої поверхні, S, м²/г (е); повної вологомісткості, ПВ, %_{об} (ж)

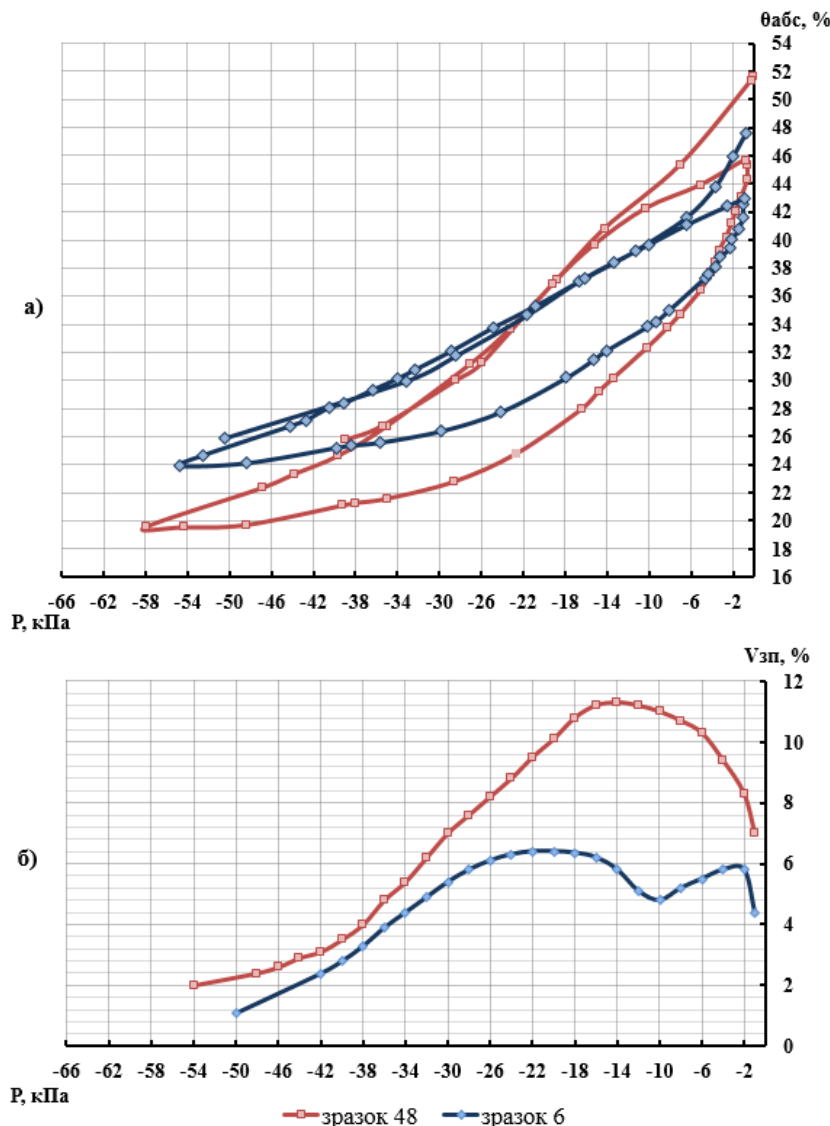


Рис. 2. Суміщені графіки водоутримувальної здатності $\theta_i = f(P)$ (а) та структурних характеристик $V_{\text{зн}} = f(P) = f(r)$ (б) для ділянок оранки (зразок 48) та no-till (зразок 6), інтервал 0,00–0,15 м

оранки більший, ніж на ділянці no-till (рис. 2 а). Так звана диференційна вологемкість на ділянці оранки, з урахуванням різниці ПВ, вища майже на 8 %, порівняно з ділянкою no-till, тобто на ораній ділянці ґрунт більше втрачає води при десорбції. Аналіз розбіжностей цих графіків дає підставу для таких висновків:

– у першому інтервалі 0,00–0,15 м власне в оброблювальному шарі ґрунту криві водоутримувальної здатності суттєво відрізняються – похил кривої першої десорбції від ПВ на ділянці оранки більший, ніж на ділянці no-till (рис. 2 а). Так звана диференційна вологемкість на ділянці оранки, з урахуванням різниці ПВ, вища майже на 8 %, порівняно з ділянкою no-till, тобто на ораній ділянці ґрунт більше втрачає води при десорбції.

Структура порового простору за графіками структурних характеристик $V_{\text{зн}} = f(P)$ також суттєво відрізняється. Зокрема на ораній ділянці структура порового простору ґрунту має максимум за значень капілярного тиску $-12 \div -16$ kPa . Це свідчить про те, що тут сформовані пори переважачого розміру ($\approx 1 \cdot 10^{-3}$ cm), сумарний об'єм яких перевищує 11 % об'єму ґрунту. Але одночасно простежується тенденція до зниження об'єму найкрупніших пор, більших за $1,5 \cdot 10^{-3}$ cm , яким відповідає тиск -10 kPa . Хоча для чорноземних ґрунтів характерна саме монотонно зростаюча крива структурної характеристики з максимальним розвитком найкрупніших пор і відсутністю пор переважного розміру [5]. У верхньому шарі ґрунту ділянки no-till,

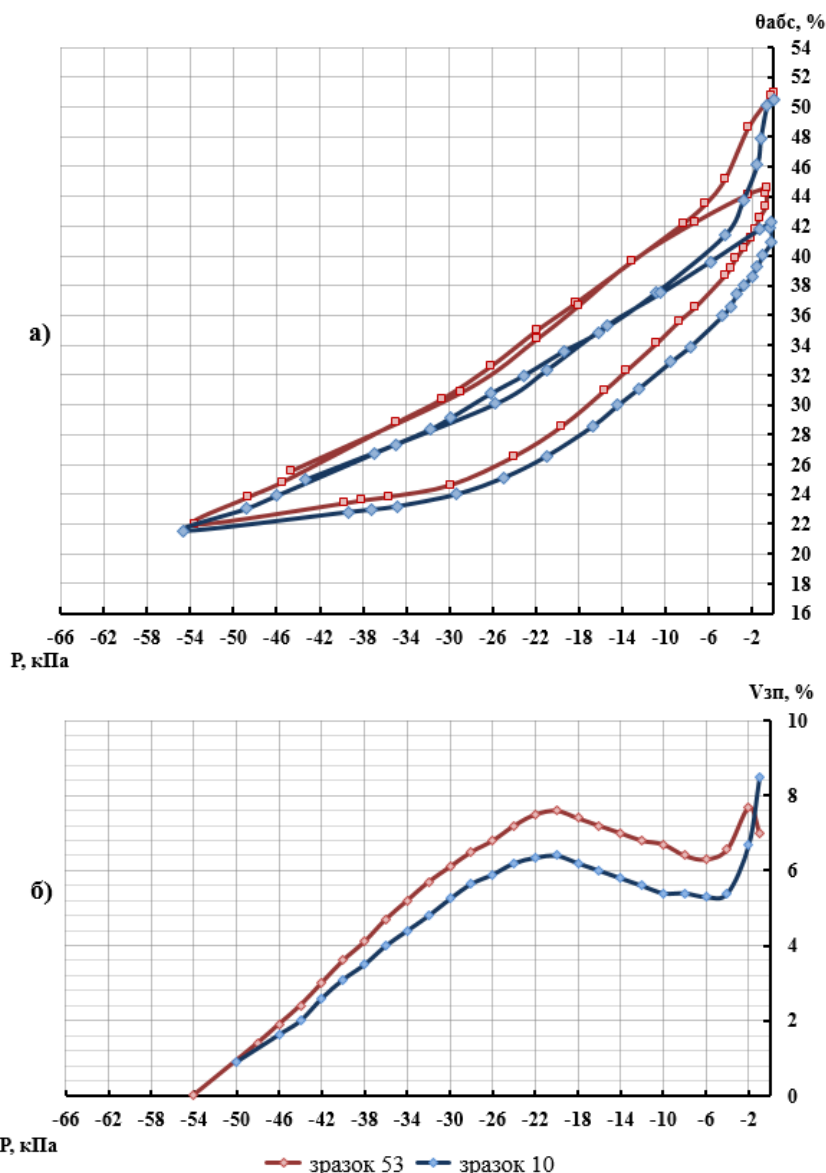


Рис. 3. Суміщені графіки водоутримувальної здатності $\theta_w = f(P)$ (а) та структурних характеристик $V_{zn} = f(P) = f(r)$ (б) для ділянок оранки (зразок 53) та no-till (зразок 10), інтервал 0,25–0,40 м

окрім різниці диференційної вологомісткості, значно менше розвинута мезопористість, яка має принципові відмінності структури від ґрунту на ділянці оранки: тут спостерігаються два екстремуми на кривій структурної характеристики – один у діапазоні мінус 18–24 кПа ($\approx 0,7 \cdot 10^{-3}$ см), а другий у діапазоні мінус 2–4 кПа ($\approx 5,0 \cdot 10^{-3}$ см). Перший екстремум найвірогідніше обумовлений первинною пористістю між пилюватими частками материнської лесовидної породи, сумарний об’єм яких трохи перевищує 6% об’єму ґрунту, а другий екстремум в області на порядок більших радіусів пор вже обумовлений епігенетичною перебудовою макропористої структури порового простору на ділянці no-till

при довготривалому (11 років) застосуванні прямого посіву в необроблений ґрунт і наближенні ґрунтових процесів, що обумовлені інтенсивністю гомеостатичних процесів, до нативних ґрунтів. Сумарний об’єм цих пор також вже сягає 6%;

– другий інтервал 0,25–0,40 м, власне підорний горизонт. Криві водоутримувальної здатності на обох ділянках близькі між собою (рис. 3 а), мають однакову диференційну вологомісткість, однак мають дещо відмінну структуру порового простору (рис. 3 б). Зокрема, за співпадіння екстремуму, тобто розміру переважаної пористості $\approx 0,7 \cdot 10^{-3}$ см (діапазон капілярного тиску $-18 \div -22$ кПа), на ділянці оранки сумарний об’єм пор більший на 2%.

При капілярному тиску меншому приблизно за -5 кПа починається розбудова структурної макропористості. На ділянці no-till сумарний об'єм макропор радіусом $15 \cdot 10^{-3}$ см (-1 кПа) сягає $8,5\%$, тоді як на ораній ділянці об'єм пор такого розміру не перевищує 7% . Тобто на ділянці оранки за більшого сумарного об'єму пор переважаючого розміру, $\approx 0,7 \cdot 10^{-3}$ см, є менше макропор ($15 \cdot 10^{-3}$ см), що мають радіус у двадцять разів більший, порівняно з розміром переважаючих пор. На ораній ділянці крива структурної характеристики завершується зниженням сумарного об'єму найкрупніших макропор, тоді як на ділянці no-till спостерігається монотонне збільшення об'єму макропор крупніших за $3 \cdot 10^{-3}$ см;

– третій інтервал $0,70-0,85$ м наближений до материнської породи, якою тут є лесовидний суглинок. Адже для чорноземних ґрунтів, утворених на лесовидних

суглинках, зазвичай характерне зменшення з глибиною щільності складення ґрунту (рис. 1 б) за епігенетичного перероблення ґрунтовими процесами макропористої лесовидної породи. Отже просторова варіабельність гідрофізичних властивостей на досліджуваних ділянках полягає в дещо більшій диференційній вологомості на $3-4\%$ на ділянці no-till, порівняно з оранкою (рис. 4). Структурні характеристики мають екстремум. На оранці переважаюча пористість має радіуси $\approx 0,6 \cdot 10^{-3}$ см, а на ділянці no-till дещо крупніша $\approx 1,0 \cdot 10^{-3}$ см. На ділянці no-till більш розвинута макропористість: об'єм пор $15 \cdot 10^{-3}$ см сягає 7% , а на оранці вона трохи менша за 6% .

Інтегрує усі описані розбіжності водоутримувальної здатності і структури порового простору між ділянками і по глибині їх ґрунтових профілів вологопровідність ненасиче-

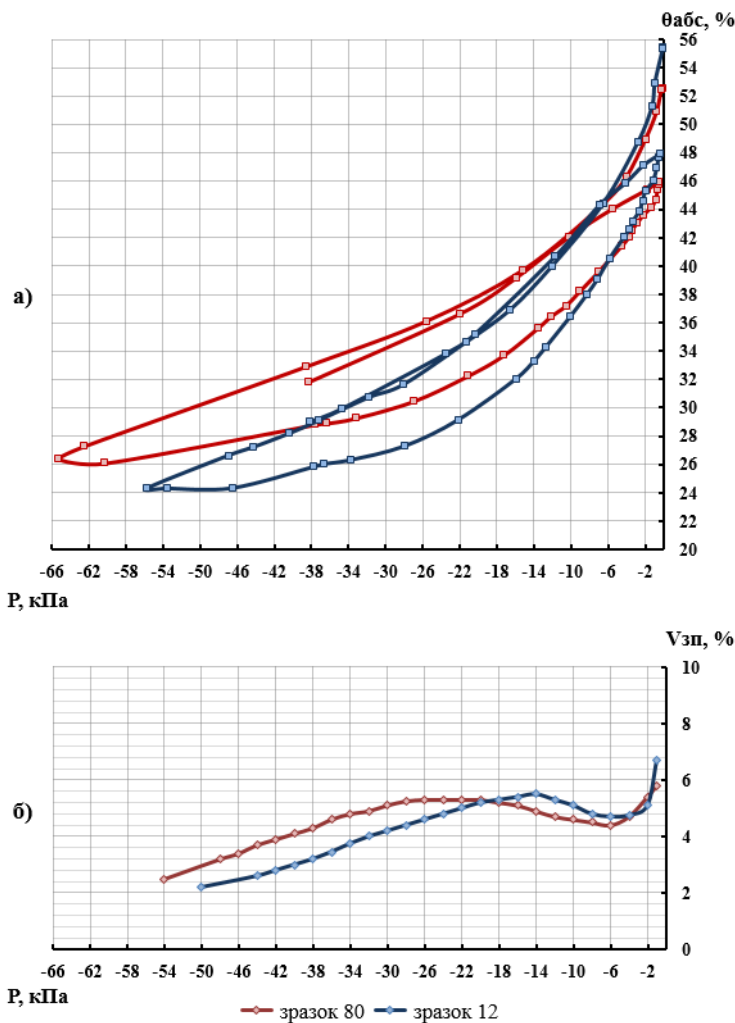


Рис. 4. Суміщені графіки водоутримувальної здатності $\theta_i = f(P)$ (а) та структурних характеристик $V_{zn} = f(P) = f(r)$ (б) для ділянок оранки (зразок 80) та no-till (зразок 12), інтервал $0,70-0,85$ м

ного ґрунту, результати визначення якої представлені в табл. 3.

Розраховані за методикою [14] коефіцієнти вологопровідності ненасиченого ґрунту дають уяву про профільну мінливість цього параметра на кожній досліджуваній ділянці і можливість кількісного порівняння вологопровідності різних ділянок між собою, а також опосередковано характеризувати вологопровідність кожної групи пор, яким відповідає фіксований капілярний тиск.

За отриманими даними зроблено такі висновки:

– по мірі осушення коефіцієнти вологопровідності монотонно знижуються на два порядки в діапазоні від $3,8 \cdot 10^{-2}$ до $6,4 \cdot 10^{-4}$ м/доб;

За отриманими даними зроблено такі висновки:

– по мірі осушення коефіцієнти вологопровідності монотонно знижуються на два порядки в діапазоні від $3,8 \cdot 10^{-2}$ до $6,4 \cdot 10^{-4}$ м/доб;

– на ораній ділянці з глибиною відбувається практично монотонне зниження вологопровідності для кожного значення капілярного тиску (рис. 5 а), однак на ділянці no-till найвищі значення вологопровідності для

3. Залежність вологопровідності ненасиченого ґрунту ($K_p, \frac{м}{доб}$) від капілярного тиску $K_p = f(P)$ для фіксованих значень P, кПа

Номер зразка	Інтервал, м	Капілярний тиск P, кПа					
		-3	-5	-10	-20	-30	-50
no-till							
6	0,00–0,15	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$8,8 \cdot 10^{-4}$
10	0,25–0,40	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$8,4 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$
12	0,70–0,85	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
оранка							
48	0,00–0,15	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$8,5 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
53	0,25–0,40	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$8,8 \cdot 10^{-4}$
80	0,70–0,85	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$

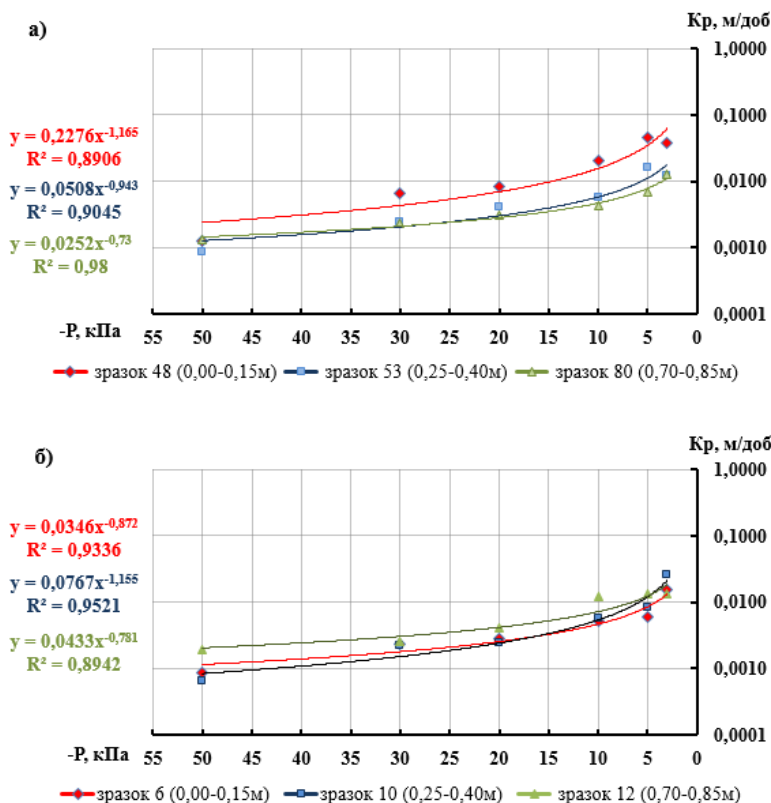


Рис. 5. Співвідношення вологопровідності ґрунту $K_p = f(P)$ по трьох інтервалах глибини ґрунтового профілю ділянок оранки (а) та no-till (б)

більшості значень капілярного тиску спостерігаються у найглибшому (0,70–0,85 м) інтервалі ґрунтового профілю (рис. 5 б);

– на ділянці no-till, по відношенню до оранки, спостерігається інверсія вологопровідності ґрунтового профілю: за одиничних вертикальних градієнтів потенціалу ($\text{Grad } H$) найглибший шар здатен забезпечити верхні шари ґрунтового профілю вологою і відвести інфільтрацію з них. Тоді як на ділянці з оранкою найнижчі значення вологопровідності в найглибшому горизонті обмежують інфільтрацію опадів до ґрунтових вод і одночасно не забезпечують капілярне підживлення з глибоких шарів ґрунтового профілю кореневого шару без суттєвого зростання вертикальних висхідних градієнтів потенціалу вологи. А таке зростання можливе лише за суттєвого переосушення орного шару ґрунту. На рис. 6 представлені для порівняння графіки вологопровідності для верхнього кореневого шару 0,00–0,15 м та найнижчого інтервалу 0,70–0,85 м, наближеного до материнської породи. Наведені графіки демонструють, що у верхньому інтервалі вологопровідність на

оранці майже на порядок вища за ділянку no-till (рис. 6). Тоді як для інтервалу 0,70–0,85 м абсолютні значення вологопровідності вищі на ділянці no-till, порівняно з оранкою.

Висновки. Проведені за новорозробленою системою лабораторного діагностування ґрунтів випробування дозволили встановити такі закономірні розбіжності властивостей ґрунтів між ділянками оранки та no-till:

– за значеннями МГ та питомої поверхні ґрунту (S , $\text{м}^2/\text{г}$) на ділянці no-till зафіксована порівняно вища дисперсність ґрунту по всьому ґрунтовому профілю, яка, найвірогідніше, носить характер сингенетичної просторової варіації;

– за водоутримувальною здатністю $\theta_i = f(P)$ встановлені певні розбіжності між ділянками, які полягають у різній диференційній вологомисткості та різній структурі порового простору ґрунтової матриці. Зокрема на ділянці оранки у всьому ґрунтовому профілі більшою мірою розвинута елементарна пористість $\approx 0,7 - 1,0 \cdot 10^{-3}$ см, яка переважає у структурі порового простору (СПП). Тоді як на ділянці no-till найбільш

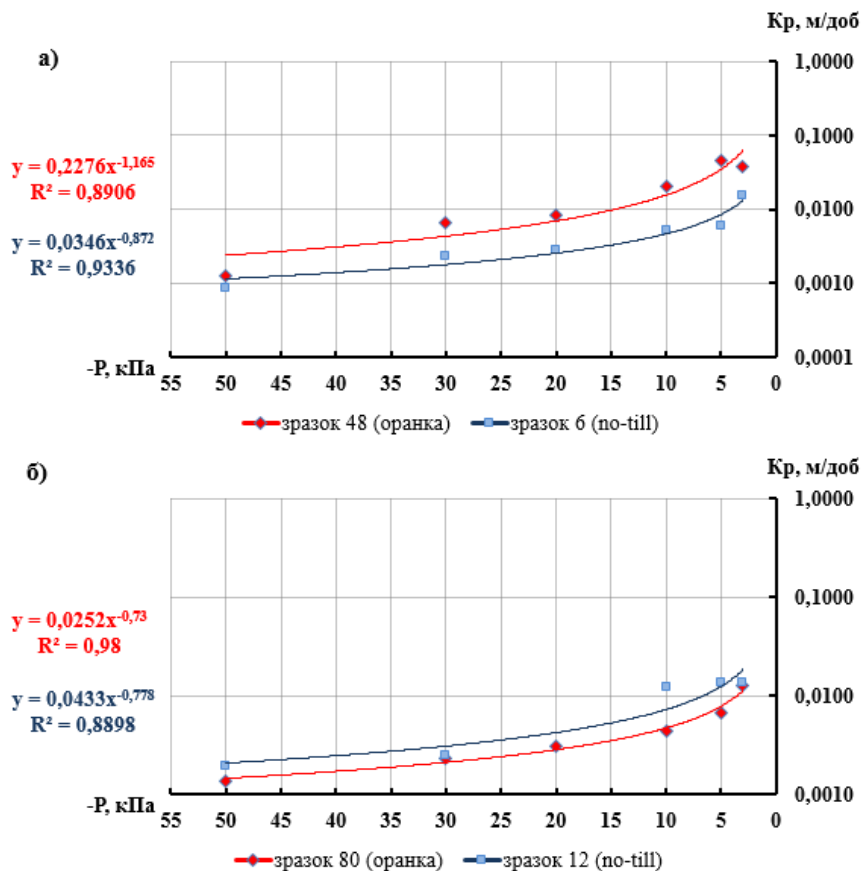


Рис. 6. Співвідношення вологопровідності ґрунту $K_p = f(P)$ ділянок оранки та no-till для інтервалів ґрунтового профілю 0,00–0,015 м (а) та 0,70–0,85 м (б)

розвинута, порівняно з оранкою, структурна макропористість, крупніша за $3,0 \cdot 10^{-3}$ см;

– за значеннями вологопровідності ненасиченого ґрунту $K_p = f(P)$, яка інтегрує розбіжності водоутримання ґрунтом вологи на ділянках оранки і no-till, встановлено інверсію вологопровідності по глибині ґрунтового профілю: на оранці найвищі значення вологопровідності зафіксовані в орному шарі, а найнижчі в інтервалі 0,70–0,85 м, тоді як на ділянці no-till найвищі значення вологопровідності ґрунту фіксуються у найнижчому горизонті, а з наближенням до поверхні вони знижуються. Абсолютні значення вологопровідності у верхньому горизонті на ділянці оранки є на порядок вищими, порівняно з ділянкою no-till, а у найглибшому горизонті порівняно вищими є значення вологопровідності на ділянці no-till;

– інверсія профільного розподілу вологопровідності на порівнюваних ділянках

має фундаментально важливе значення для гідрології полів, інфільтраційного живлення підземних вод і капілярного підживлення кореневої зони: на ділянці no-till профільний розподіл вологопровідності ґрунту є найбільш сприятливим для водного режиму ґрунту при вирощуванні сільськогосподарських культур;

– найвірогідніше саме це явище стало чинником підвищеної вологості кореневого шару ґрунту ділянки no-till на момент опробування.

Для підтвердження одержаних закономірностей дослідження за запропонованою методикою повинні мати продовження, які у подальшому стануть основою для розроблення програм моніторингу ґрунтів за водно-фізичними властивостями. Зокрема, вважаємо за доцільне проводити моніторинг властивостей ґрунту через кожні 2–3 роки в цьому стаціонарному досліді.

Бібліографія

1. Антропогенная и естественная эволюция почв и почвенного покрова / материалы (тезисы) Всесоюзного совещания 10–12 января 1989г. Москва : Пушино, 1989. 340 с.
2. Косолап М.П., Кротінов О.П. Система землеробства no-till : навч. посіб. Київ : «Лотос», 2011. 352 с.
3. Вплив нульового обробітку ґрунту на його фізичні властивості в Правобережному Лісостепу України / Петриченко В.Ф. та ін. *Агробіологія*. Біла Церква, 2013. № 11(104). С. 183–186.
4. Борона В.П., Задорожний В.С., Колодій С.В. Водно-фізичні властивості ґрунту та забур'яненість посівів кукурудзи залежно від систем основного обробітку ґрунту. *Корми і кормовиробництво*. Вінниця, 2013. № 75. С. 130–136.
5. Сидякіна О.В., Нижеголовенко А.В. Водно-фізичні властивості темно-каштанового ґрунту залежно від способів його обробітку під посівом гороху в умовах Південного Степу України. *Таврійський науковий вісник*. Херсон, 2012. № 81, С. 188–194.
6. Косолап М.П., Кротінов О.П. Зміна водно-фізичних властивостей чорнозему типового при переході до технологій no-till. Доповідь на міжнародній науково-практичній конференції з нагоди 100-річчя з дня народження проф. Городнього М.Г. Київ : НУБІПУ, 2004. № 75.
7. Hartge/Horn: Essential Soil Physics / Robert Horton, Rainer Horn, Jorg Bachmann, Stephan Peth. – Stuttgart, Germany : Schweizerbart Science Publishers, 2016. 391 p.
8. Медведев В.В. Плотность сложения почв. Харьков, 2004. 243 с.
9. Romashchenko M., Kolomiets S. Dynamic model of soil functioning and development // Wageningen Soil Conference 2015 «Soil Science in a Changing World» 23–27 August 2015, Wageningen The Netherlands, DRAFT BOOK of Abstracts. W wageningensoilconference E wageningensoilconference@wur.nl p.228
10. Коломієць С.С. Термодинамічна система ґрунту, його гомеостаз і вірогідний механізм утворення структури. *Вісник аграрної науки*. Київ, 2021. № 3. С. 14–22.
11. Вплив сучасних кліматичних змін на водні ресурси та сільськогосподарське виробництво / М.І. Ромащенко та ін. *Меліорація і водне господарство*. Київ, 2020. № 1. С. 5–22.
12. Коломієць С.С. Екологічна характеристика ґрунту. *Вісник аграрної науки*. Київ, 1999. № 12. С. 9–13.
13. Спосіб визначення структури порового простору ґрунтів (дисперсних середовищ) : Пат. 45287 Україна : МПК G01N15/08; заявл. 04.12.2008 : опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21. 4 с.
14. Ромащенко М.І., Коломієць С.С., Білоброва А.С. Система лабораторного діагностування водно-фізичних властивостей ґрунтів. *Меліорація і водне господарство* : Журнал. Київ, 2019. № 2. С. 199–208.

15. ГОСТ 28268-89 Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений. [Чинний від 1990-06-01]. Изд. офиц. Москва : Издательство стандартов, 1989. 10 с. (Межгосударственный стандарт).
16. Справочник гидрологических свойств почв Украинской ССР // Управление гидрологической службы УССР. Киевская гидрометеорологическая обсерватория. Ленинград : Гидрометеиздат, 1965. 550 с.
17. Вериго С.А., Разумова Л.А. Почвенная влага (применительно к запросам сельского хозяйства). Ленинград : Гидрометеиздат, 1973. 328 с.

References

1. Antropohennaya y estestvennaya evolyutsyya pochv y pochvennoho pokrova [Anthropogenic and natural evolution of soils and soil cover] (1989) / materyaly (tezysy) Vsesoyuznoho soveshchanyya. Moskva : Pushchyno, 340. [in Russian]
2. Kosolap, M.P., & Krotinov, O.P. (2011). Systema zemlerobstva no-till [No-till farming system]: navch. pos. Kyiv : «Lotos»,. 352. [in Russian]
3. Petrychenko, V.F., Kolisnyk, S.I., Panasyuk, O.Ya., Yermolayev, M.M., & Khakhula, V.S. (2013). Vplyv nul'ovoho obrobittku hruntu na yoho fizychni vlastyvyosti v Pravoberezhnomu Lisostepu Ukrayiny [Influence of zero tillage on its physical properties in the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine] Ahrobiolohiya. Bila Tserkva,. № 11(104), 183–186. [in Ukrainian]
4. Borona, V.P., Zadorozhnyy, V.S., & Kolodiy, S.V. (2013). Vodno-fizychni vlastyvyosti gruntu ta zabur'yanenist' posiviv kukurudzy zalezno vid system osnovnoho obrobittku gruntu [Water-physical properties of soil and weediness of corn crops depending on the systems of basic tillage]. Kormy i kormovyrobnytstvo. Vinnytsya, 75, 130–136. [in Ukrainian]
5. Sydyakina, O.V., & Nyzheholovenko, A.V. (2012). Vodno-fizychni vlastyvosti temno-kashtanovoho hruntu zalezno vid sposobiv yoho obrobittku pid posivom horokhu v umovakh Pivdennoho Stepu Ukrayiny [Water-physical properties of dark chestnut soil depending on the methods of its cultivation under pea sowing in the Southern Steppe of Ukraine]. Tavriys'kyi naukovyy visnyk. Kherson, 81, 188–194. [in Ukrainian]
6. Kosolap, M.P., & Krotinov, O.P. (2004). Zmina vodno-fizychnykh vlastyvostey chornozemu typovoho pry perekhodi do tekhnolohiy no-till [Changes in water-physical properties of typical chernozem during the transition to no-till technologies.]. Dopovid' na mizhnarodniy naukovy-praktychniy konferentsiyi z nahody 100-richchya z dnya narodzhennya prof. Horodn'oho M.H. Kyiv: NUBIPU, № 75. [in Ukrainian]
7. Hartge/Horn (2016). Essential Soil Physics /Robert Horton, Rainer Horn, Jorg Bachmann, Stephan Peth. Stuttgart, Germany : Schweizerbart Science Publishers, 391.
8. Medvedev, V.V. (2004). Plotnost' slozhenyya pochv [Density of soil]. Khar'kov,. 243. [in Russian]
9. Romashchenko, M., & Kolomiets, S. (2015) Dynamic model of soil functioning and development. Wageningen Soil Conference 2015 «Soil Science in a Changing World» 23–27 August 2015, Wageningen The Netherlands, DRAFT BOOK of Abstracts, 228.
10. Kolomiyets', S.S. (2021) Termodynamichna systema gruntu, yoho homeostaz i virohidnyy mekhanizm utvorenniya struktury [Thermodynamic system of soil, its homeostasis, and probable mechanism of structure formation]. Visnyk ahrarnoyi nauky. Kyiv, 3, 14–22. [in Ukrainian]
11. Romashchenko, M.I., Husyev, Yu.V., Shatkovs'kyi, A.P., Saydak, R.V., Yatsyuk, M.V., Shevchenko, A.M., & Matyash, T.V. (2020). Vplyv suchasnykh klimatychnykh zmin na vodni resursy ta sil's'kohospodars'ke vyrobnytstvo [Impact of climate change on water resources and agricultural production]. Melioratsiya i vodne hospodarstvo, 1, 5–22. [in Ukrainian]
12. Kolomiyets', S.S. (1999). Ekolohichna kharakterystyka gruntu [Ecological characteristics of the soil]. Visnyk ahrarnoyi nauky, 12, 9–13. [in Ukrainian].
13. Yatsyk, M.V., & Kolomiyets', S.S. (2009). Sposib vyznachennya struktury porovoho prostoru gruntiv (dyspersnykh seredovyshch) [Method for determination of structure of porous space of earths (disperse media)]. Patent of Ukraine. № 45287. [in Ukrainian]
14. Romashchenko, M.I., Kolomiyets', S.S., & Bilobrova, A.S. (2019). Systema laboratornoho diahnostuvannya vodno-fizychnykh vlastyvostey gruntiv [System of laboratory diagnostic for water-physical soil properties]. Melioratsiya i vodne hospodarstvo, 2, 199–208.
15. Pochvy. Metody opredeleniya vlazhnosti, maksymal'noy gigroskopicheskoy vlazhnosti y vlazhnosti ustoychyvoho zavyadannya rastenyy [The soil. Methods for determination of

moisture, maximum hygroscopic moisture and wilting moisture plants]. (1990). GOST 28268-89. Mezhhosudarstvennyi standart. Moskva : Yzdatel'stvo standartov. [in Russian]

16. Spravochnyk hydrolohicheskykh svoystv pochv Ukraynskoy SSR [Handbook of hydrological properties of the soils Ukrainian SSR]. (1965). Lenynhrad : Hydrometeoyzdat. [in Russian]

17. Veryho, S. A., & Razumova, L. A. (1973). Pochvennaya vlaha (prymenytel'no k zaprosam sel'skoho khozyaystva) [Soil moisture (as applied to agricultural needs)]. Lenynhrad : Hydrometeoyzdat. [in Russian]

С.С. Коломиец, А.С. Белоброва, В.М. Вирёвка, Т.В. Тарасенко
Сравнительный анализ профильной изменчивости воднофизических свойств чернозема при длительном применении пахоты и no-till технологий (на примере Панфильской исследовательской станции)

Аннотация. Приведены результаты актуальных исследований профильной изменчивости водно-физических свойств почв ненарушенной структуры на участках 11-летнего применения традиционной вспашки и no-till технологии. Сравнительные исследования проведены на базе стационарного полевого опыта на Панфильской опытной станции ННЦ «ИЗ НААН» с использованием созданной в ИВПиМ НААН системы лабораторного диагностирования водно-физических свойств на основе гидрофизических методов. Полученные для трех интервалов глубины основные гидрофизические функции – влагопроводности и водоудерживающей способности, а также гидрологические константы – максимальная гигроскопичность, влажность увядания, наименьшая влагоемкость, полная влагоемкость, удельная поверхность почвы и диапазон активной влажности. По результатам сравнения установлено, что на участке вспашки в почвах более развита мезопористость, а на участке no-till больше развита макропористость. Фундаментальным результатом является установление инверсионного типа профильного распределения влагопроводности ненасыщенной почвы: на участке no-till наивысшие значения влагопроводности наблюдаются в глубоком горизонте (0,70–0,85 м), уменьшаясь по мере приближения к поверхности почвы, а на участке вспашки наивысшие значения влагопроводности зафиксированы в обрабатываемом горизонте (0,00–0,15 м), которые закономерно снижались с глубиной. Профильное распределение влагопроводности на участке no-till способствует инфильтрационному питанию подземных вод и капиллярной подпитке корневого слоя почвы из глубоких горизонтов.

Ключевые слова: вспашка, no-till, грунтовая матрица, структура порового пространства, водоудерживающая способность, влагопроводимость почвы, инверсия влагопроводности

S.S. Kolomiets, A.S. Bilobrova, V.M. Vyr'ovka, T.V. Tarasenko
Comparative analysis of the profile variability of black soil water-physical properties when long-term applying plowing and no-till technologies use (the case of Panfily Research Station)

Abstract. The results of actual research on profile variability of soil water-physical properties of undisturbed structure at the plots, where traditional plowing and no-till technology have been applied for 11 years, are given. The comparative research was conducted based on a stationary field experiment, which is carried out at Panfily Research Station of the National Scientific Center "Institute of Agriculture NAAS" when applying a system of laboratory diagnostics of water-physical properties created in the Institute of Water Problems and Land Reclamation of NAAS based on hydrophysical methods. The characteristics of main hydrophysical functions, namely moisture conductivity and water holding capacity, as well as hydrological constants – maximum hygroscopic moisture, withering point, minimal water holding capacity, maximum water holding capacity, specific surface area and active moisture range were obtained for three different depths.

Based on the results of comparison, it was found that mesoporosity was more developed in the soil on the plots under plowing, while macroporosity was more developed on the no-till plots. The fundamental result is determining the inversion type of profile distribution of moisture conductivity in unsaturated soil. Thus, under on the no-till plots the highest values of moisture conductivity were observed in the deepest soil layer (0,70–0,85 m), decreasing to the soil surface, while on the plots under plowing the highest values of moisture conductivity were observed in cultivated soil layer (0,00–0,15 m), which naturally decreased in depth. The profile distribution of moisture conductivity on the no-till plots contributed to the infiltration supply of groundwater and capillary feeding of soil root layers from the deeper ones.

Keywords: plowing, no-till, soil matrix, pore space structure, water holding capacity, soil moisture conductivity, moisture conductivity inversion

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-292>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/292>

УДК 504.054;504.064.2;631.615

ВПЛИВ МУЛОВИХ ПОЛІВ БОРТНИЦЬКОЇ СТАНЦІЇ АЕРАЦІЇ НА ЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН ЗЕМЕЛЬНИХ І ВОДНИХ РЕСУРСІВ ПРИЛЕГЛИХ ТЕРИТОРІЙ

М.В. Яцюк¹, канд. геогр. наук, А.М. Шевченко², канд. с.-г. наук, Р.П. Боженко³,
С.М. Лютницький⁴

¹ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0002-5535-715X>; e-mail: mv_yatsiuk@ukr.net;

² Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0002-2637-6538>; e-mail: monitoring_protect@ukr.net;

³ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0003-3661-8120>; e-mail: ruslana_lp@ukr.net;

⁴ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0003-4343-0054>; e-mail: lutnizkii@ukr.net

Анотація. У статті висвітлено результати досліджень з оцінювання екологічного стану земель поблизу мулових полів №1 і №3 Бортницької станції аерації на території Золочівської сільської громади Бориспільського району Київської області. Підтверджено наявність у межах виокремлених поблизу мулових полів ділянок зафіксованого раніше підвищеного вмісту важких металів у ґрунтах, порівняно з фоновим, як за їх валовим вмістом, так і за вмістом рухомих форм. Для елементів – забруднювачів (Zn, Cu, Cr, Pb) по окремих точках у межах сільськогосподарських угідь зафіксовано перевищення значень їхнього валового вмісту та вмісту рухомих форм (Zn, Cu) гранично допустимих концентрацій в 1,1–6,2 і 1,1–2,6 рази відповідно. Усереднені значення вмісту важких металів для заплавної території (населений пункт) і сільськогосподарських угідь поблизу мулових полів свідчать про їх превалюючі величини для останніх практично за всіма елементами, а також про перевищення фонових значень і гранично допустимих концентрацій саме для земель, на які раніше вносили в якості добрив мулові відклади. У межах обстежених ділянок ґрунти класифікуються як незасолені та несолонцюваті, проте підвищений вміст обмінного магнію може сприяти впливувати на родючість ґрунту. Поблизу мулових полів спостерігаються підвищені мінералізація та вміст амонію і нітратів у ґрунтових водах, що очевидно пов'язано з впливом мулових вод і може спричинити погіршення якості підземних вод у зоні їхнього транзиту та розвантаження, зокрема в межах с. Гнідин. Площа земель з надзвичайно небезпечним рівнем забруднення за сумарним показником забруднення важкими металами становить близько 300 га, з небезпечним рівнем забруднення – 260 га, а орієнтовна величина шкоди від недоотримання врожаю може скласти 1,65 млн грн/рік і 0,3 млн грн/рік відповідно. У межах прилеглих до мулових полів територій має здійснюватися постійний контроль за станом ґрунтів, водних ресурсів, виробленої продукції та здоров'я населення, особливо за умов освоєння забруднених земель під сільськогосподарське використання чи житлову забудову.

Ключові слова: водно-екологічні ризики, ґрунти, ґрунтові води, забруднення, заплава, земельні ресурси, зрошувальна система, мулові поля

Актуальність дослідження. Екологічний стан земельних і водних ресурсів території значною мірою визначається якісним станом ґрунтів та оптимальністю параметрів показників їхньої родючості, а також якістю води. Важливу роль при цьому відіграють агрохімічні показники, фізико-хімічні властивості, показники забрудненості ґрунтів, ступінь їхньої засоленості та солонцюватості, які істотно визначають сучасний стан земельних ділянок і придатність їх використання як для проживання, так і для вирощування певних сільськогосподарських культур. Вагомими чинниками впливу на показники сучасного

стану ґрунтів й інші складові геоприродного середовища, зокрема поверхневі та підземні води, є техногенні об'єкти та пов'язана з ними антропогенна діяльність.

У Програмі охорони навколишнього природного середовища на території Золочівської сільської ради на 2021 рік зазначено, що екологічна ситуація в її межах характеризується нестабільністю показників унаслідок наявності в адміністративних межах сільської територіальної громади аварійних мулових полів та каналу відведення стічних вод Бортницької станції аерації (БСА), близького розташування Київського сміттєспа-

лювального заводу «Енергія» та Київської ТЕЦ. Враховуючи реальний стан довкілля, який сформувався, важливим пріоритетним завданням захисту навколишнього природного середовища на території Золочівської сільської громади програмою визначено проведення відповідних експертиз, що дадуть можливість зрозуміти реальну ситуацію із забрудненістю води, повітря та ґрунту.

Однією з найбільш актуальних та важливих екологічних проблем на території Золочівської сільської громади є розміщення в її межах мулових полів № 1 – № 3 БСА загальною площею 272,0 га. Нині мулові поля перевантажені осадами стічних вод (понад 10,0 млн м³), які тут накопичувались протягом кількох десятиліть та є значно забрудненими і створюють реальну загрозу для здоров'я населення та довкілля. Інтенсивне поліелементне забруднення мулів і мулових вод при потраплянні їх у ґрунти та інші компоненти природного середовища може спричинити забруднення останніх, насамперед, важкими металами.

Забруднення земель утруднює їхнє ефективне використання, погіршує умови життєдіяльності населення, а наявність переповнених осадами стічних вод мулових полів створює ризик, особливо за умов аварійних ситуацій, забруднення ґрунтів і вод на значних територіях. Досить небезпечною є загроза аварійного прориву дамб мулових полів. Небезпечним явищем у межах мулових полів, особливо № 3, яке виведене з експлуатації та перебуває у більш сухому стані, є загорання наявної там рослинності та торфоподібного мулу. У даному контексті досить важливим є оцінювання рівня забруднення ґрунтів і вод прилеглих до мулових полів земельних угідь, а також розмірів завданої ним шкоди.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Основними джерелами надходження забруднюючих речовин із мулових полів у навколишнє середовище можуть бути як мул, за умов його використання в якості органічних добрив на сільськогосподарських угіддях, так і мулові води, інфільтрація яких може спричинити забруднення порід зони аерації та ґрунтових вод. З 1985 р., коли в осаді стічних вод БСА було виявлено перевищення допустимого вмісту важких металів, Бориспільська санепідемстанція заборонила вивозити його з мулових полів та застосовувати як добриво, що до цього практикувалося в районі. Водночас актуальність встановлення можливих негативних наслідків використання мулів стічних вод і масштабів

їх прояву зумовила необхідність проведення спеціалізованих досліджень. Низку таких комплексних еколого-геохімічних досліджень щодо оцінювання забруднення геологічного середовища в районі мулових полів БСА проведено фахівцями ВГО «Північгеологія» (нині ДП «Українська геологічна компанія»). Результати досліджень викладено в публікаціях дослідників і науковців Українського науково-виробничого центру геохімічних досліджень ДП «Українська геологічна компанія» та Інституту геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України [1–4].

Результати еколого-геохімічних досліджень на території Бориспільського району засвідчили, що використання мулів стічних вод м. Київ в якості органічних добрив призвело до забруднення важкими металами сільськогосподарських земель цього району ще в кінці 70-х років минулого сторіччя. Найбільш інтенсивне забруднення ґрунтів спостерігалось на сільськогосподарських угіддях поблизу мулових полів БСА. Геохімічними, зокрема й моніторинговими дослідженнями, проведеними у 1995р., 2011–2012 рр. і пізніше [1–4] у межах території так званої ділянки Гнідин, що включала мулові поля №№ 1–3 і прилеглі до них землі між селами Гнідин, Вишеньки, Проців, Ревне, Мартусівка, Щасливе, встановлено, що мули мулових полів забруднені Ag, Cd, Hg, Sn, Cr, Cu, Pb, Zn, Ba та іншими елементами, більшість яких належить до I та II класів небезпеки. Виділені за результатами еколого-геохімічного картування ґрунтів масштабу 1:100 000 в 1995 р. поліелементні геохімічні аномалії різної інтенсивності були приурочені переважно до земель сільськогосподарського використання, а епіцентри найбільших з них оконтурювали мулові поля. Основними елементами цих аномалій були Ag, Hg, Cr, Zn, Cu, Pb, Sn. За результатами моніторингових геохімічних досліджень та повторного еколого-геохімічного картування ґрунтів ділянки Гнідин у 2011 р. дослідниками зроблено логічний висновок, що з 1995 р. по 2011 р. геохімічний склад забруднення ґрунтів та рівень концентрації основних елементів забруднення (Ag, Cd, Hg) у межах виділених аномалій практично не змінився. При цьому змінились конфігурація та площа полів забруднення, тобто природного самоочищення ґрунтів від важких металів в цих агроландшафтах практично не відбувається, або проходить воно надзвичайно повільно [1].

Результати моніторингових гідрохімічних досліджень ділянки Гнідин дали підстави їх

виконавцям стверджувати, що екологічний стан ґрунтових вод біля мулових полів є стабільним [1]. Мулові поля ділянки мають переважно хорошу гідроізоляцію дниць і тому мінімально впливають на якість ґрунтових вод. Водночас визначено, що індикатором забруднення, спричиненого муловими водами в ґрунтових і поверхневих водах ділянки робіт, можна вважати гідрохімічну асоціацію: фосфати–амоній–нітри. Крім цих хімічних сполук у ґрунтових водах біля мулових полів № 1 та № 3 встановлені підвищені концентрації Pb і Zn, які в 3–10 разів перевищують їх фонові рівні в регіоні.

Отже, результати проведених раніше досліджень свідчать про погіршення загального екологічного стану земельних ресурсів у районі розташування мулових полів БСА через забруднення ґрунтів, що може, за певних умов, негативно впливати на водні ресурси, а також істотно ускладнює використання сільськогосподарських земель за їх цільовим призначенням без застосування необхідних агро меліоративних, агротехнічних та інших заходів із детоксикації ґрунту.

Мета досліджень – оцінювання екологічного стану прилеглих до мулових полів № 1 і №3 Бортницької станції аерації територій Золочівської сільської громади та можливих збитків, зумовлених їх забрудненням.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження базувались на аналізі наявної інформації щодо геоморфологічних, гідрологічних, ґрунтових і гідрологічних умов території, аналітичному огляді раніше проведених еколого-геохімічних досліджень, натурному візуальному обстеженні території з відбором зразків ґрунту і проб води для лабораторних аналізів, оцінюванні умов і рівня забруднення земельних угідь поблизу мулових полів і в межах територій, потенційно пов'язаних з їхнім впливом, зокрема і в с. Гнідин.

Зразки ґрунту відбирали на сільськогосподарських землях (поля, селітебні території) до глибини 25 см та в природних і напівприродних ландшафтах (луки, ліс, пустирі) до глибини 10 см із використанням існуючих рекомендацій [5–7]. Проби води відібрано з поверхневих водних об'єктів (р. Пріра в західній частині с. Гнідин, ставок на східній околиці села в його притерасній частині) та з піщаного кар'єру поблизу мулових полів № 3.

Для визначення еколого-геохімічного стану ґрунтового покриву та еколого-геохімічного оцінювання їхнього забруднення важкими металами використано такі параметри: C_b – вміст валових форм, C_p – вміст рухомих форм,

C_ϕ – фоновий вміст валових і рухомих форм; $Kk_{(ГДК)}$ – коефіцієнт концентрації відносно ГДК або коефіцієнт небезпеки; $Kk(\text{фон})$ – коефіцієнт концентрації відносно фонового вмісту; $Sp(\%)$ – коефіцієнт рухомості важких металів, який характеризує відсоткове відношення вмісту рухомих форм до валового вмісту, а також сумарний показник забруднення (СПЗ або Z_c , $Z_c = \sum C_i / C_\phi - (n - 1)$) [8].

У розрахунках для дослідженої території використано дані щодо значень фонового валового вмісту і рухомих форм важких металів, які застосовували автори попередніх геохімічних досліджень у районі робіт [4] (для забезпечення коректності порівнянь різночасових результатів), а також наведені в низці наукових публікацій [5, 6, 9–16].

Загальна характеристика геопрродних умов території досліджень. До ділянки досліджень можливого впливу мулових полів БСА на екологічний стан ґрунтового покриву і водних об'єктів належать як безпосередньо прилегли до них сільськогосподарські угіддя, так і територія села Гнідин. Мулові поля № 1 (загальна площа 83,4 га, площа мулових карт – 54,95 га) і № 3 (площа загальна – 106,9 га, мулових карт – 80,85 га), що призначені для зневоднення та утилізації мулового осаду, який надходить із БСА, розташовані північно-західніше с. Гнідин на відстані від 1,5 км до 2,0 км.

У геоморфологічному відношенні територія розташування ділянки досліджень приурочена до долини річки Дніпро, основними геоморфологічними елементами рельєфу якої є заплава і третя надзаплавна тераса. Річкова заплава, де розташована переважна частина села, морфологічно представлена значно нижчим рівнем порівняно з надзапавною терасою. Тут збереглося багато заплавних озер і природніх водотоків, частина з яких каналізована. Третя надзаплавна тераса р. Дніпро, у межах якої розташовані мулові поля та сільськогосподарські угіддя, на яких було побудовано Бортницьку зрошувальну систему та використовувався в якості органічних добрив мул, відповідає високому гіпсометричному рівню з абсолютними відмітками поверхні 130–140 м.

У межах заплави р. Дніпро приповерхнева товща порід складена голоценовими алювіальними відкладами, які залягають на палеогенових і представлені пісками різнозернистими з прошарками мулу, торфу, суглинків і супісків (у верхній частині) різних фаціальних різновидів потужністю 15–25 м. Ґрунтові води в алювіальних відкладах залягають на глибині

від 0,5 м до 2,0–3,0 м. Живлення водоносного горизонту здійснюється за використання атмосферних опадів, інших водоносних горизонтів, зокрема притоку з боку тераси з нищезалягаючих горизонтів. Води горизонту прісні, переважно гідрокарбонатні кальцієві.

Третя надзаплавна тераса складена товщею, переважно піщаною, середньонеоплейстоценового алювію, перекритого з поверхні елювіально-делювіально-еоловими піщаними відкладами та лесовидними суглинками і супісками. Алювіальні піски є першими від поверхні заводненими відкладами на території надзапавної тераси. Води безнапірні, глибина їхнього залягання коливається в межах від 12,0 м до 30,0 м із напрямом потоку ґрунтових вод у бік заплави. Мінералізація води зазвичай не перевищує 1,0 г/дм³, у хімічному складі переважають гідрокарбонат-аніони та катіони кальцію і магнію.

Ґрунтовий покрив території ділянки досліджень у межах надзапавної тераси представлено переважно дерново-підзолистими піщаними і глинисто-піщаними, світло-сірими та сірими опідзоленими супіщаними і легкосуглинковими ґрунтами на давньоалювіальних і лесових породах. На заплаві поширені лучні, дернові оглеєні супіщані в поєднанні з лучно-болотними і торфво-болотними ґрунтами на сучасних алювіальних відкладах.

Крім річки Дніпро, поверхневими водними об'єктами в адміністративних межах громади є р. Прірва, численні протоки, заплавні озера (Ревочі, Островки, Плоске, Піщане та ін.), викопні та руслові ставки, меліоративні осушувальні і зрошувальні канали, а також скидний канал БСА.

Результати дослідження та їх обговорення. *Оцінка впливу мулових полів на екологічний стан земельних ресурсів і вод на території Золочівської сільської ради.* Найбільш істотний негативний вплив мулових полів БСА на екологічний стан земельних ресурсів пов'язаний, насамперед, із забрудненням ґрунтів важкими металами через використання мулів на сільськогосподарських землях, а також можливість інших несприятливих проявів ґрунтово-деградаційних процесів, спричинених наявністю та функціонуванням мулових полів. Тому необхідно актуалізувати дані щодо рівня забрудненості окремих територій раніше досліджених площ сільської ради, а також ділянок у межах села Гнідин, зокрема новоосвоюваних під житлову забудову. Потрібно оцінювати як показники забрудненості ґрунтів, так і їхні агрохімічні та фізико-хімічні властивості, ступінь засоле-

ності та солонцюватості, які істотно визначають сучасний стан земельних ділянок та їхню придатність як для проживання, так і для вирощування певних сільськогосподарських культур.

Визначено, що за гранулометричним складом приповерхнева товща ґрунтів представлена переважно піщано-супіщаними різновидами, рідше суглинками легкими, у межах заплави заторфованими. Ґрунти легкого механічного складу є відносно добре водопроникними, менш схильними до засолення й осолонцювання та забруднення, але більш потенційно уразливими щодо розмивання (ерозії) та винесення з них поживних речовин, особливо на схилених територіях.

За реакцією ґрунтового розчину випробувані ґрунти як у межах заплавних земель, так і на терасі, можуть бути віднесені до нейтральних або близьких до таких (рН від 6,3 до 7,2). Вміст гумусу у випробуваних дерново-підзолистих ясно-сірих і сірих опідзолених ґрунтах прилеглих до мулових полів земель низький (1,1–2,0%) [17]. Для заплавних ґрунтів характерні вищі значення вмісту гумусу (від підвищеного до дуже високого).

Практично по всіх точках випробування ґрунти характеризуються низьким вмістом сполук рухомого калію (до 80 мг/кг K₂O за методом Кірсанова [17]). Найкраще обстежені ґрунти забезпечені рухомим фосфором: вміст його від середнього (P₂O₅ 51 – 100 мг/кг) до дуже високого (P₂O₅ більше 250 мг/кг) у межах сільськогосподарських земель на терасі за оптимальних значень 150–200 мг/кг.

За результатами дослідження вмісту легкорозчинних солей у ґрунтовій приповерхневій товщі як заплавні, так і плакорні ґрунти в межах обстежених ділянок класифікуються, згідно з [18], як незасолені, причому як за сумою всіх легкорозчинних солей, так і за вмістом токсичних солей. Орний шар ґрунту на сільськогосподарських землях у районі мулових полів характеризується загалом невисоким вмістом солей (від 0,009% до 0,027%), зокрема токсичних (від 0,004% до 0,016%). На території заплави в межах населеного пункту з поверхні ґрунтовий шар містить трохи більшу кількість легкорозчинних солей: від 0,016% до 0,093% (загальна кількість) і від 0,005% до 0,053% (токсичні солі).

Сума обмінних катіонів у шарі 0–25 см або 0–10 см коливається по площі земельної ділянки від 3,8 мекв/100 г ґрунту до 26,5 мекв/100 г ґрунту. Серед обмінних катіонів обстежених ґрунтів на всіх полях земельного масиву домінує увібраний кальцій, частка

якого складає від 59,8% до 86,6% від суми всіх катіонів. За вмістом увібраного натрію (до 0,43% від ємності поглинання) основні типи ґрунтів на дослідженій ділянці є несолонцюватими. Те ж саме стосується і можливої вторинної (іригаційної) солонцюватості раніше зрошуваних ґрунтів [19]. Водночас слід врахувати, що підвищений вміст обмінного магнію (понад 20% від ємності ґрунтового вбирного комплексу), що відмічено на понад половині точок випробування ґрунту, за окремими підходами [20], може несприятливо впливати на родючість ґрунту.

Результати розрахунків основних показників екологічного стану ґрунтового покриву території досліджень щодо її забруднення важкими металами за точками випробування наведено в таблиці 1. Значення розрахункових показників у межах сільськогосподарських земель поблизу мулових полів підтверджують виявлену раніше загальну тенденцію щодо підвищеного вмісту низки важких металів, які входять до геохімічної асоціації основних елементів забруднення мулів стічних вод (Zn, Cd, Hg, Cr, Cu, Pb).

Так, зокрема, коефіцієнт перевищення концентрації валового вмісту цинку над фоновим значенням у ґрунтах району робіт по окремих точках змінюється від 1,12 до 3,10 за величини $K_{k(\text{фон})}$ 0,17–3,10, причому перевищення фоновому валового вмісту зафіксовано лише в точках на сільськогосподарських угіддях, які раніше удобрювалися мулом. Те ж саме стосується і міді, по якій коефіцієнт перевищення над фоном для валового вмісту по більшості точок випробування більше 1,0 (1,6–4,5). Ще більша кількість перевищень фону в межах оброблюваних раніше земель терасового агроландшафту характерна для кадмію, свинцю (шість із семи точок) і для хрому (по всіх семи точках), причому по двох останніх елементах незначне перевищення фонових значень валового вмісту зафіксовано і на заплавної території (точки 3, 4 – по Pb і Cr).

Перевищення фону, іноді досить суттєве, фіксується по точках випробувань і за вмістом рухомих форм важких металів, зокрема Fe, Zn, Cu, Cr, Cd, меншою мірою Mn, Pb, Ni, хоча в цьому випадку проблемним є питання визначення фоновому вмісту. Вищі значення, зокрема й аномальні, $K_{k(\text{рух})}$ характерні для терасової частини території досліджень, за виключенням заліза, вміст рухомих форм якого у межах заплави значно більший, що пов'язано з природними умовами і гідроморфним режимом формування ґрунтів на територіях, які періодично зазнають затоплення.

Для деяких елементів (Zn, Cu, Cr, Pb) по окремих точках у межах сільськогосподарських угідь у районі розташування мулових полів зафіксовано перевищення значень їхнього валового вмісту, а також вмісту рухомих форм (Zn, Cu) величин гранично допустимих концентрацій. Коефіцієнт концентрації відносно ГДК або коефіцієнт екологічної небезпеки $K_{k(\text{ГДК})}$ за валовим вмістом Zn на ділянках терасової рівнини становить 0,2–1,9 (на заплаві 0,1–0,4), а за вмістом рухомих форм – 0,03–2,63 і 0,03–0,25 відповідно. Коефіцієнт перевищення ГДК по міді за валовим вмістом становить 1,1–1,6, а за рухомими формами – 3,0–6,2. Валовий вміст свинцю перевищує ГДК даного елемента в 1,1–1,2 рази в трьох точках, а хрому – у п'яти точках із семи – в 1,2–2,6 рази.

Усереднені значення вмісту важких металів і розрахункові показники за ними для заплавної території і сільськогосподарських угідь поблизу мулових полів свідчать про їх превалюючі величини для останніх практично за всіма елементами, окрім Fe і Mn (рухомі форми), а також про перевищення фонових значень і ГДК узагальнено теж лише для площ, що раніше зазнали забруднень муловими відкладами. Так, усереднений коефіцієнт перевищення концентрації відносно фоновому вмісту $K_{k(\text{фон})}$ за валовими формами становить для Zn–1,43, Pb–1,78, Cu–2,14, Cr–3,28, Cd–5,33. Перевищення значень ГДК за валовим вмістом фіксується для міді ($K_{k(\text{ГДК}) \text{ Cu}}=1,34$) і хрому ($K_{k(\text{ГДК}) \text{ Cr}}=1,64$), а за рухомими формами для цинку ($K_{k(\text{ГДК})}=1,37$) і міді ($K_{k(\text{ГДК})}=3,28$), тобто за основними елементами – забруднювачами мулів.

У контексті поділу ґрунтів за ступенем забруднення важкими металами, згідно з існуючими класифікаціями [17, 20–22], за валовим вмістом важких металів до слабозабруднених (вміст елемента-токсиканта не перевищує ГДК, але вищий за природний фон) можна віднести ґрунти в точках 8 (за Zn, Cd, Pb, Cu), 9 – за Cd, 10 – за Cr, 11 – за Cr, Cd, Pb, 12 – за Pb, Cd, Cu, 13 і 14 – за Cd, до середньозабруднених (перевищення ГДК в 1–3 рази) – у точках 8 – за Cr, 9 – за Zn, Pb, Cu, Cr, 13 – за Zn, Pb, Cu, Cr і 14 – за Zn, Pb, Cu, Cr.

Слід зазначити, що згідно з [14] виділяють різні рівні забруднення залежно від перевищення валового вмісту важких металів фонових значень: від слабого (1–2 фони) до дуже високого (перевищення фону в сім і більше разів). За таким підходом, наприклад за Zn слабкий рівень забруднення відмічено в точках 8, 13, 14,

1. Геохімічні показники ступеня забруднення приповерхневого шару ґрунтів важкими металами в межах ділянок досліджень на території Золочівської сільської ради

Хімічний елемент	Геохімічні показники	Номер точки випробування													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	C _{вр} , мг/кг	27,0	10,0	39,0	38,0	17,0	11,0	13,0	67,0	186,0	18,0	44,0	57,0	113,0	114,0
	C _{рр} , мг/кг	5,85	1,78	2,23	0,74	1,99	3,95	30,3	0,94	60,6	0,75	8,93	32,4	50,3	37,1
Zn	C _{рр} , %	21,7	17,8	5,7	1,90	11,7	35,9	7,2	45,2	32,6	4,20	20,3	56,8	44,5	32,5
	K _к (фон)	0,45	0,17	0,65	0,63	0,28	0,18	0,22	1,12	3,10	0,30	0,73	0,95	1,88	1,90
	K _к _{вн} (ГДК)	0,27	0,10	0,39	0,38	0,17	0,11	0,13	0,67	1,86	0,18	0,44	0,57	1,13	1,14
Pb	K _к _р (ГДК)	0,25	0,08	0,10	0,03	0,09	0,17	0,04	1,32	2,63	0,03	0,39	1,41	2,19	1,61
	C _{вр} , мг/кг	8,0	<4,0	10,0	16,0	13,0	<4,0	8,0	25,0	38,0	11,0	21,0	20,0	34,0	38,0
	C _{рр} , мг/кг	0,44	0,07	0,27	0,11	0,06	0,01	0,36	0,64	0,53	0,18	0,11	0,40	0,40	0,83
	C _{рр} , %	5,50	<1,75	2,70	0,69	0,46	<0,25	4,50	2,56	1,39	1,64	0,52	2,00	1,18	2,18
	K _к (фон)	0,53	<0,27	0,67	1,07	0,87	<0,27	0,53	1,67	2,53	0,73	1,40	1,33	2,27	2,53
	K _к _{вн} (ГДК)	0,25	<0,13	0,31	0,50	0,41	<0,13	0,25	0,78	1,19	0,34	0,65	0,62	1,06	1,19
	K _к _р (ГДК)	0,07	0,01	0,04	0,02	0,01	0,002	0,06	0,11	0,09	0,03	0,02	0,07	0,07	0,14
	C _{вр} , мг/кг	<8,0	<8,0	11,0	<8,0	<8,0	<8,0	<8,0	46,0	90,0	12,0	17,0	32,0	57,0	76,0
	C _{рр} , мг/кг	0,32	0,18	0,27	0,22	0,21	0,26	0,30	9,52	15,1	0,34	1,66	9,02	18,7	14,6
Cu	C _{рр} , %	<4,0	<2,25	2,45	<2,75	<2,62	<3,25	<3,75	20,7	16,78	2,83	9,76	28,19	32,80	19,21
	K _к (фон)	<0,40	<0,40	0,55	<0,40	<0,40	<0,40	<0,40	2,30	4,50	0,60	0,85	1,60	2,85	3,80
	K _к _{вн} (ГДК)	<0,14	<0,14	0,20	<0,14	<0,14	<0,14	<0,14	0,84	1,64	0,22	0,31	0,58	1,04	1,38
	K _к _р (ГДК)	0,11	0,07	0,09	0,07	0,07	0,09	0,1	3,17	5,03	0,11	0,55	3,01	6,23	4,87
	C _{вр} , мг/кг	37,0	22,0	61,0	82,0	44,0	38,0	39,0	164,0	265,0	59,0	96,0	116,0	206,0	243,0
	C _{рр} , мг/кг	0,26	0,09	0,80	0,42	0,37	0,31	0,16	4,56	4,67	0,33	0,55	4,28	4,49	4,72
Cr	C _{рр} , %	0,70	0,41	1,31	0,51	0,84	0,82	0,41	2,78	1,76	0,56	0,57	3,69	2,18	1,94
	K _к (фон)	0,70	0,44	1,22	1,64	0,88	0,76	0,78	3,28	5,30	1,18	1,92	2,32	4,12	4,86
	K _к _{вн} (ГДК)	0,37	0,22	0,61	0,82	0,44	0,38	0,39	1,64	2,65	0,59	0,9	1,16	2,06	2,43
	K _к _р (ГДК)	0,04	0,02	0,13	0,07	0,06	0,05	0,03	0,76	0,78	0,05	0,09	0,71	0,75	0,77

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Cd	Св*, мг/кг	0,12	0,07	0,25	0,46	0,30	0,10	0,07	2,00	2,00	0,20	1,30	2,00	2,00	1,90
	Ср, мг/кг	0,012	0,007	0,025	0,046	0,029	0,010	0,007	0,393	0,390	0,040	0,268	0,392	0,390	0,385
	Ср*, %	12	10	10	10	10	10	10	20	20	20	20	20	20	20
	Кк*(фон)	0,40	0,23	0,83	1,53	1,00	0,33	0,23	6,67	6,67	0,67	4,30	6,67	6,67	6,67
Ni	Ккв*(ГДК)	0,04	0,02	0,08	0,15	0,10	0,03	0,02	0,67	0,67	0,07	0,43	0,67	0,67	0,63
	Ккр(ГДК)	0,02	0,01	0,04	0,08	0,05	0,02	0,01	0,5	0,65	0,067	0,45	0,65	0,65	0,64
	Св, мг/кг	< 8,0	12,0	< 8,0	< 8,0	< 8,0	< 8,0	10,0	< 8,0	22,0	< 8,0	< 8,0	< 8,0	< 8,0	12,0
	Ср, мг/кг	0,28	0,16	0,67	0,51	0,28	0,14	0,21	1,92	1,92	0,42	1,04	2,29	3,60	3,24
Co	Ср, %	< 3,5	1,33	< 8,38	< 6,38	< 3,5	< 1,75	2,1	< 24,0	13,54	< 5,25	< 13,0	< 16,12	< 45,0	27,0
	Кк(фон)	< 0,40	0,60	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40	0,50	< 0,40	1,10	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40	0,6
	Ккв(ГДК)	< 0,12	0,18	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12	0,15	< 0,12	0,34	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12	0,18
	Ккр(ГДК)	0,07	0,04	0,17	0,13	0,07	0,04	0,05	0,48	0,50	0,11	0,26	0,57	0,90	0,25
Mn	Св, мг/кг	3,0	< 1,0	4,0	9,0	3,0	1,0	< 1,0	2,0	2,0	3,0	4,0	2,0	3,0	3,0
	Ср, мг/кг	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
	Ср, %	< 3,33	< 10,0	< 2,5	< 1,11	< 3,33	< 10,0	< 10,0	< 5,0	< 5,0	< 3,33	< 2,5	< 5,0	< 3,33	< 3,33
	Кк(фон)	0,38	< 0,12	0,50	1,12	0,38	0,12	0,12	< 0,12	0,25	0,25	0,38	0,5	0,25	0,38
Fe	Ккв(ГДК)	0,06	< 0,02	0,08	0,18	0,06	0,02	0,02	0,04	0,04	0,06	0,08	0,04	0,06	0,06
	Ккр(ГДК)	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
	Св, мг/кг	178,0	54,0	166,0	469,0	171,0	64,0	93,0	239,0	291,0	333,0	289,0	289,0	243,0	258,0
	Ср, мг/кг	81,7	6,71	7,61	7,61	3,25	21,7	14,3	29,1	3,71	14,2	41,3	8,1	3,59	7,25
Fe	Ср, %	45,90	12,42	4,58	1,62	1,90	33,91	15,38	12,18	1,27	4,26	14,29	2,80	1,48	2,81
	Кк(фон)	0,44	0,14	0,42	1,17	0,43	0,16	0,23	0,60	0,73	0,83	0,72	0,72	0,61	0,64
	Ккв(ГДК)	0,12	0,04	0,11	0,31	0,11	0,04	0,06	0,16	0,19	0,22	0,19	0,19	0,16	0,17
	Ккр(ГДК)	0,82	0,07	0,08	0,08	0,03	0,22	0,14	0,29	0,04	0,14	0,41	0,08	0,04	0,07
Fe	Св, мг/кг	8019	2167	13648	25802	10976	6490	2067	4551	7394	6716	7706	4120	5687	7304
	Ср, мг/кг	65,6	60,5	391,0	336,0	280,0	108,0	73,2	39,7	19,9	10,9	30,4	31,1	26,2	93,2
	Ср, %	0,82	2,79	1,65	1,30	2,55	1,66	3,54	0,87	0,27	0,16	0,39	0,75	0,4	1,28
	Кк(фон)	0,44	0,12	0,76	1,43	0,61	0,36	0,11	0,46	0,74	0,67	0,77	0,41	0,57	0,73

Примітка. * Розраховано за визначеним вмістом рухомих форм з використанням встановленої [4] залежності валових концентрацій і концентрацій обмінних рухомих форм Cd.

помірний – у точці 9; за Pb – слабкий – у точках 8, 11, 12, помірний – у точках 9, 13, і 14; за Cu – слабкий – у точці 12, помірний – у точках 8 і 13, середній – у точці 14, підвищений – у точці 9; за Cr – слабкий – у точках 10 і 11, помірний – у точці 12, середній – у точці 8, підвищений – у точках 13 і 14, високий – у точці 9; за Cd – підвищений – у точці 11, високий – у точках 8, 9, 12–14.

Враховуючи поліелементність забруднення ґрунту важкими металами, загальне забруднення оцінено за величиною показника сумарного забруднення відносно ГДК ($Z_{ГДК}$) [6]:

$$Z_{ГДК} = \sum C_i / ГДК_i - (n - 1), \quad (1)$$

де C_i – аномальний вміст певного елемента, $C_i > ГДК$;

ГДК – гранично допустима концентрація певного елемента;

n – кількість хімічних елементів з $C/ГДК > 1$.

Так, для точки 9, де відмічається перевищення ГДК валового вмісту по чотирьох елементах, $Z_{ГДК}$ дорівнює 4,3, тобто характеризує категорію сумарного забруднення як «помірно небезпечну» ($Z_{ГДК} = 2-5$). Такою ж самою категорією сумарне забруднення оцінюється і для точок 13 та 14, $Z_{ГДК}$, для яких дорівнює відповідно 2,3 і 3,1.

Якщо порівнювати зафіксовані значення рухомих форм металів у точках з ГДК, то за $K_{К(ГДК)}$ до середньозабруднених можна віднести поверхневі відклади в точках 8, 9, 12–14 за Zn, а до сильнозабруднених у цих же точках – за Cu.

Враховуючи, що для земель поблизу мулових полів №1 і №3 БСА в межах Золочівської сільської ради, забруднених мулами стічних вод, проведеними дослідженнями 2018 р. доведено, що геохімічні асоціації металів – забруднювачів у поверхневих відкладах загалом відповідають раніше встановленим, у тому числі за $K_{К(фон)}$ і $K_{К(ГДК)}$ [3, с. 99]. Тому враховуючи, що за останніх досліджень у ґрунтах вміст срібла, який є найпоширенішим і найбільшим (за показником $K_{К(фон)}$) елементом – забруднювачем, не визначався, проте є відносно стабільним, за базовий рівень поліелементного забруднення ґрунтів за сумарним показником Z_c , як ступеня впливу мулових полів, можна з достатньою вірогідністю прийняти дані попереднього еколого-геохімічного картування за цим показником (рис. 1).

Результати хімічного аналізу проб води з поверхневих і підземних водних об'єктів свідчать, що випробувані поверхневі води на території с. Гнідин (заплавна частина ділянки

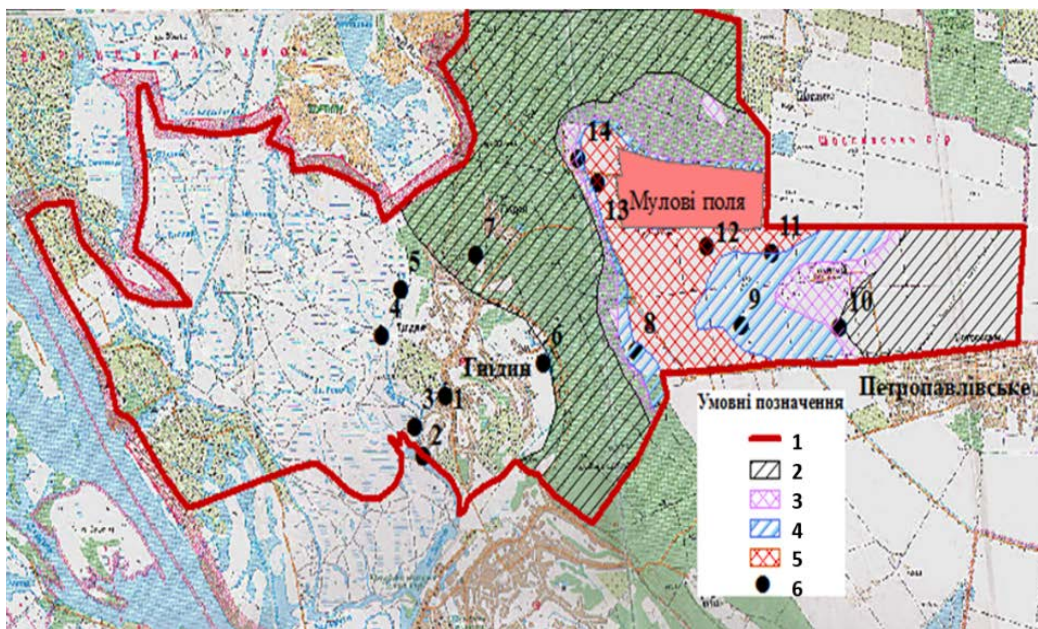


Рис. 1. Рівень забруднення поверхневого шару ґрунтів важкими металами на прилеглих до мулових полів № 1 і № 3 БСА землях Золочівської сільської громади: 1 – межі території оцінювання; 2–5 – рівні забруднення ґрунту за сумарним показником забруднення (Z_c) за [4]: 2 – фоновий та допустимий ($Z_c < 16$); 3 – помірно небезпечний ($Z_c = 16-32$); 4 – небезпечний ($Z_c = 32-128$); 5 – надзвичайно небезпечний ($Z_c > 128$); 6 – контрольні точки випробування ґрунтів у 2018 р. та їхні номери

досліджень) характеризуються підвищеним вмістом азоту нітритного й амонійного, заліза, мангану та міді. За екологічною класифікацією згідно з [23] погіршується якість води до категорії слабкозабруднених (за міддю), помірно забруднених (за азотом нітритним і залізом), брудних або дуже брудних (за азотом амонійним і манганом). Практично ці ж самі хімічні сполуки та компоненти перевищують нормативні значення (для питних вод) і в підземних водах на ділянці поблизу мулових полів, що може бути пов'язано з впливом останніх, а також слугувати чинником погіршення якості ґрунтових і поверхневих вод на території с. Гнідин, у бік якого розвантажуються ґрунтовий потік.

Обґрунтування можливих збитків, зумовлених забрудненням ґрунтів.

Функціонування мулових полів БСА в адміністративних межах Золочівської сільської громади створює постійну потенційну загрозу для навколишнього природного середовища та населення, а спричинене застосуванням мулів стічних вод в якості органічних добрив на сільськогосподарських угіддях забруднення ґрунтів небезпечними речовинами, насамперед важкими металами, знижує ефективність або унеможливорює сільськогосподарське використання земель, може негативно впливати на показники здоров'я населення в осередках забруднення [6, 8, 15], а також призводити до погіршення екологічного стану підземних вод і поверхневих водних об'єктів.

Площа сільськогосподарських земель поблизу мулових полів № 1 і №3 із надзвичайно небезпечним рівнем забруднення ґрунтів ($Z_c > 128$) становить (разом із санітарно-захисною зоною) орієнтовно близько 300 га, з небезпечним рівнем забруднення ($Z_c = 32-128$) – не менше як 260 га, з помірно небезпечним рівнем ($Z_c = 16-32$) – близько 140 га, а також не менше 200 га в межах умовно природних ландшафтів (лісового масиву) (рис. 1). Отже, значну частину земель, враховуючи рівень їх сумарного поліелементного забруднення важкими металами, не слід використовувати для сільськогосподарського виробництва, зокрема вирощування сільськогосподарських культур (близько 300 га) або ж використовувати лише для вирощування технічних культур нехарчового застосування (понад 250 га) з отриманням на забруднених угіддях більш низьких урожаїв, порівняно з незабрудненими землями. Неможливість або часткова обмеженість використання земельних ділянок, забруднених важкими металами, за цільовим призначенням нано-

суть певну шкоду або збитки власникам цих земель.

Визначення розмірів збитків, зумовлених забрудненням земель, яке включає накопичення в ґрунтах, а також у ґрунтових водах внаслідок антропогенного впливу важких металів та інших небезпечних речовин, вміст яких перевищує природний фон, має базуватися на чинних нормативно-правових актах щодо методик визначення розмірів шкоди, зумовленої забрудненням і засміченням земель, розрахунку розмірів відшкодування збитків, заподіяних державі внаслідок порушення законодавства про охорону та раціональне використання водних ресурсів, оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру тощо [24–28].

Враховуючи, що на ділянці досліджень фактично встановленим, у тому числі за результатами інструментально-лабораторних вимірювань і контролю, є забруднення приповерхневого шару ґрунтів важкими металами, для оцінювання пов'язаних з цим можливих збитків доцільно використовувати положення «Порядку визначення та відшкодування збитків власникам землі і землекористувачам» [28] та методичні підходи, викладені в Методиці [24], яка встановлює порядок розрахунку розмірів відшкодування шкоди через забруднення земель хімічними речовинами і поширюється на всі землі України, незалежно від їх категорії та форми власності.

Відповідно до [28] збитки від забруднення земель можна розглядати, зокрема, як неодержані доходи із земельних ділянок через погіршення якості землі або приведення її у непридатність для використання за цільовим призначенням у результаті негативного впливу, спричиненого діяльністю підприємств, організацій тощо. У даному контексті оцінено неодержані прибутки унаслідок забруднення ґрунтів. Так, для ділянок із надзвичайно небезпечним рівнем забруднення ґрунтів площею близько 300 га (без урахування забрудненої площі, зайнятої безпосередньо муловими полями) за середнього прибутку від вирощування сільськогосподарських культур 5500 грн/га орієнтовна величина шкоди через необхідність виключення земель такого рівня забруднення із сільськогосподарського використання складає 1,65 млн грн у рік. Для земель із небезпечним рівнем забруднення (≈ 260 га) пов'язане з останнім зниження врожайності (в середньому на 20%) зумовлює загальну величину недоотриманого прибутку в розмірі близько 300 тис. грн/рік.

Згідно з методикою [24] основою розрахунків розміру шкоди від забруднення земель є нормативна грошова оцінка земельної ділянки, яка зазнала забруднення. Розмір шкоди від забруднення земель визначається за формулою :

$$P_{\text{ш}} = A \times \Gamma_{\text{ОЗ}} \times P_{\text{д}} \times K_3 \times K_{\text{н}} \times K_{\text{ЕГ}} \quad (2)$$

де $P_{\text{ш}}$ – розмір шкоди від забруднення земель, грн;

A – питомі витрати на ліквідацію наслідків забруднення земельної ділянки, значення його дорівнює 0,5;

$\Gamma_{\text{ОЗ}}$ – нормативна грошова оцінка земельної ділянки, що зазнала забруднення, грн/кв.м;

$P_{\text{д}}$ – площа забрудненої земельної ділянки, кв.м;

K_3 – коефіцієнт забруднення земельної ділянки, що характеризує кількість забруднюючої речовини в об'ємі забрудненої землі залежно від глибини просочування;

$K_{\text{н}}$ – коефіцієнт небезпечності забруднюючої речовини, значення якого визначається за додатком 1 з [24];

$K_{\text{ЕГ}}$ – коефіцієнт еколого-господарського значення земель, який визначається за додатком 2 з [24].

Нижче наведено розрахунок розміру шкоди від забруднення земель в узагальненому вигляді для території з надзвичайно небезпечним і небезпечним рівнями забруднення за показником Z_c (рис. 1).

Загальна площа забрудненої території у першому випадку складає 300 га або 3 000 000 м². Більшість ділянок в її межах за цільовим призначенням – це землі для ведення особистого селянського господарства, основна агропромислова група ґрунтів – дерново-підзолисті та дернові неоглеєні і глеюваті глинисто-піщані ґрунти на піщаних відкладах. Відповідно усереднена грошова оцінка ($\Gamma_{\text{ОЗ}}$), з урахуванням проведеної в 2018 р. загальнонаціональної, прийнята на рівні 7,0 тис. грн/га або 0,7 грн/м².

Коефіцієнт забруднення земельної ділянки (K_3) з урахуванням того, що вміст забруднюючих речовин встановлювався за результатами інструментально-лабораторного контролю, прийнято рівним 2,0.

Коефіцієнт небезпечності забруднюючих речовин $K_{\text{н}}$ (Cd, Hg, Pb, Zn) становить 4,0, а коефіцієнт еколого-господарського значення земель $K_{\text{ЕГ}}$ для категорії земель сільськогосподарського призначення – 1,0.

За прийнятих значень показників:

$$P_{\text{ш(1)}} = 0,5 \times 0,7 \text{ грн/м}^2 \times 3\,000\,000 \text{ м}^2 \times 2 \times 4 \times 1 = 8,4 \text{ млн грн.}$$

На території з нижчим рівнем забруднення, загальна площа якої поблизу мулових полів становить близько 260 га, переважають ясно-сірі опідзолені супіщані ґрунти; цільовим призначенням розпайованих земель є ведення особистого селянського і підсобного сільськогосподарського виробництва, меншою мірою – індивідуального садівництва (згідно Публічної кадастрової карти України). Середня нормативна грошова оцінка земель із поширеною тут агропромисловою групою більш родючих ясно-сірих ґрунтів вища – 11 000 грн/га або 1,1 грн/м², $K_3=1,0$; $K_{\text{н}}=4,0$; $K_{\text{ЕГ}}=1,0$.

Відповідно, розмір шкоди від забруднення для оцінюваної частини території становитиме:

$$P_{\text{ш(2)}} = 0,5 \times 1,1 \text{ грн/м}^2 \times 2\,600\,000 \text{ м}^2 \times 1 \times 4 \times 1 = 5,72 \text{ млн грн.}$$

Отже, для кожної земельної ділянки, що зазнала забруднення ґрунтів, може бути визначено розмір пов'язаної з ним шкоди за наведеною вище формулою (2) розрахунку $P_{\text{ш}}$.

Висновки. Проведені дослідження стану забруднення ґрунтів на території с. Гнідин і на виокремлених, за даними виконаного раніше еколого-геохімічного картування ґрунтів [4], ділянках із різним рівнем забруднення сільськогосподарських земель поблизу мулових полів № 1 і № 3 БСА, підтвердили наявність у межах останніх зафіксованого раніше підвищеного вмісту, порівняно з фоновим, для низки важких металів, які входять до геохімічної асоціації основних елементів забруднення мулів стічних вод (Cu, Hg, Cr, Pb, Cd, Zn), причому як за їх валовим вмістом, так і за вмістом рухомих форм, що свідчить про відсутність або надзвичайно повільний процес природного самоочищення ґрунтів від важких металів у забруднених агроландшафтах. Для низки елементів – забруднювачів (Zn, Cu, Cr, Pb) по окремих точках у межах сільськогосподарських угідь у районі розташування мулових полів зафіксовано перевищення значень їхнього валового вмісту, а також вмісту рухомих форм (Zn, Cu) гранично допустимих концентрацій. Коефіцієнт концентрації відносно ГДК за валовим вмістом Zn на обстежених ділянках становить 0,2–1,9, а за вмістом рухомих форм 0,03–2,63, по міді відповідно 1,1–1,6 і 3,0–6,2. Валовий вміст свинцю перевищує ГДК даного елемента в 1,1–1,2 рази в трьох точках, а хрому – у п'яти точках із семи – в 1,2–2,6 рази.

Усереднені значення вмісту важких металів для заплавлених територій (населений пункт) і сільськогосподарських угідь поблизу мулових полів свідчать про їх превалюючі величини для останніх практично за всіма елементами, окрім Fe і Mn (рухомі форми), а також про перевищення фонових значень і ГДК узагальнено теж лише для площ, які раніше зазнали забруднень муловими відкладами. Так, усереднений коефіцієнт перевищення концентрації відносно фонового вмісту $K_{K(\text{фон})}$ за валовими формами становить для Zn-1,43, Pb-1,78, Cu-2,14, Cr-3,28, Cd-5,33. Перевищення значень ГДК за валовим вмістом фіксується для міді в 1,3 рази і хрому в 1,6 рази, а за рухомими формами для Zn і Cu в 1,4 і 3,3 рази відповідно.

Як заплавлі (територія населеного пункту), так і плакорні ґрунти сільгоспугідь у межах обстежених ділянок класифікуються як незасолені та несолонцюваті. Водночас підвищений вміст обмінного магнею (понад 20% від ємності ґрунтового вбирного комплексу) може несприятливо впливати на родючість останнього.

Підвищені мінералізація та вміст амонію і нітратів у ґрунтових водах (на дні піщаного

кар'єру) поблизу мулових полів можуть бути пов'язані з впливом мулових вод і спричинювати погіршення якості підземних вод у зоні їхнього транзиту та розвантаження, зокрема в межах с. Гнідин.

Площа сільськогосподарських земель поблизу мулових полів № 1 і № 3 БСА з надзвичайно небезпечним рівнем забруднення за сумарним показником забруднення важкими металами становить близько 300 га (не враховуючи 190,3 га площі мулових полів), а орієнтовна величина шкоди (неодержаний прибуток), через рекомендації виключення земель такого рівня забруднення із сільськогосподарського використання, може складати 1,65 млн грн/рік. Територія з небезпечним рівнем забруднення охоплює площу близько 260 га з величиною недоотриманого прибутку через зниження врожайності близько 300 тис. грн/рік. Розпаювання забруднених земель, їх освоєння під сільськогосподарське використання та житлову забудову потребують постійного контролю за станом ґрунтів, водних ресурсів, вирощуваної продукції та здоров'я населення.

Бібліографія

1. Еколого-геохімічні дослідження мулових полів стічних вод та їхній вплив на довкілля прилеглих територій (на прикладі ділянки Гнідин). Клос В.Р та ін. *Пошукова та екологічна геохімія*. 2013. № 1(13). С. 34–43.
2. Геохімічний вплив земель, забруднених мулами стічних каналізаційних вод, на сільськогосподарські рослини / Клос В.Р. та ін. // Державне підприємство «Українська геологічна компанія». URL: <http://ukrgeol.com> (дата звернення: 19.08.2021).
3. Еколого-геохімічна оцінка ґрунтів Київської області, забруднених мулами стічних вод. Клос В.Р. та ін. *Геохімія та рудоутворення*. 2017. Вип. 38. С. 95–100.
4. Клос В.Р. Геохімічний вплив забруднених земель мулами стічних вод на рослинність. Державне підприємство «Українська геологічна компанія». URL: <http://ukrgeol.com> (дата звернення: 19.08.2021).
5. Корсун С.Г., Камінський В.Ф., Гамалей В.І. Екотоксикологічне обстеження сільських територій: методичні рекомендації. Київ : ВД «ЕКМО», 2010. 44 с.
6. Ґрунтово-геохімічне обстеження урбанізованих територій. Методичні рекомендації / Укладачі: Балюк С.А., Фатєєв А.І., Мірошніченко М.М. Харків : ННЦ «ІГА ім. О.Н. Соколовського» УААН, 2004. 54 с.
7. Методичні вказівки відбору проб ґрунту в зимовий період. ДП «Інститут охорони ґрунтів України» МінАП, ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського» НААН, ННЦ «Інститут агроєкології і природокористування НААН», ННЦ «Інститут землеробства НААН». Київ, 2018. 24 с.
8. Геохимия окружающей среды. Саєт Ю.Е. и др. Москва : Недра, 1990. 335 с.
9. Еколого-геохімічні дослідження впливу мулових полів стічних вод на довкілля прилягаючих територій (на прикладі геохімічних, гідрохімічних та геофізичних досліджень ділянки «Гнідин») / Клос В.Р. та ін. // Державне підприємство «Українська геологічна компанія». URL: <http://ukrgeol.com>. (дата звернення: 19.08.2021)
10. Регіональні геохімічні дослідження ґрунтів України в рамках міжнародного проекту з геохімічного картування сільськогосподарських та пасовищних земель Європи (GEMAS) / Клос В.Р. та ін. // *Пошукова та екологічна геохімія*. Київ : ІГФМ, №1. 2012. С. 51–67.
11. Єгорова Т.М. Фоновий вміст важких металів та його екологічна інформативність у ґрунтах агроландшафтів зони Українського Полісся. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2014. № 81. С. 65–72.

12. Фоновий вміст мікроелементів у ґрунтах України / за ред. А.І. Фатєєва, Я.В. Пашенко. Харків, 2013. 117 с.
13. ВНД 33-5.5-06-99 Охорона водних, ґрунтових та рослинних ресурсів від забруднення важкими металами в умовах зрошення. Київ, 1999. 26 с.
14. Суцільний ґрунтово-агрохімічний моніторинг сільськогосподарських угідь України : керівний нормативний документ / за ред. О.О. Созінова, Б.С. Прістера. Київ, 1994. С. 52–54.
15. Земельні ресурси України / за ред. В.В. Медведєва, Т.М. Лактонової. Київ : Аграрна наука, 1998. 150 с.
16. Оптимізація мікроелементного живлення сільськогосподарських культур (рекомендації) / За ред. А.І. Фатєєва. Харків, 2012. 38 с.
17. Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення: керівний нормативний документ / за ред. І.П. Яцука, С.А. Балюка. 2-ге вид. допов. Київ, 2019. 108 с.
18. ДСТУ 7827:2015 Якість ґрунту. Класифікація ґрунтів за ступенем вторинної засоленості. Київ : Держспоживстандарт України, 2016. 11 с. (Національний стандарт України)
19. ДСТУ 3866-99 Ґрунти. Класифікація ґрунтів за ступенем вторинної солонцюватості. Київ : Держстандарт України, 1999. 10 с. (Національний стандарт України)
20. ВБН 33-5.5-01-97 Організація і ведення еколого-меліоративного моніторингу, частина 1 – Зрошувані землі. Київ : Держводгосп України, 2002. 64 с.
21. Ведення сільськогосподарського виробництва у приватному секторі в умовах посиленого антропогенного впливу на навколишнє середовище / Мислива Т.М. та ін.; за ред. Т.М. Мисливої. Житомир, 2011. 50 с.
22. Патики В. П., Тараріко О. Г. Агроекологічний моніторинг та паспортизація сільськогосподарських земель: методично-нормативне забезпечення. Київ : Фітосоціоцентр, 2002. 296 с.
23. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями / Романенко В.Д. та ін. Київ : СИМВОЛ-Т, 1998. 28 с.
24. Методика визначення розмірів шкоди, зумовленої забрудненням і засміченням земельних ресурсів через порушення природоохоронного законодавства. Затверджено Наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки 27.10.1997 р. № 171 (у редакції наказу Мінприроди 04.04.2007 р. № 149). Зареєстровано в Мінюсті 05.05.1998 р. за № 285/2725. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0285-98> (дата звернення: 19.08.2021).
25. Методика розрахунку розмірів відшкодування збитків, заподіяних державі внаслідок порушення законодавства про охорону та раціональне використання водних ресурсів. Затверджено Наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки України 20.07.2009р. № 389. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 21 травня 2021 р. за № 678/36300. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0767-09> (дата звернення: 19.08.2021).
26. Методика оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру. Затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 15.02.2002 р. № 175. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/175-2002-п> (дата звернення: 19.08.2021).
27. Постанова Кабінету Міністрів України від 17 листопада 1997 р. № 1279 «Про розміри та Порядок визначення втрат сільськогосподарського і лісогосподарського виробництва, які підлягають відшкодуванню». URL <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1279-97-п> (дата звернення: 19.08.2021).
28. Постанова Кабінету Міністрів України від 17.04.1993 р. № 284 «Про Порядок визначення та відшкодування збитків власникам землі та землекористувачам». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/284-93-п> (дата звернення: 19.08.2021).

References

1. Klos, V.R., Zhovynskiy, E.Ya., Akinfiev, H.A. & Amashukeli, Yu.A. (2013). Ekoloho-heokhimichni doslidzhennia mulovykh poliv stichnykh vod ta yikhonii vplyv na dovykhillia prylyehlykh terytorii (na prykladi dilianky Hnidyn) [Ecological and geochemical studies of sewage sludge fields and their impact on the environment surrounding areas (for example areas of Gnidyn)]. Poshukova ta ekolohichna heokhimiia, 1(13), 34–43.
2. Klos, V.R., Zhovynskiy, E.Ya., Kriuchenko, N.O. & Prykhodko, M.V. (2016). Heokhimichni vplyv zemel, zabrudnenykh mulamy stichnykh kanalizatsiinykh vod, na silskohospodarski roslyny [Geochemical impact of lands contaminated with sewage sludge on agricultural plants]. Derzhavne pidpriemstvo «Ukrainska heolohichna kompaniia». Retrieved from <http://ukrgeol.com>

3. Klos, V.R., Zhovynskiy, E.Ya., Kriuchenko, N.O. & Prykhodko, M.V. (2017). Ekoloho-heokhimichna otsinka gruntiv Kyivskoi oblasti, zabrudnennykh mulamy stichnykh vod [Ecological and geochemical assessment of soils of Kyiv region contaminated with sewage sludge]. *Heokhimiia ta rudoutvorennia*, 38, 95–100.
4. Klos, V.R. (2016). Heokhimichniy vplyv zabrudnennykh zemel mulamy stichnykh vod na roslynnist [Geochemical impact of contaminated land mules wastewater vegetation]. *Derzhavne pidpriemstvo Ukrainka heolohichna kompaniia*. Retrieved from <http://ukrgeol.com>
5. Korsun, S.H., Kaminskyi, V.F., & Hamalei, V.I. (2010). Ekotoksykologichne obstezhennia silskykh terytorii: metodychni rekomendatsii [Ecotoxicological survey of rural areas: guidelines]. Kyiv : VD «EKMO».
6. NNTs IGA im. O.N. Sokolovskoho UAAN. (2004). Gruntovo-heokhimichne obstezhennia urbanizovanykh terytorii. Metodychni rekomendatsii [Soil and geochemical survey of urban areas. Guidelines]. Baliuk, S.A., Fatieiev, A.I., & Miroshnychenko, M.M. (Ed.). Kharkiv.
7. DP «Instytut okhorony gruntiv Ukrainy» MinAP, NNTs «Instytut gruntoznavstva ta ahrokhimii imeni O.N. Sokolovskoho» NAAN, NNTs «Instytut ahroekolohii i pryrodokorystuvannia NAAN» & NNTs «Instytut zemlerobstva NAAN». (2018). Metodychni vkazivky vidboru prob gruntu v zymoviy period [Methodical instructions for soil sampling in winter]. Kyiv.
8. Saet, Yu.E., Revych, B.A., & Yanyn, E.P. (1990). Heokhymyia okruzhaiushchei sredy [Geochemistry of the environment]. Moskva: Nedra.
9. Klos, V.R., Zhovynskiy, E.Ya., Akinfiiev, H.O. (2014). Ekoloho-heokhimichni doslidzhennia vplyvu mulovykh poliv stichnykh vod na dovkillia pryliahaiuchykh terytorii (na prykladi heokhimichnykh, hidrokhimichnykh ta heofizychnykh doslidzhen dilianky «Hnidyn») [Ecological and geochemical studies of the impact of sludge fields of wastewater on the environment of adjacent areas (on the example of geochemical, hydrochemical and geophysical studies of the site «Gnidyn»)]. *Derzhavne pidpriemstvo «Ukrainska heolohichna kompaniia»*. Retrieved from <http://ukrgeol.com>
10. Klos, V.R., Birke, M., Zhovynskiy, E.Ya. (2012) Rehionalni heokhimichni doslidzhennia gruntiv Ukrainy v ramkakh mizhnarodnoho proektu z heokhimichnoho kartuvannia silskohospodarskykh ta pasovyshchnykh zemel Yevropy (GEMAS) [Regional geochemical studies of soils of Ukraine within the framework of the international project on geochemical mapping of agricultural and pasture lands of Europe (GEMAS)]. Kyiv: IHFM, 1, 51–67.
11. Yehorova, T.M. (2014). Fonovyi vmist vazhkykh metaliv ta yoho ekolohichna informatyvniat u gruntakh ahrolandshaftiv zony Ukrainskoho Polissia [Background content of heavy metals and its ecological informativeness in soils of agrolandscapes of the zone of Ukrainian Polissya]. *Ahrokhimiia i hruntoznavstvo*, 81, 65–72.
12. Fatieiev, A.I., & Pashchenko, Ya.V. (Ed.) (2013). Fonovyi vmist mikroelementiv u gruntakh Ukrainy [Background content of microelements in the soils of Ukraine] Kharkiv.
13. Okhorona vodnykh, hruntovykh ta roslynnykh resursiv vid zabrudnennia vazhkymy metalamy v umovakh zroshennia [Protection of water, soil and plant resources from heavy metal pollution under irrigation]. (1999). VND 33-5.5-06-99. Kyiv.
14. Sozinov, O.O., & Prister, B.S. (Ed.). (1994). Sutsilnyi gruntovo-ahrokhimichniy monitorynh silskohospodarskykh uhid Ukrainy : kerivnyi normatyvnyi dokument [Continuous monitoring of soil and agrochemical agricultural land in Ukraine: regulatory document management]. Kyiv, 52–24.
15. Medvediev, V.V., & Laktonov, T.M. (Ed.). (1998). Zemelni resursy Ukrainy [Land resources of Ukraine]. Kyiv : Ahrarna nauka.
16. Fatieiev, A.I. (Ed.). (2012). Optyimizatsiia mikroelementnoho zhyvlennia silskohospodarskykh kultur (rekomendatsii) [Optimization of microelement nutrition of agricultural crops (recommendations)]. Kharkiv.
17. Yatsuk, I.P. & Baliuk, S.A. (Ed.). (2019). Metodyka provedennia ahrokhimichnoi pasportyzatsii zemel silskohospodarskoho pryznachennia: kerivnyi normatyvnyi dokument [The methodology of agrochemical certification of agricultural land: a regulatory document management]. Kyiv.
18. Yakist gruntu. Klasyfikatsiia gruntiv za stupenem vtorynnoi zasolenosti [The quality of the soil. Classification of soils according to the degree of secondary salinity]. (2016). DSTU 7827:2015. Natsionalnyi standart Ukrainy. Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy.
19. Grunty. Klasyfikatsiia gruntiv za stupenem vtorynnoi solontsiuvatosti. [Soils. Classification of soils according to the degree of secondary salinity]. (1999). DSTU 3866-99. Natsionalnyi standart Ukrainy. Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy.

20. Orhanizatsiia i vedennia ekoloho-melioratyvnoho monitorynhu, chastyna 1 – Zroshuvani zemli [Organization and conduct of ecological and reclamation monitoring, part 1 – Irrigated lands]. (2002). VBN 33-5.5-01-97. Kyiv : Derzhvodhosp Ukrainy.

21. Myslyva, T.M. (2011). Vedennia silskohospodarskoho vyrobnytstva u pryvatnomu sektori v umovakh posylenoho antropohennoho vplyvu na navkolishnie seredovyshe [Agricultural production in the private sector in terms of enhanced human impact on the environment]. T.M. Myslyvoi (Ed.). Zhytomyr.

22. Patyka, V.P., & Tarariko, O.H. (2002). Ahroekolohichni monitorynh ta pasportyzatsiia silskohospodarskykh zemel: metodychno-normatyvne zabezpechennia [Agroecological monitoring and certification of agricultural lands: methodological and regulatory support]. Kyiv : Fitosotsiotsentr.

23. Romanenko, V.D. (1998). Metodyka ekolohichnoi otsinky yakosti poverkhnevyykh vod za vidpovidnyimi katehoriiami [Methods of ecological assessment of surface water quality by relevant categories]. Kyiv : SYMVOL-T.

24. Metodyka vyznachennia rozmiriv shkody, zumovlenoi zabrudnenniam i zasmichenniam zemelnykh resursiv cherez porushennia pryrodookhoronnoho zakonodavstva [Method of determining the amount of damage caused by pollution and contamination of land resources for violating environmental laws]. (1997). Zareiestrovano v Miniusti 05.05.1998 r. za № 285/2725. Retrieved from URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0285-98>

25. Metodyka rozrakhunku rozmiriv vidshkoduvannia zbytkiv, zapodiianykh derzhavi vnaslidok porushennia zakonodavstva pro okhoronu ta ratsionalne vykorystannia vodnykh resursiv [Methods of calculating the amount of compensation for damages caused to the state as a result of violation of legislation on protection and rational use of water resources.]. (2009). Zareiestrovano v Miniusti 21.05.2021r. za №678/36300. Retrieved from URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0767-09>

26. Metodyka otsinky zbytkiv vid naslidkiv nadzvychainykh sytuatsii tekhnogennoho i pryrodnoho kharakteru [Methods of assessing damage from emergency situations of technogenic and natural character]. (2002). Zatverdzhena postanovoiu Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 15.02.2002 r. № 175. Retrieved from URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/175-2002-p>

27. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy «Pro rozmiry ta Poriadok vyznachennia vtrat silskohospodarskoho i lisohospodarskoho vyrobnytstva, yaki pidliahaiut vidshkoduvanniu» [About the sizes and the Procedure for definition of losses of agricultural and forestry production which are subject to compensation]: pryiniaty 17 lystopada 1997 r. № 1279. Retrieved from URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1279-97-p>

28. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy «Pro Poriadok vyznachennia ta vidshkoduvannia zbytkiv vlasnykam zemli ta zemlekorystuvacham.» [On the procedure for determining and compensating losses to land owners and land users]: pryiniaty 17.04.1993 r. № 284. Retrieved from URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/284-93-p>

М.В. Яцюк, А.Н. Шевченко, Р.П. Боженко, С.Н. Лютицкий

Влияние иловых полей Бортнической станции аэрации на экологическое состояние земельных и водных ресурсов прилегающих территорий

Аннотация. В статье отражены результаты исследований по оценке экологического состояния земель вблизи иловых полей №1 и №3 Бортнической станции аэрации на территории Золочевской сельской общины Бориспольского района Киевской области. Подтверждено наличие в пределах выделенных вблизи иловых полей участков зафиксированного ранее повышенного содержания тяжелых металлов в почвах по сравнению с фоновым, как по их валовому содержанию, так и по содержанию подвижных форм. Для элементов – загрязнителей (Zn, Cu, Cr, Pb) по отдельным точкам в пределах сельскохозяйственных угодий зафиксировано превышение значений их валового содержания и содержания подвижных форм (Zn, Cu) предельно допустимых концентраций в 1,1–6,2 и 1,1–2,6 раза соответственно. Усредненные значения содержания тяжелых металлов для пойменных территорий (населенный пункт) и сельскохозяйственных угодий вблизи иловых полей свидетельствуют об их превалирующих величинах для последних практически по всем элементам, а также о превышении фоновых значений и предельно допустимых концентраций именно для земель, на которые раньше вносили в качестве удобрений иловые отложения. В пределах обследованных участков почвы классифицируются как незасоленные и несолонцеватые, однако повышенное содержание обменного магния может неблагоприятно влиять на плодородие почвы. Вблизи иловых полей наблюдаются повышенные минерализация и содержание аммония и нитратов в грунтовых водах, что очевидно связано с влиянием иловых вод и может привести к ухудшению качества подземных вод в зоне их транзита и разгрузки, в частности в пределах с. Гнидин.

Площадь земель с чрезвычайно опасным уровнем загрязнения по суммарному показателю загрязнения тяжелыми металлами составляет около 300 га, с опасным уровнем загрязнения – 260 га, а ориентировочная величина ущерба от недополучения урожая может составлять 1,65 млн грн/год и 0,30 млн грн/год соответственно. В рамках прилегающих к иловым полям территорий должен осуществляться постоянный контроль за состоянием почв, водных ресурсов, выращенной продукции и здоровья населения, особенно в условиях освоения загрязненных земель под сельскохозяйственное использование или жилую застройку.

Ключевые слова: водно-экологические риски, почвы, грунтовые воды, загрязнения, пойма, земельные ресурсы, оросительная система, иловые поля.

M.V. Yatsiuk, A.M. Shevchenko, R.P. Bozhenko, S.M. Lyutnitsky
The effects of silt fields of Bortnytska aeration station on ecological state of land and water in the adjacent areas

Abstract. The article highlights the results of research on assessing the ecological state of the land near the silt fields №1 and №3 of Bortnytska aeration station in the Zolochiv village community of Boryspil district in Kyiv region. The presence of previously recorded increased content of heavy metals in soils compared to the background content, both in terms of their gross content and the content of mobile forms was confirmed within the certain areas near the silt fields. For the elements-pollutants (Zn, Cu, Cr, Pb) at some points within the agricultural land, exceeding the values of their gross content and the content of mobile forms (Zn, Cu) of the maximum permissible concentrations was recorded at 1,1–6.2 and 1,1 –2.6 times, respectively. The average values of heavy metals content for floodplains (settlement) and agricultural land near silt fields indicate their prevailing values for the latter in almost all elements, as well as exceeding the background values and maximum permissible concentrations for the land where silt deposits were previously applied as fertilizers. Within the surveyed areas, soils are classified as unsalted, but the increased content of exchangeable magnesium may adversely affect soil fertility.

Increased mineralization and content of ammonium and nitrates in groundwater are observed near silt fields, which is obviously related to the impact of silt water and can lead to deterioration of groundwater quality in the area of their transit and discharge, in particular within the village Gnidyn. The area of land with an extremely dangerous pollution rate in terms of total heavy metal is about 300 hectares, with a dangerous pollution rate is 260 hectares, and the estimated damage from crop failure may be 1,65 million UAH/year and 0,3 million UAH/year respectively. Within the areas adjacent to the silt fields, the condition of soils, water resources, cultivated products and the health of the population should be constantly monitored, especially when using the polluted land for agricultural use or housing.

Key words: water and ecological risks, soils, groundwater, pollution, floodplain, land resources, irrigation system, silt fields

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-300>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/300>

УДК 631.812.2:631.8.022.3:631.674.6

ВПЛИВ ПРЕПАРАТІВ БІОХІМІЧНОГО ТА МІКРОБІОЛОГІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО ЗА КРАПЛИННОГО ЗРОШЕННЯ

В.М. Білий¹, канд. с.-г. наук, В.В. Книш²

¹ ТОВ «НВП «5 елемент», Гола Пристань, Україна;

<https://orcid.org/0000-0002-4310-5414>; e-mail: belyyvladimir64@gmail.com;

² Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0002-3220-9883>; e-mail: iwpim27@gmail.com

Анотація. Висвітлено результати досліджень щодо вивчення впливу препаратів біохімічного та мікробіологічного походження виробництва ТОВ «НВП «5 елемент» на перебіг продукційного процесу, структуру урожаю і урожайність кукурудзи за краплинного зрошення. Встановлено, що найвищу урожайність кукурудзи можливо отримати за проведення передпосівної обробки насіння нанобіостимулятором росту рослин «V-Agro. Насіння» та дворазової обробки вегетуючих рослин розчином концентрату продуктів життєдіяльності азотфіксуючої ґрунтової водорості. Комбіноване застосування препарату «V-Agro. Насіння» та розчину концентрату продуктів життєдіяльності азотфіксуючої ґрунтової водорості забезпечує урожайність кукурудзи на рівні 16,1 т/га, що 5,5 т/га, або на 51,9% більше, ніж в абсолютному контролі (без оброблення насіння і без фоліарної обробки рослин).

Встановлено, що ефективним заходом є і окреме застосування препаратів як для обробки насіння, так і обробки рослин під час вегетації. Одна тільки обробка насіння нанобіостимулятором росту рослин «V-Agro. Насіння» сприяє підвищенню урожайності кукурудзи на 1,6 т/га, або на 15,1%. Аналогічний ефект отримано і при застосуванні для оброблення насіння біопрепарату Soil Algae (жива культура у формі порошку), де прибавка урожайності склала 14,1%, тобто 1,5 т/га.

Визначено, що більш ефективним, ніж передпосівне оброблення насіння, є застосування препаратів для фоліарного внесення. Так, дворазове обприскування рослин кукурудзи, відповідно 2% та 4% розчином концентрату продуктів життєдіяльності азотфіксуючої ґрунтової водорості, сприяє підвищенню урожайності культури на 3,2 т/га, або на 30,2%, порівняно з контролем. Застосування нанобіостимулятора росту рослин «V-Agro. Листкова обробка» для фоліарного внесення забезпечило прибавку урожайності, яка склала 2,8 т/га, або 26,4%. Найбільшу середню масу одного качана кукурудзи було отримано за використання агрозаходу, який передбачає передпосівну обробку насіння нанобіостимулятором росту рослин «V-Agro. Насіння» та дворазову обробку вегетуючих рослин розчином концентрату продуктів життєдіяльності азотфіксуючої ґрунтової водорості, що дало можливість отримати качан із середньою масою 248,4 г, тоді як в абсолютному контролі (без оброблення насіння і без фоліарної обробки рослин) – 174,5 г.

Ключові слова: сільське господарство, кукурудза, краплинне зрошення, урожайність, структура урожаю, стимулятори росту й розвитку рослин, імуномодулятор, антистресант

Постановка проблеми. Важливим завданням сучасного сільськогосподарського виробництва є створення та застосування нових екологічно безпечних агротехнологій, спрямованих на підвищення продуктивності сільськогосподарських культур, серед яких особливе місце займає кукурудза. Сьогодні в аграрному виробництві в основному застосовуються стимулятори росту й розвитку рослин, які представлені переважно синтетичними сполуками, безпечність яких для здоров'я людей і стану ґрунтів і досі не встановлено, що викликає певну засторогу у їх використанні.

ТОВ Науково-виробничим підприємством «5 елемент» розроблено і налагоджено випуск ефективних, екологічно безпечних препаратів, сертифікованих міжнародними організаціями, придатних до використання в органічному і інтенсивному землеробстві. Одним із цих препаратів є нанорегулятор росту рослин із торгівельною маркою «V-Agro». Препарат виробляється з урахуванням біологічних особливостей культур та способів застосування (для обробки насіння або під час вегетації рослин), він має позитивні результати як у лабораторних і польових дослідженнях, так і у виробничих умовах. «V-Agro» –

біопрепарат системної дії з функціями регулятора росту, імуномодулятора та антистресанта для рослин. Має високий рівень ефективності та технологічності, оскільки норми внесення надзвичайно низькі – 25 грам на 1 га посівної площі за умов використання робочої рідини на рівні 200–300 л/га. Препарат нешкідливий для оточуючого середовища та людини і сумісний з усіма препаратами. Принцип його дії полягає в наявності активних речовин сигнальної природи в комплексі з допоміжними речовинами. Головна активна речовина – комплекс гормональних і гормоноподібних молекул рослин – так званий «комплексон брасиноліда», який працює на рівні генетичної програми рослини. Основна властивість брасиностероїдів – висока фізіологічна активність. Якщо класичні фітогормони діють у концентраціях 10^{-5} – 10^{-6} моля, то брасиностероїди – у дозах 10^{-8} – 10^{-11} моля. Після обробки брасиностероїдами у дослідженнях було виявлено сильнодіючу стимуляцію росту зернових, зернобобових, овочевих та плодкових культур. На сьогодні відомими є більше шестидесяти фітогормонів групи брасиностероїдів, серед яких найбільш відомими є: кастастерон (виділений з каштану), тіфастерол (з рогозу) та теастерон (з чаю) та ін.

На основі азотфіксуючих ціанобактерій (грунтових водоростей) ТОВ «НВП «5 елемент» розроблено біологічні препарати: Soil Algae (жива культура у вигляді сухого порошку), які є продуцентом фізіологічно активних речовин та Aqua Algae (продукти життєдіяльності азотфіксуючих ціанобактерій), що містять потужний комплекс фізіологічно активних речовин.

Мета досліджень вивчення впливу препаратів біохімічного походження (нанобіостимулятор росту рослин V-Agro) та мікробіологічного походження (Soil Algae та Aqua Algae), що застосовуються у технології вирощування кукурудзи за краплинного зрошення, на перебіг продукційного процесу, структуру урожаю та урожайність культури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед зернових культур кукурудза має найвищий винос та коефіцієнт засвоєння мікроелементів із ґрунту. На формування 1 т зерна і відповідної кількості вегетативних органів кукурудза виносить з ґрунту 1 га, кг/га: N – 20–30, P₂ O₅ – 8–10, K₂O – 15–17, а також багато кальцію, магнію (Mg) – 6–10, сірки (S) – 4–5, марганцю (Mn) – 0,15, цинку (Zn) – 0,05–0,1, бору (B) – 0,01–0,02, молібдену (Mo) – 0,01, заліза (Fe) – 0,2 та інших мікроелементів [1, 2]. Останнім часом питанням [3]

широкого використання біологічних препаратів – регуляторів росту та розвитку рослин у землеробстві приділяється велика увага в більшості економічно розвинених країн: Франції, Великій Британії, Німеччині, Швейцарії, Словаччині, Аргентині, Японії, Угорщині, США та інших. Завдяки невеликим нормам внесення та біологічному походженню регулятори росту рослин належать до найбезпечніших препаратів. Питання впровадження вітчизняних регуляторів росту в нашій країні давно назріли і займають першочергове місце серед інших перспективних маловитратних резервів агровиробництва. Кращі вітчизняні регулятори значно переважають іноземні біостимулятори та інші маловитратні розробки, адже доступні за ціною та є високоефективними при застосуванні [4, 5].

Дослідження біологічно активних речовин, що продукують ґрунтові мікроорганізми, мають важливе практичне значення, адже відомо, що вони та їх метаболіти впливають на ріст і розвиток рослин шляхом індукування цитологічних, біохімічних, фізіологічних і морфогенетичних змін у клітинах і тканинах рослин, що дозволяє застосовувати мікробні препарати в якості стимуляторів росту рослин.

Інокуляція насіння корисними ґрунтовими мікроорганізмами є необхідним і ефективним елементом сучасних технологій вирощування сільськогосподарських культур, який сприяє поліпшенню живлення рослин, їх захисту від різних захворювань, підвищенню урожайності культур та покращенню якості продукції.

Застосування мікробіологічних препаратів не втрачає своєї актуальності, проте сьогодні дещо зміщуються акценти щодо способів їх використання [6]. Якщо раніше у практиці землеробства обмежувалися виключно передпосівною обробкою насіння, вважаючи безперспективним нанесення суспензій біопрепаратів на вегетуючі рослини через негативний вплив ультрафіолетового сонячного випромінювання на життєздатність мікроорганізмів, то наразі це застереження мало ймовірно, адже крім бактеріального компоненту мікробні препарати містять чимало фізіологічно активних речовин [5, 6], які можуть позитивно вплинути на продукційний процес сільськогосподарських культур. Проте дослідження впливу мікробних препаратів, використаних для обробки вегетуючих рослин, на параметри їх росту і розвитку та урожайність культур практично не проводились, і донині інформація з цього питання в науковій літературі обмежена. Тому особливого значення набувають наукові розробки

нових ефективних способів застосування мікробних препаратів [6,7] для оптимізації продукційного процесу рослин.

Перші досліді в Україні з питань поверхневого краплинного зрошення кукурудзи було проведено в рамках наукової тематики УкрНДПГіМ (нині – ІВПіМ НААН) та дисертаційного дослідження Мороза П.А. у 1975–1978 рр. на Одещині. Дещо пізніше, у 1983–1985 рр., на дослідних полях УкрНДІ зрошуваного землеробства (нині – ІЗЗ НААН) було проведено порівняння поверхневого поливу та краплинного зрошення на зерновій кукурудзі (Гончаров Ф.І., Мацко П.В.). Проте, використані в цих досліді технічні засоби поливу на сьогодні вже втратили свою актуальність.

Схема досліді та методика дослідження.

Планування, закладання та облік і розрахунок урожайних даних польових досліджень (табл. 1) проводили згідно з методикою польового досліді за Б.О. Доспеховим, використані Методичні рекомендації з проведення досліджень за краплинного зрошення за редакцією М.І. Ромащенко [8] та «Методика польового досліді (зрошуване землеробство)» [9]. Дослідження проведені на чорноземі південному, який містить 0,5% гумусу, 9,2 мг/кг азоту легкогідролізованого, 21,5 мг/кг фосфору, 146 мг/кг обмінного калію, рН ґрунтового розчину 7,0.

Площа посівної ділянки – 24,6 м², облікової – 10,0 м², повторність – чотириразова. Передполивна вологість ґрунту 75–80% НВ. Поливна стрічка розміщувалася в кожному ряду, ширина міжряддя 0,7 м. Розміщення варіантів і повторень системне. Норма висіву кукурудзи Моніка F₁– 80 тис. насінин на 1 га.

Передпосівне оброблення насіння кукурудзи проводили препаратами згідно зі

схемою досліді. Надземну частину дослідних рослин обробляли згідно схеми досліді досліджуваними препаратами двічі протягом вегетації у фазу 4–5 та 7–8 листків за допомогою ранцевого обприскувача. Норма витрати робочого розчину – 200 л/га. Контрольні рослини обприскували водопровідною водою. (табл. 2). Збирання врожаю здійснювали у фазу повної стиглості зерна вручну з кожної ділянки досліді. Урожайність зерна кукурудзи перераховували на вологість 14%. Проводили структурний аналіз врожаю – визначали кількість качанів на рослині, середню масу качана, вихід насіння з качана.

Статистичну обробку експериментальних даних здійснювали за допомогою Microsoft Office Excel 2010. Для оцінювання достовірності відмінностей між варіантами дослідів вираховували найменшу істотну різницю (НІР₀₅).

Місце проведення. Дослідження проведено протягом 2020–2021рр. в умовах польових дослідів на базі дослідних ділянок ТОВ «НВП «5 елемент» у Скадовському районі Херсонської області на чорноземі південному. (<https://goo.gl/maps/KR33ejViGAmL4eQ1846.52104034848729,32.55707494721814>) За цього використано поверхневу систему краплинного зрошення. Джерело зрошення – артезіанська свердловина глибиною 50 метрів.

Результати досліджень. Попередніми дослідженнями встановлено, що фізіологічно активні речовини нанобіостимулятора росту рослин V-Agro відіграють важливу роль у процесах обміну продуктами метаболізму між рослиною і ґрунтовими мікроорганізмами (грибами, бактеріями, водоростями), що позитивно впливає на ростові і формоутворюючі процеси у рослин, родючість ґрунту та екологічні аспекти [10]. Доведено, що одним з основних засобів підвищення продуктивності рослин є застосування

1. Схема польового досліді

Варіант	Фактор А – праймування насіння	Фактор В – фоліарне оброблення
1	Без оброблення (контроль 1)	Без оброблення (контроль 2)
2		Aqua Algae
3		«V-Agro. Листкова обробка»
4	Soil Algae (жива культура у формі порошку) (10 г с.п.в 2 л води/100 кг насіння)	Без оброблення (контроль 2)
5		Aqua Algae
6		«V-Agro. Листкова обробка»
7	«V-Agro. Насіння» в рекомендованій дозі (25 г/2 л води/100 кг)	Без оброблення (контроль 2)
8		Aqua Algae
9		«V-Agro. Листкова обробка»
10	Soil Algae (10 г с.п. в 2 л води/100 кг насіння) + «V-Agro. Насіння» в рекомендованій дозі	Без оброблення (контроль 2)
11		Aqua Algae
12		«V-Agro. Листкова обробка»

2. Агротехніка вирощування кукурудзи в досліді

Сорт (гібрид)/ Дата сівби	Моніка F ₁ 350 МВ, ФАО 350 / 13 травня
Насіння (інкрустоване)	Обробку насіння проводили відповідно до схеми досліді: <ul style="list-style-type: none"> • Напівволога обробка водою з розрахунку 2л води/100 кг насіння) (Варіанти 1, 2, 3). • Напівволога обробка Soil Algae (жива культура у формі порошку) (10 г с.п.в 2 л води/100 кг насіння) (Варіанти 4, 5, 6). • Напівволога обробка «V-Agro. Насіння» в рекомендованій дозі (25 г/2л води/100 кг насіння) (Варіанти 7, 8, 9). • Напівволога обробка сумішшю препаратів: «V-Agro. Насіння» в рекомендованій дозі (25 г/2л води/100 кг насіння) + Soil Algae (жива культура у формі порошку) (10 г с.п.в 2 л води/100 кг насіння) (Варіанти 10, 11, 12).
Глибина загор- тання насіння	5–6 см
Припосівне добриво	N ₈ P ₁₅
Схема сівби	70×15–20 см
Густота рослин	80 тис. шт./га
Догляд за рослинами	3 міжрядних обробітки (мотоблок-фреза) на глибину 10–12 см + 2 прополки в рядках
Фоліарні обробки рослин	1-а обробка у фазу 4–5 листків: <ul style="list-style-type: none"> • 0,5% розчин карбаміду (контроль 2 – варіанти: 1, 4, 7 та 10) • 2% розчином препарату Aqua Algae (ПЖД) + 0,5% розчин карбаміду (варіанти 2; 5; 8 та 11) • Розчином препарату «V-Agro. Листкова обробка» (25 г/200 л води) + 0,5% карбаміду (варіанти 3; 6; 9 та 12) 2-а обробка у фазу 7–8 листків: <ul style="list-style-type: none"> • 0,5% розчином карбаміду (контроль 2 – варіанти: 1, 4, 7 та 10) • 4% розчином препарату Aqua Algae (ПЖД) + 0,5% розчин карбаміду (варіанти 2; 5; 8 та 11) • Розчином «V-Agro. Листкова обробка» (25 г/200 л води) + 0,5% карбаміду (варіанти 3; 6; 9 та 12)
Полив:	Поливна норма: Сходи – 3-й листок – 30 м ³ /га 3-й листок – 6-й листок – 40 м ³ /га 6-й листок – викидання волоті – 45 м ³ /га Викидання волоті-налив зерна – 50–55 м ³ /га Зрошувальна норма: 2100 м ³ /га
Удобрення (припосівне внесення + фертигація)	N ₈₃ P ₃₀ K ₁₀ Ca ₆ у т.ч. Карбамід – 150 кг/га (N ₇₀ кг д.р/га) Монофосфат калію – 30 кг/га (P ₁₅ K ₁₀ кг д.р/га) Кальцієва селітра – 30 кг/га (N ₅ Ca ₆ кг д.р/га) Гумат калію (Рост-концентрат) 10 л/га

у технології їх вирощування фізіологічно активних речовин біохімічного походження (нанобіостимулятор росту рослин V-Agro) та мікробіологічного походження (Soil Algae та Aqua Algae), що мають у своєму складі значну збалансовану кількість фітогормонів, вітамінів, аміно- та органічних кислот, екзополісахаридів (ЕПС), ферментів, антибіотичних та антифунгальних сполук тощо.

Визначення структури урожаю та урожайності зерна кукурудзи гібриду Моніка за застосування препаратів свідчить про позитивний вплив як окремої операції, так і сумісної дії передпосівної обробки і дворазової обробки вегетуючих рослин у фазі 4–5 та 7–8 листків досліджуваними препаратами. Перед визначенням найбільш продуктивного варіанту досліді відзначимо,

що всі варіанти досліду з препаратами, що були включені до схеми досліду, значно переважали абсолютний контроль за рівнем урожайності кукурудзи.

За результатами досліджень встановлено, що найвищу урожайність кукурудзи було отримано за використання агрозаходу, який передбачав передпосівну обробку насіння нанобіостимулятором росту рослин «V-Agro. Насіння» та дворазову обробку вегетуючих рослин препаратом Aqua Algae (ПЖД). Комбіноване застосування препарату «V-Agro. Насіння» та розчину концентрату продуктів життєдіяльності азотфіксуючої ґрунтової водорості дало можливість отримати урожайність зерна на рівні 16,1 т/га, що на 5,5 т/га, або на 51,9% більше, ніж в абсолютному контролі (без оброблення насіння і без фоліарної обробки рослин), де урожайність складала 10,6 т/га (табл. 3 та 4).

Ще досить високу урожайність кукурудзи, яка складала 15,0 т/га і достовірно не була меншою, ніж у кращому варіанті досліду (НІР₀₅ АВ = 1,33т), було отримано у двох варіантах досліду. Такий рівень урожайності було отримано за проведення передпосівної обробки насіння біопрепаратом Soil Algae (жива культура у формі порошку) та дворазової обробки вегетуючих рослин препаратом Aqua Algae (ПЖД). Іншим високоврожайним варіантом при вирощуванні кукурудзи стало використання агрозаходу, який передбачав передпосівну обробку насіння нанобіостимулятором росту рослин «V-Agro. Насіння» та дворазову обробку вегетуючих рослин нанобіостимулятором росту рослин «V-Agro. Листкова обробка».

Було визначено кращі варіанти комбінованого застосування препаратів, що забезпечили найвищий рівень урожайності кукурудзи у досліді:

- **Насіння** – нанобіостимулятор росту рослин «V-Agro. Насіння» + **дві обробки під час вегетації** – розчин концентрату продуктів життєдіяльності азотфіксуючої ґрунтової водорості (Aqua Algae (ПЖД) – урожайність 16,1 т/га;
- **Насіння** – біопрепарат Soil Algae (жива культура у формі порошку) + **дві обробки під час вегетації** розчин концентрату продуктів життєдіяльності азотфіксуючої ґрунтової водорості (Aqua Algae (ПЖД) – урожайність 15,0 т/га;
- **Насіння** – нанобіостимулятор росту рослин «V-Agro. Насіння» + **дві обробки під час вегетації** нанобіостимулятор росту рослин «V-Agro. Листкова обробка» – 15,0 т/га.

Дослідами доведено, що найбільш ефективним у технології вирощування кукурудзи на зерно за краплинного зрошення є комбіноване застосування препаратів, тобто передпосівна обробка насіння + дворазова обробка вегетуючих рослин. Проте, досить ефективним заходом є і окреме застосування препаратів, як для обробки насіння, так і обробки рослин під час вегетації. Так, одна тільки обробка насіння нанобіостимулятором росту рослин «V-Agro. Насіння» сприяла підвищенню урожайності кукурудзи на 1,6 т/га, або на 15,1%. Такий же ефект отримано і при застосуванні для оброблення насіння біопрепарату Soil Algae (жива культура у формі порошку) та сумішки Soil Algae + «V-Agro. Насіння», де прибавка до урожайності складала 14,1%, тобто 1,5 т/га.

3. Урожайність кукурудзи в зерні залежно від застосування препаратів біохімічного та мікробіологічного походження, т/га

Фактор А – праймування насіння	Фактор В – фоліарне оброблення	Повторність				Середня
		I	II	III	IV	
Без оброблення (контроль 1)	без оброблення	10,6	9,3	11,8	10,9	10,6
	Aqua Algae	14,5	13,5	13,6	13,6	13,8
	V-Agro	13,8	13,3	13,4	13,0	13,4
Soil Algae (жива культура у формі порошку) (10 г с.п.в 2 л води/100 кг насіння)	без оброблення	11,9	12,0	12,2	12,2	12,1
	Aqua Algae	15,4	15,5	14,3	14,8	15,0
	V-Agro	14,4	15,2	13,8	14,3	14,4
V-Agro в рекомендованій дозі (25 г/2 л води/100 кг)	без оброблення	12,0	11,5	12,9	12,4	12,2
	Aqua Algae	15,9	14,1	17,4	17,0	16,1
	V-Agro	14,9	14,3	15,3	15,5	15,0
Soil Algae (10 г с.п. в 2 л води/100 кг насіння) + V-Agro	без оброблення	11,7	12,4	12,7	11,7	12,1
	Aqua Algae	14,5	16,1	14,7	13,9	14,8
	V-Agro	14,2	15,2	14,9	14,1	14,6

НІР₀₅: А = 0,82 т; В = 1,02 т; АВ = 1,33 т.

Ще більш ефективним, ніж передпосівне оброблення насіння, було застосування препаратів для фоліарного внесення. Так, дворазове обприскування рослин кукурудзи, відповідно 2% та 4% розчином концентрату продуктів життєдіяльності азотфіксуючої ґрунтової водорості, сприяло підвищенню урожайності культури на 3,2 т/га, або на 30,2%. Дещо меншу, але також суттєву прибавку урожайності кукурудзи отримано від дворазового застосування нанобіостимулятора росту рослин «V-Agro. Листкова обробка», яка склала 2,8 т/га, або 26,4% (табл. 4).

Отже визначено ефективність застосування препаратів у технології вирощування кукурудзи на зерно за краплинного зрошення як окремого агрозаходу для обробки насіння, або фоліарного внесення, так і для комбінованого застосування, що включав оброблення насіння і два обприскування рослин у фазу 4–5 та 7–8 листків. Ефективність препаратів у технології вирощування кукурудзи за природом урожайності:

- **передпосівна обробка насіння**
 - «V-Agro. Насіння» – 15,1%;
 - Soil Algae (жива культура у формі порошку) – 14,1%;
 - Soil Algae + «V-Agro. Насіння» – 14,1%.
- **фоліарне внесення (листяна обробка)**
 - розчин концентрату ПЖД ґрунтової водорості – 30,2%;
 - «V-Agro. Листкова обробка» – 26,4%.

- **комбіноване застосування (передпосівна обробка насіння + дворазова обробка вегетуючих рослин)**

- «V-Agro. Насіння» + розчин концентрату ПЖД ґрунтової водорості – 51,9%;
- Soil Algae (жива культура у формі порошку) + розчин концентрату ПЖД ґрунтової водорості – 41,5%;
- «V-Agro. Насіння» + «V-Agro. Листкова обробка» – 41,5%;
- Soil Algae (жива культура у формі порошку) + «V-Agro. Листкова обробка» – 35,8%.

Підтвердженням ефективності досліджуваних препаратів при вирощуванні кукурудзи на зерно стало визначення структури урожаю. Встановлено, що найбільшу середню масу одного качана кукурудзи було отримано за використання агрозаходу, який передбачає передпосівну обробку насіння нанобіостимулятором росту рослин «V-Agro. Насіння» та дворазову обробку вегетуючих рослин препаратом Aqua Algae (ПЖД). Таке комбіноване застосування препарату «V-Agro. Насіння» та розчину концентрату продуктів життєдіяльності азотфіксуючої ґрунтової водорості дало можливість отримати качан із середньою масою 248,4 г, тоді як в абсолютному контролі (без оброблення насіння і без фоліарної обробки рослин) – 174,5 г (табл. 5). Досить високу середню масу качана кукурудзи, яка склала від 234,3 г до 231,6 г,

4. Приріст урожайності кукурудзи залежно від застосування препаратів біохімічного та мікробіологічного походження

Фактор А – праймування насіння	Фактор В – фоліарне оброблення	Середня врожайність, т/га	Відносно контролю 1 (К 1)		Відносно контролю 2 (К 2)		Відносно абсолютного контролю (К1, К2)	
			т/га	%	т/га	%	т/га	%
Без оброблення (К 1)	без оброблення (К 2)	10,6	0	–	0	–	0	–
	Aqua Algae	13,8	0	–	+3,2	30,2	+3,2	30,2
	V-Agro	13,4	0	–	+2,8	26,4	+2,8	26,4
Soil Algae (жива культура у формі порошку) (10 г с.п. в 2 л води/100 кг насіння)	без оброблення (К 2)	12,1	+1,5	14,1	0	–	+1,5	14,1
	Aqua Algae	15,0	+1,2	8,7	+2,9	24,0	+4,4	41,5
	V-Agro	14,4	+1,0	7,5	+2,3	19,0	+3,8	35,8
V-Agro в рекомендованій дозі (25 г/2 л води/100 кг)	без оброблення (К 2)	12,2	+1,6	15,1	0	–	+1,6	15,1
	Aqua Algae	16,1	+2,3	16,7	+3,9	32,0	+5,5	51,9
	V-Agro	15,0	+1,6	11,9	+2,8	22,9	+4,4	41,5
Soil Algae (10 г с.п. в 2 л води/100 кг насіння) + V-Agro	без оброблення (К 2)	12,1	+1,5	14,1	0	–	+1,5	14,1
	Aqua Algae	14,8	+1,0	7,2	+2,7	22,3	+4,2	39,6
	V-Agro	14,6	+1,2	8,9	+2,5	19,7	+4,0	37,7

5. Середня маса одного качана кукурудзи залежно від застосування препаратів біохімічного та мікробіологічного походження, тонн/га

Фактор А – праймування насіння	Фактор В – фоліарне оброблення	Повторність				Середня
		I	II	III	IV	
Без оброблення (контроль 1)	без оброблення	167,5	163,4	194,6	172,7	174,5
	Aqua Algae	217,1	213,9	211,2	219,7	215,5
	V-Agro	212,6	210,1	208,7	200,0	207,8
Soil Algae (жива культура у формі порошку) (10 г с.п. в 2 л води/100 кг насіння)	без оброблення	188,3	193,4	201,3	201,3	196,1
	Aqua Algae	230,5	235,8	229,9	234,2	232,6
	V-Agro	232,5	230,9	213,7	221,0	224,5
V-Agro в рекомендованій дозі (25 г/2 л води/100 кг)	без оброблення	194,7	188,1	206,5	191,2	195,1
	Aqua Algae	242,7	214,6	270,0	266,2	248,4
	V-Agro	228,7	220,0	244,1	244,3	234,3
Soil Algae (10 г с.п. в 2 л води/100 кг насіння) + V-Agro	без оброблення	193,3	204,0	206,7	182,3	196,6
	Aqua Algae	220,7	254,4	233,8	217,7	231,6
	V-Agro	223,7	242,3	228,7	209,6	226,1

було отримано ще у трьох варіантах досліду. Таку середню масу одного качана було отримано за проведення передпосівної обробки насіння нанобіостимулятором росту рослин «V-Agro. Насіння» та дворазової обробки вегетуючих рослин нанобіостимулятором

росту рослин «V-Agro. Листкова обробка». Іншим таким варіантом було використання для передпосівної обробки насіння біопрепарату Soil Algae (жива культура у формі порошку) та препарату Aqua Algae (ПЖД) для обробки вегетуючих рослин.

6. Зведені дані результатів досліджень щодо ефективності препаратів біохімічного та мікробіологічного походження за вирощування кукурудзи

Обробка насіння	Фоліарне внесення		Приріст урожайності	
	фаза 3–4 листків	фаза 7–8 листків	т/га	%
Напівволога обробка насіння				
«V-Agro. Насіння»	–	–	1,6	15,1
Soil Algae (порошок)	–	–	1,5	14,1
Soil Algae + «V-Agro. Насіння»	–	–	1,5	14,1
–	Aqua Algae (ПЖД), 2%	Aqua Algae (ПЖД), 4%	3,2	30,2
–	«V-Agro. Листкова обробка»	«V-Agro. Листкова обробка»	2,8	26,4
«V-Agro. Насіння»	Aqua Algae (ПЖД), 2%	Aqua Algae (ПЖД), 4%	5,5	51,9
Soil Algae (порошок)	Aqua Algae (ПЖД), 2%	Aqua Algae (ПЖД), 4%	4,4	41,5
«V-Agro. Насіння»	«V-Agro. Листкова обробка»	«V-Agro. Листкова обробка»	4,4	41,5
Soil Algae (порошок) + «V-Agro. Насіння»	Aqua Algae (ПЖД), 2%	Aqua Algae (ПЖД), 4%	4,2	39,6
Soil Algae (порошок) + «V-Agro. Насіння»	«V-Agro. Листкова обробка»	«V-Agro. Листкова обробка»	4,0	37,7
Soil Algae (порошок)	«V-Agro. Листкова обробка»	«V-Agro. Листкова обробка»	3,8	35,8

Висновки. Найвищу врожайність сухого зерна кукурудзи отримано за проведення передпосівної обробки насіння нанобіостимулятором росту рослин «V-Agro. Насіння» та дворазової обробки вегетуючих рослин розчином концентрату продуктів життєдіяльності азотфіксуючої ґрунтової водорості.

Комбіноване застосування препарату «V-Agro. Насіння» та розчину концентрату продуктів життєдіяльності азотфіксуючої ґрунтової водорості забезпечує урожайність кукурудзи на рівні 16,1 т/га, що на 5,5 т/га, або на 51,9 % більше, ніж в абсолютному контролі (без оброблення насіння і без фоліарної обробки рослин).

Ефективним заходом є і окреме застосування препаратів, як для обробки насіння, так і обробки рослин під час вегетації. Одна тільки обробка насіння нанобіостимулятором росту рослин «V-Agro. Насіння» сприяє підвищенню урожайності кукурудзи на 1,6 т/га, або на 15,1%. Такий самий ефект отримано і при застосуванні для оброблення насіння біопрепарату Soil Algae, де прибавка до урожайності склала 14,1%, тобто 1,5 т/га.

Більш ефективним, ніж передпосівне оброблення насіння, є застосування препаратів для фоліарного внесення. Так, дворазове обприскування рослин кукурудзи, відповідно 2% та 4% розчином концентрату продуктів життєдіяльності азотфіксуючої ґрунтової водорості, сприяє підвищенню урожайності культури на 3,2 т/га, або на 30,2%, порівняно з контролем. А застосування нанобіостимулятора росту рослин «V-Agro. Листкова обробка» для фоліарного внесення забезпечило прибавку урожайності, яка склала 2,8 т/га, або 26,4%.

Найбільшу середню масу одного качана кукурудзи було отримано за використання агрозаходу, який передбачає передпосівну обробку насіння нанобіостимулятором росту рослин «V-Agro. Насіння» та дворазову обробку вегетуючих рослин розчином концентрату продуктів життєдіяльності азотфіксуючої ґрунтової водорості (робоча назва Aqua Algae або ПЖД), дало можливість отримати качан із середньою масою 248,4 г, тоді як в абсолютному контролі (без оброблення насіння і без фоліарної обробки рослин) – 174,5 г.

Бібліографія

1. Калінін Ф.Л. Застосування регуляторів росту в сільському господарстві. Київ : Урожай, 1989. 168 с.
2. Ефективність мікробних препаратів та макро- й мікродобрив при вирощуванні зернових культур в умовах ризикованого землеробства / В.В. Савранчук та ін.. *Вісник ЦНЗ АПВ Харківської області*. 2011. Вип. 11. С. 153–163.
3. Ткаленко Г. Біологічні препарати в захисті рослин. *Специвипуск Пропозиція. Сучасні агротехнології із застосування біопрепаратів та регуляторів росту*. 2015. С. 2–15 Режим доступу. <https://propozitsiya.com/ua/biologicheskie-preparaty-v-zashchite-rasteniy> Дата звернення 14.10.2021 р.
4. Лавриненко Ю.О., Гож О.А. Ріст і розвиток рослин гібридів кукурудзи ФАО 180-430 за впливу регуляторів росту і мікродобрив в умовах зрошення на півдні України. *Зрошуване землеробство. Херсон*. 2016. Вип. 65. С. 64–68.
5. Katsvario T.W. Spatial Growth and Nitrogen Uptake Variability of corn at two Nitrogen Levels / T.W. Katsvario, W.J. Cox, Van Es Harold M. *Agronomy Journal*. 2003. Vol. 95. P. 1000–1011.
6. Медико-біологічні дослідження виробничих штамів мікроорганізмів і токсико-гігієнічна оцінка мікробних препаратів, визначення їх безпеки та обґрунтування гігієнічних нормативів і регламентів. Методичні вказівки МОЗ України. Київ, 2004. Режим доступу. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0521282-04#Text> Дата звернення 14.10.2021 р.
7. Патица В.П. Напрями і координація наукових досліджень ґрунтової мікробіології. *Вісник аграрної науки*. 1996. № 6. С. 5–10.
8. Ромащенко М.І., Шатковський А.П., Усата Л.Г. Методичні рекомендації з проведення польових досліджень за краплинного зрошення. Київ : ІВПіМ НААН, 2014. 46 с.
9. Методика польового дослідження (Зрошуване землеробство). Ушкаренко В.О. та ін.. Херсон : Грін Д.С., 2014. 448 с.
10. Волкогон В. В., Надкернична О. В., Ковалевська Т. М. Мікробні препарати у землеробстві. Теорія і практика : монографія. Київ : Аграрна наука, 2006. 312 с.

References

1. Kalinin, F.L (1989). Zastosuvannia rehuliatoriv rostu v silskomu hospodarstvi [Application of growth regulators in agriculture] / Urozhai [in Ukrainian]

2. Savranchuk, V.V., Semenyaka, I.M., Kurcev, V.O., & Salo, L.V., (2011). Efektyvnist mikrobykh preparativ ta makro- y mikrodozuvannykh pry vyroshchuvanni zernovykh kultur v umovakh ryzykovanoho zemlerobstva. [The effectiveness of microbial drugs and macro- and microfertilizers in the cultivation of cereals in risky farming]. Bulletin of the Central Executive Committee of the APV of the Kharkiv region, 11, 153–163. [in Ukrainian]
3. Tkalenko, H. (2015). Biologichni preparaty v zakhysti roslyn. [Biological drugs in plant protection]. Spetsvypusk zh.Propozytsiia. Suchasni ahrotekhnolohii iz zastosuvannia biopreparativ ta rehuliatoriv rostu. 2–15. Retrieved from: <https://propozitsiya.com/ua/biologicheskie-preparaty-v-zashchite-rasteniy> [in Ukrainian]
4. Lavrinenko, Y.O., & Hozh, O.A. (2016). Rist i rozvytok roslyn hibrydiv kukurudzy FAO 180–430 za vplyvu rehuliatoriv rostu i mikrodozuvannykh v umovakh zroshennia na pivdni Ukrainy. [Growth and development of plants of FAO 180-430 maize hybrids under the influence of growth regulators and microfertilizers under irrigation conditions in the south of Ukraine]. Irrigated agriculture. Kherson, 65, 64–68. [in Ukrainian]
5. Katsvario, T.W., Cox, W.J., & Van Es Harold. (2003). Spatial Growth and Nitrogen Uptake Variability of corn at two Nitrogen Levels. Agronomy Journal, 95, 1000–1011.
6. Medyko-biologichni doslidzhennia vyrobnychkykh shtamiv mikroorhanizmv i toksyko-hihiienichna otsinka mikrobykh preparativ, vyznachennia yikh bezpeky ta obgruntuvannia hihiienichnykh normatyviv i rehlementiv. Metodychni vkazivky MOZ Ukrainy. [Medico-biological research of production strains of microorganisms and toxic-hygienic assessment of microbial preparations, determination of their safety and substantiation of hygienic standards and regulations]. (2004). MOZ Ukrainy. Kyiv. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0521282-04#Text> [in Ukrainian]
7. Patyka, V.P. (1996). Napriamy i koordynatsiia naukovykh doslidzen gruntovoi mikrobiolohii. [Directions and coordination of scientific research of soil microbiology] Visnyk ahrranoi nauky, 6, 5–10. [in Ukrainian]
8. Romashchenko, M.I., Shatkovskiy, A.P., & Usata, L.H. (2014). Metodychni rekomendatsii z provedennia polovykh doslidzen za kraplynnoho zroshennia. [Methodical recommendations for field studies on drip irrigation]. Kyiv : DIA. [in Ukrainian]
9. Ushkarenko, V.O., Vozhehova, R.A., Holoborodko, S.P., & Kokovikhin, S.V. (2014). Metodyka polovoho doslidu (Zroshuvane zemlerobstvo). [Methods of field experiment (Irrigated agriculture)] Kherson : Hrin D.S. 448. [in Ukrainian]
10. Volkohon, V.V., Nadkernychna, O.V., & Kovalevska, T.M. (2006). Mikrobnii preparaty u zemlerobstvi. Teoriia i praktyka : monohrafiia. [Microbial preparations in agriculture. Theory and practice : a monograph]. Kyiv : Ahrrarna nauka. [in Ukrainian]

В.Н. Белый. В.В. Кныш

Влияние препаратов биохимического и микробиологического происхождения на урожайность кукурузы на зерно на капельном орошении

Аннотация. Приведены результаты исследований по изучению влияния препаратов биохимического и микробиологического происхождения производства ООО «НПП «5 элемент» на ход продукционного процесса, структуру урожая и урожайность кукурузы при капельном орошении. Установлено, что наибольшую урожайность кукурузы можно получить при проведении предпосевной обработки семян нанобиостимулятором роста растений «V-Agro. Семена» и двукратной обработки вегетирующих растений раствором концентрата продуктов жизнедеятельности азотфиксирующей почвенной водоросли. Комбинированное применение препарата «V-Agro. Семена» и раствора концентрата продуктов жизнедеятельности азотфиксирующей почвенной водоросли обеспечивает урожайность кукурузы на уровне 16,1 т/га, что на 5,5 т/га, или на 51,9% больше, чем в абсолютном контроле (без обработки семян и без фоллиарной обработки растений). Установлено, что эффективной мерой является отдельное применение препаратов как для обработки семян, так и обработки растений в ходе вегетации. Однократная обработка семян нанобиостимулятором роста растений «V-Agro. Семена» способствует повышению урожайности кукурузы на 1,6 т/га, или на 15,1%. Аналогичный эффект получен и при применении для обработки семян биопрепарата Soil Algae (живая культура в форме порошка), где прибавка урожайности составила 14,1%, или 1,5 т/га. Определено, что более эффективным, чем предпосевная обработка семян, является применение препаратов для фоллиарного внесения. Так, двукратное опрыскивание растений кукурузы соответственно 2% и 4% раствором концентрата продуктов жизнедеятельности азотфиксирующей почвенной водоросли способствует повышению урожайности

культуры на 3,2 т/га, или на 30,2% по сравнению с контролем. Применение нанобиостимулятора роста растений «V-Agro. Листовая обработка» для фоллиарного внесения обеспечило прибавку урожайности, которая составила 2,8 т/га, или 26,4 %. Наибольшая средняя масса одного кочана кукурузы была получена при использовании агромероприятия, предусматривающего предпосевную обработку семян нанобиостимулятором роста растений «V-Agro. Семена» и двукратную обработку вегетирующих растений раствором концентрата продуктов жизнедеятельности азотфиксирующей почвенной водоросли, что позволило получить кочан со средней массой 248,4 г, тогда как в абсолютном контроле (без обработки семян и без фоллиарной обработки растений) – 174,5 г.

Ключевые слова: сельское хозяйство, кукуруза, капельное орошение, урожайность, структура урожая, стимуляторы роста и развития растений, иммуномодулятор, антистрессант

V. M. Bilyi, V. V. Knysh

Influence of preparations of biochemical and microbiological origin on the yield of corn for grain on drip irrigation

Abstract. The results of research on the study of the impact of agents of biochemical and microbiological origin of production LLP R&D Enterprise “5 Element” on the production process, the structure of yield and yield of corn under drip irrigation are highlighted. It is determined, that the highest yield of corn can be obtained by holding the pre-sowing treatment of seeds with nanobiostimulator of plant growth “V-Agro. Seeds” and the double treatment of vegetative plants with a solution of concentrate of products of vital activity of nitrogen-fixing soil algae. The combined use of the agent “V-Agro. Seeds” and the solution of concentrate of products of vital activity nitrogen-fixing soil algae provides a corn yield of 16,1 t/ha, which is by 5,5 t/ha, or 51,9% more than in the absolute control (without seed treatment and foliar treatment of plants). It is also established that the separate use of agents both for seed treatment and plant treatment during the growing season is also an effective measure. The single seed treatment with nanobiostimulator of plant growth “V-Agro. “Seeds” helps to increase the yield of corn by 1,6 t/ha, or by 15,1%. A similar effect was obtained using for processing seeds of the biological product Soil Algae (live culture in powder form), where the increase in yield was 14,1 % (1,5 t/ha). It is determined that the use of agents for foliar application is more effective than pre-sowing seed treatment. The double spraying of corn plants, with respectively, 2% and 4% solution of concentrate of products of vital activity of nitrogen-fixing soil algae provides crop yields by 3,2 t/ha, or 30,2% compared to the control. The use of nanobiostimulator of growth plants “V-Agro. Leaf processing” for foliar application provides the yield increase up to 2,8 t/ha, or 26,4%. The biggest average weight of one cob corn was obtained due to the agricultural measure, which involves pre-sowing seed treatment nanobiostimulator of plant growth “V-Agro. Seeds” and the double treatment of vegetative plants with a solution of concentrate of products of vital activity of nitrogen-fixing soil algae made it possible to get a cob with an average weight of 248,4 g, whereas in absolute control (without seed treatment and foliar treatment of plants) – 174,5 g.

Key words: agriculture, corn, drip irrigation, yield, crop structure, stimulators of plant growth and development, immunomodulatory, antistressant

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-302>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/302>

УДК 630.181:632.7:632.4:523.98

СУЧАСНИЙ СТАН СОСНОВИХ НАСАДЖЕНЬ КИЇВСЬКОГО ПОЛІССЯ ЗА ВПЛИВУ ЕКОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ

В.В. Мороз¹, канд. с.-г. наук, Ю.А. Никитюк², канд. с.-г. наук

¹ Поліський національний університет, Житомир, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-1457-4641>; e-mail: vera_moroz@ukr.net;

² Поліський національний університет, Житомир, Україна;
<https://orcid.org/0000-0001-9142-7699>, e-mail: andreyniks2@gmail.com

Анотація. У статті надано характеристику кліматичних змін у регіоні досліджень за період 1968–2020 рр. Встановлено, що за останні п'ятдесят дев'ять років спостерігається підвищення середньорічної температури повітря на 2,5 °С, зниження відносної вологості повітря на 6,0 % та середньорічної суми опадів на 5 мм. Згідно з проведеним аналізом визначено, що за період 2009–2020 рр. значної шкоди сосновим насадженням Київського Полісся завдають серед хвоєгризучих – звичайний сосновий пильщик (*Diprion pini* L.); серед інших шкідників – сосновий підкоровий клоп (*Aradus cinnamomeus* Panz), сосновий шовкопряд (*Dendrolimus pini* L.), соснова щитівка (*Leucaspis pusilla* Loew), сосновий зірчастий пильщик-ткач (*Acantholyda nemoralis* Matsumura). Також з'ясовано, що серед фітохвороб сосновим лісам значної шкоди за останні одинадцять років завдає *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref., пошкоджена площа становить від 12,8–15,9 тис. га. Згідно з проведеним гідротермічним аналізом району дослідження визначено, що 2009 р., 2015 р. характеризувалися як роки середньої посухи: 2010 р., 2016 р., 2017 р., 2020 р. – роки слабкої посухи; 2011–2014 рр., 2018 р., 2019 р. – роки достатнього вологозабезпечення. Проведений аналіз впливу числа *W* встановив, що у роки підвищеної сонячної активності чисельність фітошкідників зростає, а в роки мінімальної сонячної активності знижується. Згідно із статистичними показниками проведено аналіз кількості викидів CO₂ у навколишнє природне середовище за період 2009–2020 рр. і з'ясовано, що з 2012 р. кількість викидів діоксиду вуглецю зменшилася з 10,2 млн т до 3,7 млн т. Кореляційний аналіз усіх показників вказав взаємовплив між площею пошкоджених дерев ентомошкідниками та числом Вольфа, викидами CO₂ в оточуюче середовище, середньорічних сум опадів та гідротермічним коефіцієнтом зволоження Селянінова Г.Т. Також спостерігається кореляція між площею пошкоджених насаджень кореневою губкою та середньорічною температурою повітря, відотною вологістю повітря та викидами CO₂.

Ключові слова: зміни клімату, фітошкідники, фітохвороби, викиди CO₂, сонячна активність, гідротермічний коефіцієнт, кореляція, математичне моделювання

Актуальність. Кліматичні зміни в Україні мають більш інтенсивний характер порівняно з глобальними змінами у світі. Згідно з науковими дослідженнями Інституту зрошуваного землеробства НААН [2], Інституту захисту рослин НААН [5] і Інституту агро-екології і природокористування НААН [15] в Україні за період 1973–2016 рр. спостерігалось зростання середньорічної температури повітря на 2 °С, збільшення кількості опадів, які мали характер злив, а також посилення вітрового режиму. Такі зміни негативно впливають як на сільськогосподарські культури, так і деревні рослини.

Згідно з літературними джерелами в лісових біоценозах спостерігається масове всихання хвойних деревних рослин. Причинами загибелі соснових насаджень є – посилення антропогенного впливу на навколишнє природне середовище, кліматичні зміни, а саме збільшення

температури повітря, зменшення кількості опадів [20; 21; 26]. Окрім ослаблення деревних рослин спостерігається збільшення осередків ентомошкідників та фітохвороб [28; 30; 31].

Збереження лісів є дуже важливим, адже порівняно з іншими природними екосистемами лісові мають важливе кліматостабілізуюче значення і є природним каркасом для природних ландшафтів і зберігають під своїм наметом лісове біорізноманіття.

Зважаючи на те, що серед головних лісовтвірних порід в Україні сосна звичайна є переважуючою деревною породою і займає 33% площі земель лісового фонду України, соснові ліси потребують збереження. Різноманітні наукові дослідження з встановлення причин загибелі лісів сприятимуть вирішенню питань їх відновлення та примноження [16; 31; 35].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Починаючи з 2010 р. в Україні

спостерігається масове всихання низки головних лісоутворюючих деревних порід – сосна (*Pinus*), дуб (*Quercus*), ялина (*Picea*), береза (*Betula*) та ясен (*Fraxinus*). Подібна ситуація спостерігається на всіх континентах у лісових біоценозах зони помірного клімату Північної кулі [12–14]. Особливо катастрофічно склалася ситуація у хвойних лісах. Так, всихання хвойних порід у Північній Америці та Сибіру нараховує мільйони гектарів. Не краща ситуація і в Європі, де за останні 20 років спостерігається масове всихання сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) та ялини європейської (*Picea abies* (L.) H. Karst). Всихання головних лісотвірних порід у лісах північної кулі здебільшого мають подібні ознаки перебігу процесу і викликані спалахами масового розмноження подібних за своєю біологією стовбурових шкідників. Так, наприклад у Північній Америці останнім часом спостерігається масове розмноження дендроктону (*Dendroctonus micans* Kud), у Східній Азії уссурійського поліграфа (*Polygraphus proximus* Blandford), в Європі короїд-типографа (*Ips typographus* Linnaeus) і короїда верхівкового (*Ips acuminatus* Gyllenhal) [22; 34; 39]. Нематоди також завдають значної шкоди сосновим лісами [35]. Серед фітохвороб шкочочинну дію завдає сосні звичайній (*Pinus sylvestris* L.) гриб із класу базидіоміцетів – коренева губка (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.) [16; 30; 31].

Однчасне виникнення осередків всохлих деревних порід у багатьох державах та збільшення їх площ свідчить про глобальність процесів. Найбільш ймовірно, що це взаємопов'язано з циклічними планетарними процесами, які посилені антропогенним впливом і виражені у збільшенні температури повітря та зменшенні кількості опадів в останні десятиліття на більшій частині земної кулі [3; 11; 26].

Будь-які кліматичні зміни мають планетарний характер. У своїй науковій праці «Земное эхо солнечных бурь», яка була опублікована у 1976 р., професор О.Л. Чижевський звертав увагу на залежності активності сонця та періодичності спалаху епідемій, пандемій, епізоотій, епіфітій на Землі [19]. Італійській мікробіолог П. Фараоне (1995, Італія) досліджував закономірність зростання колоній бактерій у роки мінімуму кількості плям на сонці [17]. Пізніше вітчизняні науковці В.С. Мартинюк, Н.А. Темур'янц, Б.М. Владимирський [7] у своїй монографії «У природы нет плохой погоды: космическая погода в нашей жизни» підкресливали вплив сонячної активності на біоло-

гічні, соціальні та технологічні процеси. Жеребцов Г.О., Коваленко В.А., Молодих С.І., Кириченко К.Є. [4] у своїй науковій публікації «Влияние солнечной активности на температуру тропосферы и поверхности океана» встановили вплив глобальної температури повітря на концентрацію CO₂ і геомагнітну активність. Мельник П.П. [8] у своїй монографії виклав закономірності впливу сонячної активності на врожайність пшениці. Чернишов В.Б. зазначив вплив сонячної активності на життєдіяльність комах [18]. Іноземними авторами досліджено вплив сонячної активності на лісові пожежі в Південній Європі [23]. В.В. Лавний, В.Г. Мазепа [6] у своїх дослідженнях виявили прямий кореляційний взаємозв'язок між щорічними вітровалами та активністю сонця.

У своїх дослідженнях І. Dorotović, J. Louzada, J. Rodrigues, V. Karlovský вивчали вплив сонячної активності на ріст сосни [24], дослідники М.М. Radovanovic, Т.М. Pavlovic вивчали вплив сонячної активності на лісові пожежі в Південній Європі [20; 33; 37].

Донині опубліковано понад півсотні прогнозів 24-го циклу сонячної активності, де вказують значення максимального числа Вольфа від 42 до 190 [23; 32; 36].

Зміна гідрологічного режиму безпосередньо пов'язана із середньорічною температурою повітря, яка останніми роками в Україні зросла на 2°C. Однією з причин кліматичних змін є антропогенні чинники, а саме викиди парникових газів у навколишнє середовище. Гідрологічний чинник оцінюють за допомогою кількісного показника посушливості – гідротермічного коефіцієнта (ГТК) Селянінова [11], який використовують для оцінювання умов зволоження періоду із середньодобовими температурами, вищими за 10°C, тобто періоду активної вегетації. Адже вологозабезпеченість безпосередньо впливає на стан лісових насаджень [11; 21; 29].

Четвертим чинником, який спричиняє негативний вплив на довкілля внаслідок антропогенної діяльності (підприємства, автотранспорт) та природних явищ (виверження вулканів), є викиди діоксиду вуглецю в навколишнє середовище. У природних умовах вуглекислий газ є лімітувальним фактором фотосинтезу, але високі концентрації CO₂ (у десять разів і більше) витримують не всі рослини, оскільки припиняється ріст, сповільнюються інші фізіологічні процеси і настає стан анабіозу. Більш чутливі рослини пошкоджуються фітохворобами, крім того, на думку науковців P.G. Guerenstein, J.G. Hildebrand [27], В.П. Акатова [1],

A. Fangmeier [25], R.M. Srinivasa [38], збільшення концентрації вуглекислого газу сприяє розмноженню комах-шкідників.

У своїх попередніх дослідженнях ми частково почали аналізувати вплив різних чинників на стан деревних рослин [9; 10]. Нині є намір проаналізувати вищезазначені твердження для умов Київського Полісся.

Мета досліджень – з'ясувати вплив кліматичних, антропогенних чинників на ентомофауну та фітопатологію соснових насаджень Київського Полісся та встановити кореляційні взаємозв'язки між екологічними чинниками району дослідження.

Матеріали і методи досліджень. Для виконання поставленої мети нами було здійснено збір необхідної статистичної інформації, а саме: головного управління статистики Київської області; Українського гідрометеорологічного центру; Державного агентства лісових ресурсів України (Форма № 12-ЛГ); матеріали Інституту геофізики ім. Субботіна С.І. НАН України.

Для встановлення кількісного показника посушливості району дослідження використано формулу Селянінова Г.Т. [11]:

$$ГДК = \frac{\sum P}{0,1 \times \sum t_{акт > 10}} \quad (1)$$

де $\sum P$ – сума опадів за місяць, в мм; $\sum t$ – сума середньодобової температури вище 10°C .

Згідно з формулою (1), якщо ГДК $< 0,4$ – це дуже сильна посуха, ГДК $0,4-0,5$ – сильна посуха, ГДК $0,6-0,7$ – середня посуха, ГДК $0,8-0,9$ – слабка посуха, ГДК $1,0-1,5$ – достатньо волого, ГДК $> 1,5$ – надмірно волого.

Для визначення викидів парникових газів (CO_2) у навколишнє середовище були використані статистичні показники Державної служби статистики України.

Математичну та статистичну обробку результатів дослідження здійснювали за допомогою програми пакету аналізу даних *Microsoft Excel*.

Результати дослідження та їх обговорення. Для з'ясування кліматичних змін у Київському Поліссі, згідно з даними Українського гідрометеорологічного центру, проведено детальний аналіз температури повітря, кількості опадів та відносної вологості за період 1968–2020 рр.

Останнім часом в регіоні дослідження спостерігається зростання середньорічної температури повітря на $2,5^\circ\text{C}$ (рис. 1).

Кліматичні зміни також вплинули на відносну вологість повітря (рис. 2), за останні п'ятдесят дев'ять років вона знизилась на $6,0\%$.

Також спостерігається зменшення середньорічної кількості опадів на 5 мм (рис. 3).

Отже, аналіз кліматичних показників свідчить про суттєві зміни в регіоні дослідження, що має негативний вплив на біорізноманіття.

Нами проаналізовано звіти Державного агентства лісових ресурсів (Форма № 12 ЛГ «Звіт про проведення лісозахисних робіт») за 2009–2020 рр., та з'ясовано, що найбільшу шкодочинну дію сосновим насадженням Київського Полісся завдають:

- з хвоєгризучих – звичайний сосновий пильщик (*Diprion pini* L.);
- з інших – сосновий підкоровий клоп (*Aradus cinnamomeus* Panz), сосновий

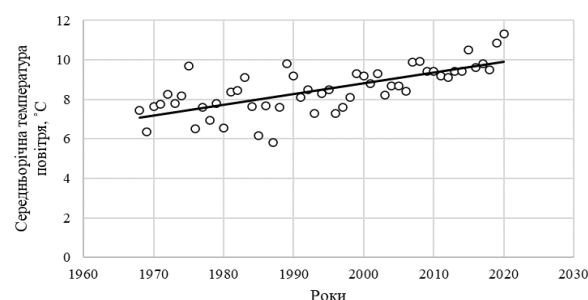


Рис. 1. Зміна середньорічної температури повітря в Київському Поліссі за період 1968–2020 рр.

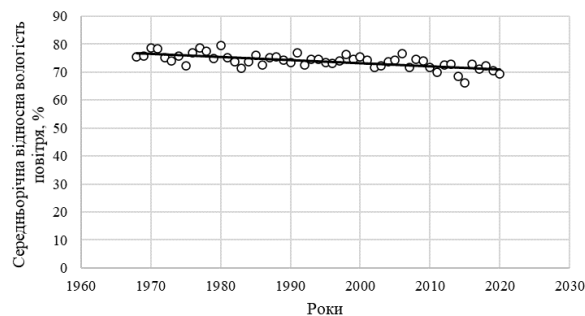


Рис. 2. Середньорічна відносна вологість повітря в Київському Поліссі за період 1968–2020 рр.

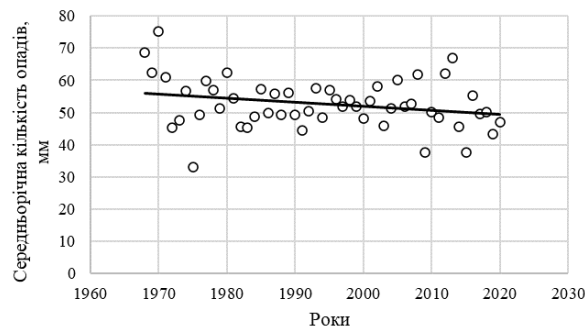


Рис. 3. Середньорічна сума опадів у Київському Поліссі за період 1968–2020 рр.

шовкопряд (*Dendrolimus pini* L.), соснова щітівка (*Leucaspis pusilla* Loew), сосновий зірчастий пильщик-ткач (*Acantholyda nemoralis* Matsumura) (табл. 1).

Згідно з табл. 1 найбільшу шкодочинну дію у період 2011–2013 рр. сосновим насадженням завдавав хвоєгризучий шкідник – звичайний сосновий пильщик (*Diprion pini* L.), площа становила – 62,7 тис. га у рік. За останні роки ця кількість значно зменшилась.

Соснові насадження Київського Полісся займають 61% (рис. 4) від інших деревних порід, за 12 років середнє значення пошкоджених ентомошкідниками вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок становила 16%

Вивчаючи динаміку активності сонця число Вольфа (Число W) за період 2009–2020 рр., привернуло увагу на те, що найбільша активність сонця спостерігалась у період 2011–2013 рр., починаючи з 2014 р. спостерігається зниження Числа W (рис. 5).

Аналізуючи вплив Числа W (рис. 5) на виникнення осередків шкідників (табл. 1),

нами помічена певна закономірність. У роки підвищеної сонячної активності 2011–2013 рр. спостерігається зростання осередків комах у соснових насадженнях, а в роки мінімальної сонячної активності з 2014 р. їх чисельність знижується.

При аналізі впливу Числа W на *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. така закономірність не спостерігається (рис. 6).

Застосовуючи формулу (1) Селянінова Г.Т. нами визначено зміну вологозабезпечення в умовах Київського Полісся за період 2009–2020 рр. (рис. 7).

Згідно з одержаними результатами аналізу 2009 р., 2015 р. характеризувалися як роки середньої посухи; 2010 р., 2016 р., 2017 р., 2020 р. – роки слабкої посухи; 2011–2014 рр., 2018 р., 2019 р. – роки достатнього вологозабезпечення.

Для з'ясування залежності між Числом W та викидами CO₂ у навколишнє природне середовище нами проведено аналіз викидів діоксиду вуглецю в дане середовище за період 2009–2020 р. (рис. 8).

1. Динаміка виникнення фітошкідників у соснових насаджень за період 2009–2020 рр., тис. га

Показники	<i>Diprion pini</i> L.	<i>Aradus cinnamomeus</i> Panz	<i>Dendrolimus pini</i> L.	<i>Leucaspis pusilla</i> Loew	<i>Acantholyda nemoralis</i> Matsumura
2009	5,32	–	–	–	–
2010	6,08	–	–	–	–
2011	62,7	–	–	0,05	–
2012	62,7	–	–	0,06	–
2013	62,7	–	–	0,06	–
2014	16,6	–	–	–	0,06
2015	–	–	–	0,06	–
2016	–	–	–	0,06	–
2017	–	–	–	0,06	–
2018	–	–	–	0,05	–
2019	0,115	0,429	0,380	–	–
2020	0,115	0,410	0,380	–	–

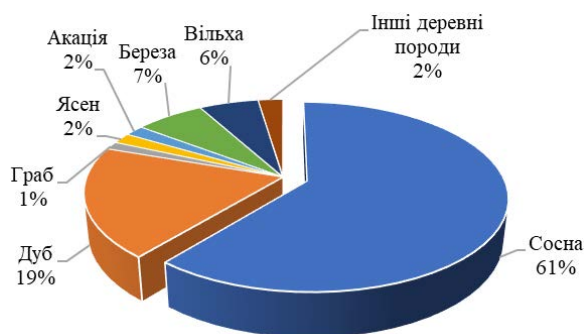


Рис. 4. Частка вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок за деревними породами в Київському Поліссі

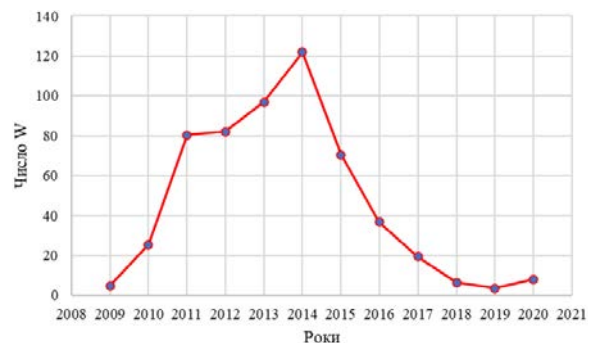


Рис. 5. Значення середньорічних чисел Вольфа за період 2010–2020 рр.

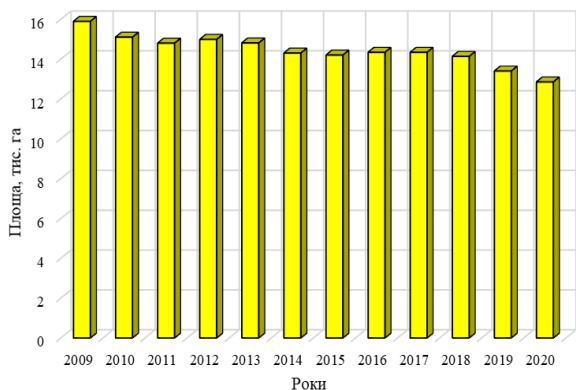


Рис. 6. Динаміка виникнення кореневої губки за період 2009–2020 рр.

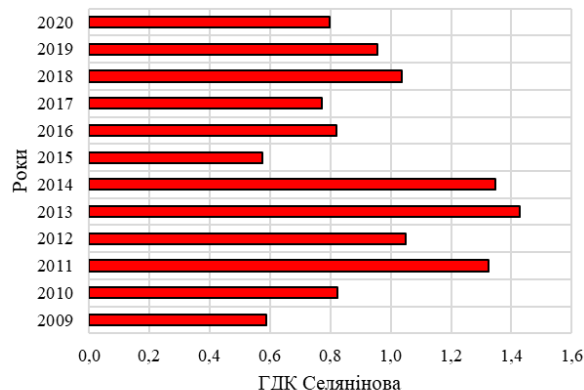


Рис. 7. Гідротермічний коефіцієнт Г.Т. Селянінова

Згідно з даними, представленими на рис. 8, слід зауважити, що з 2012 р. кількість викидів CO₂ знизилась майже в три рази.

Для встановлення кореляційних взаємозв'язків між площею виникнення ентомошкідників та кореневої губки, викидами CO₂, числом W, ГДК Селянінова Г.Т. та середньорічною температурою повітря, середньорічною відносною вологістю повітря, середньорічною сумою опадів застосовано пакет аналізу даних Microsoft Excel та побудовано кореляційну матрицю (табл. 2).

Згідно з одержаними результатами аналізу показників можна зробити висновок про залежність між показниками: площею пошкоджених дерев ентомошкідниками, числом

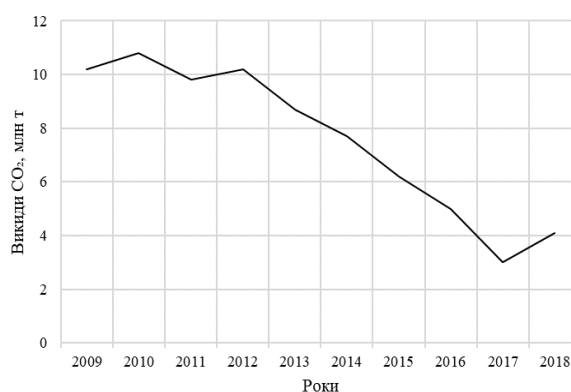


Рис. 8. Викиди CO₂ в навколишнє природне середовище за період 2009–2020 рр. (Згідно з даними головного управління статистики Київської області)

2. Кореляційна матриця парних коефіцієнтів

Показники	Площа пошкоджених дерев ентомошкідниками, тис. га	Площа пошкоджених дерев кореневою губкою, тис. га	Число W	Середньорічна температура повітря, °С	Середньорічна відносна вологість повітря, %	Середньорічна сума опадів, мм	Гідротермічний коефіцієнт зволоження Г.Т. Селянінова	Викиди CO ₂ , млн т
Площа пошкоджених дерев ентомошкідниками, тис. га	1,0	–	–	–	–	–	–	–
Площа пошкоджених дерев кореневою губкою, тис. га	0,376	1,0	–	–	–	–	–	–
Число W	0,669	0,224	1,0	–	–	–	–	–
Середньорічна температура повітря, °С	–0,537	–0,823	–0,436	1,0	–	–	–	–
Середньорічна відносна вологість повітря, %	0,194	0,529	–0,304	–0,536	1,0	–	–	–
Середньорічна сума опадів, мм	0,641	0,118	0,365	–0,428	0,484	1,0	–	–
Гідротермічний коефіцієнт зволоження Г.Т. Селянінова	0,712	0,011	0,663	–0,413	0,067	0,577	1,0	–
Викиди CO ₂ , млн т	0,609	0,785	0,439	–0,636	0,267	0,165	0,255	1,0

Вольфа, середньорічною сумою опадів, викидами CO₂ в навколишнє середовище та гідротермічним коефіцієнтом зволоження Селянінова Г.Т. (0,669, 0,641, 0,712, 0,609).

Також існує кореляційний зв'язок між площею пошкоджених дерев кореневою губкою, середньорічною температурою повітря, середньорічною відносною вологістю повітря та викидами CO₂ (-0,823, 0,529, 0,785).

Висновки. В умовах Київського Полісся спостерігаються кліматичні зміни, а саме: зростання середньорічної температури повітря на 2,5 °С, зниження середньорічної відносної вологості повітря на 6,0% і середньорічної суми опадів на 5 мм.

З'ясовано, що найбільшу шкодочинну дію сосновим насадженням Київського Полісся завдають: звичайний сосновий пильщик (*Diprion pini* L.), сосновий підкоровий

клоп (*Aradus cinnamomeus* Panz), сосновий шовкопряд (*Dendrolimus pini* L.), соснова щітівка (*Leucaspis pusilla* Loew), сосновий зірчастий пильщик-ткач (*Acantholyda nemoralis* Matsumura), а серед фітохвороб значної шкоди завдає – *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.

Проведений аналіз екологічних показників за період 2010–2020 рр. підтвердив наукову гіпотезу дослідників щодо впливу числа Вольфа, середньорічних сум опадів, викидів CO₂ в навколишнє середовище та гідротермічного коефіцієнту зволоження Селянінова Г.Т. на розповсюдження ентомошкідників у соснових насадженнях Київського Полісся. А також нами виявлений зв'язок парних коефіцієнтів кореляції між кореневою губкою, середньорічною температурою повітря, середньорічною відносною вологістю повітря та викидами CO₂.

Бібліографія

- 1 Акатов П.В., Реакция растений на рост концентрации углекислого газа в атмосфере. *Живые и биокосные системы*. 2013. № 5. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue-5/article-14>
2. Вожегова Р.А. Адаптація землеробства степової зони до умов підвищення посушливості клімату, 2012. URL: <http://unt.org.ua/adaptats-ya-zemlerobstva-stepovo-zoni-do-umov-rdvishchennya-posushlivost-kl-matu/>
3. Дідух Я.П. Екологічні аспекти глобальних змін клімату: причини, наслідки, дії. *Вісник НАН України*, 2009. № 2. С. 34–44.
4. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И., Кириченко К.Е. Влияние солнечной активности на температуру тропосферы и поверхности океана. Иркутск: *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2013. Т. 6. № 1. С. 61–79.
5. Козак Г.П. Вплив екологічних чинників на стан популяцій комах-фітофагів озимої пшениці в Лісостепу України: дис. ... канд. с.-г. наук : 03.00.16. / Інститут захисту рослин УААН. Київ, 2006. 159 с.
6. Лавний В.В., Мазепа В.Г. Вплив сонячної активності на вітровали і буреломи лісу в Українських Карпатах. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2013. Вип. 23.3. С. 97–103.
7. Мартынюк В.С., Темурьянц Н.А., Владимирский Б.М. У природы нет плохой погоды: космическая погода в нашей жизни. Киев : Издатель В.С. Мартынюк, 2008. 212 с.
8. Мельник П.П. Еколого-економічні основи управління природокористуванням в агроєко-системах. Київ : ДАІ, 2016. 328 с.
9. Мороз В.В., Воробйова О.В. Вплив активності сонця на виникнення осередків ентомошкідників у Житомирському Поліссі. *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2020. Т. 2. № 51. С. 18–21.
10. Мороз В.В., Никитюк Ю.А. Вплив сонячної активності, вологозабезпечення та діоксиду вуглецю на загибель лісових насаджень. *Danish scientific journal*. 2020. Т. 2. № 34. С. 8–14.
11. Семенова И.Г. Оценка засушливых условий на Украине в конце XX – в начале XXI столетия. *Вестник Балтийского федерального университета им. Канта*. 2014. Вып 2. С. 20–29.
12. Симоненкова В.А. Анализ возникновения и развития вспышек массового размножения основных листогрызущих вредителей. Оренбург. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2011. № 2(30). С. 242–244.
13. Симоненкова В.А. Многомерный регрессионный анализ связи площади очагов насекомых-вредителей с эколого-климатическими факторами. Оренбург. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2011. № 3(31). С. 292–295.
14. Симоненкова В.А. Обоснование регрессионной модели для оценки площади очагов насекомых-вредителей. Оренбург. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2011. № 4(32). С. 276–280.

15. Тараріко О.Г., Ільєнко Т.В., Кучма Т.Л. Вплив змін клімату на продуктивність та валові збори зернових культур: аналіз та прогноз. *Український географічний журнал*, 2016. № 1. С. 14–22.
16. Усцький І.М., Михайліченко О.А., Дишко В.А. Спадкові ознаки стійкості кореневої губки сіянців сосни, вирощених із насіння дерев в осередках усихання. *Ukrainian journal of forest and wood science*. 2020. Vol. 11, № 1, С. 78–86. doi:10.31548/forest2020.01.078
17. Фараоне П. Ежедневные наблюдения (1970–1992 гг.) флуктуаций частоты появления секторной структуры в колониях бактерий, отобранных из окружающего воздуха и из культур *S. aureus*. *Биофизика*. 1995. Т. 40, № 4. С. 786–792.
18. Чернышев В.Б. Солнечная активность и насекомые. *Проблемы космической биологии*. 1989. С. 215–224.
19. Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. Москва : Издательство «Мысль», 1976. 367 с.
20. Шуныкина Е.А. Оценка влияния климатических изменений на возникновения и распространение лесных пожаров на Северо-Западе России. *Лесохозяйственная информация*. 2015. № 4. С. 39–45.
21. Яворський П.П. Вплив змін клімату на лісові екосистеми. Лісове і садово-паркове господарство. 2015. № 6. URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Lis/article/view/9995>
22. Bentz, B.J., Régnière, J., Fettig, Ch.J., Hansen, E.M., Hayes, J.L., Hicke, J.A., Kelsey, R.G., Negrón, J.F., Seybold S.J. (2010). Climate Change and Bark Beetles of the Western United States and Canada: Direct and Indirect Effect. *BioScience*. Vol. 60, № 8, 602–613. doi: 10.1525/bio.2010.60.8.6. [in United States]
23. Clilverd M. A., Clarke E., Ulich T., et al. Predicting solar cycle 24 and beyond. *Space weather*. 2006. № 4. S09005. doi:10.1029/2005SW000207
24. Dorotovič I., Louzada J., Rodrigues J., Karlovský V. Impact of solar on the growth of pine trees: case study. *Eur J Forest Res*. 2014. 133. P. 639–648. doi: 10/1007/s10342-014-0792-8
25. Fangmeier A. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on insects and pathogens of spring wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Triso) and oilseed rape (*Brassica napus* cv. Campino). (Doctoral dissertation, University of Hohenheim, Poltava, Ukraine). 2012. 94 p.
26. Getmanchuk, A., Kychylyuk, O., Voytyuk, V., Borodavka V. (2017). The Regional Changes of Climate as Primary Causes of Strong Withering of Pine Stands in Volyn Polissya. *Scientific Bulletin of UNFU*. 27(1), 120–124. doi: 10.15421/40270127 [in Ukrainian]
27. Guerenstein P.G., Hildebrand J.G. Roles and effects of environmental carbon dioxide in insect life. *Ann Rev Entomol*. 2008. № 53. С. 161–78. doi:10.1146/annurev.ento.53.103106.093402
28. Hrunyk N.I., Yusypovych Yu.M., Kovaleva V.A., Gout R.T. Heterobasidion annosum root rot infection development in scots pine and evaluation of the expression levels of lipid transfer protein and defensins in infected tissues. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015. Вип. 25.8. pp. 25–32. doi: 10.15421/40250803
29. Jactel H. Petit J., Desprez-Loustau M. I. et al. Drought effect on damage by forest insects and pathogens: A meta-analysis. *Global Change Biology*. 2012. № 18(1). P. 267–276.
30. Levchenko V., Martenuk G., Pasichnyk I., Maksymova T. Pathological process of root sponge of pine in the conditions of forest edatops and climate change state enterprise «Zarichanske forestry». *Paradigm of Knowledge*. 2020 № 5(43). doi: 10.26886/2520-7474.5(43)2020.2
31. Levchenko V.B., Shulga I.V., Zalewski R.A. Entomologizes factory in the process of spreading common pine root sponge under the conditions of ship timber forestry of state enterprise “Zhytomyr Forestry”. *Innovative solutions in modern science*. 2017. № 1(20). doi: 10.26886/2414-634x.1(20)2018.2.
32. Li K.-J., Gao P.-X., Su T.-W. Estimating the size and timing of the maximum amplitude of solar cycle 24. *Chin. J. Astron. and Astrophys*. 2005. №5, P. 539–545. doi: 10.1088/1009-9271/5/5/011
33. Milan M., Tomislav M. et al. The influence of solar activities on occurrence of the forest fires in South Europe. *Thermal science*. 2015, Vol. 19, No. 2, pp. 435–446. doi: 10.2298/TSCI130930036R
34. Muller, J., Bubler H., Gobner, M., Rettelbach, T., Duelli P. (2008). The European spruce bark beetle *Ips typographus* in a national park: from pest to keystone species. *Biodiversity and Conservation*. 17(12), 2979–3001. doi: 10.1007/s10531-008-9409-1. [in Switzerland]
35. Ozair M., Hussain T., Aslam A., Anees R., Tanveer M., Gomez-Aguilar J.F. Management of pine forests by assessment of insect pests and nematodes. *The European Physical Journal Plus*. 2021, Vol. 136.

36. Pesnell W.D. Predictions of solar cycle 24. *Solar Phys.* 2008. № 252. P. 209–220. doi: 10.1007/s11207-008-9252-2
37. Radovanović M.M., Pavlović T.M., Stanojević G.B., Milanović M.M., Pavlović M.A., Radivojević A.R. The Influence of Solar Activities on Occurrence of the forest fires in South Europe. *Thermal Science.* 2015, Vol. 19, № 2, pp. 435–446.
38. Srinivasa Rao M., Manimanjari D., Vanaja M., Rama Rao C. A., Srinivas K., Rao VUM, Venkateswarlu B. Impact of elevated CO₂ on tobacco caterpillar, *Spodoptera litura* on peanut, *Arachis hypogea*. *Journal of Insect Science.* 2012. Vol. 12. Article 103. P. 1–10.
39. Wermelinger B. (2004). Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus* – review of recent research. *Forest Ecology and Management.* Vol. 202. 67–82. doi: 10.1016/j.foreco.2004.07.018 [in United States]

References

1. Akatov, P.V. (2013). Reaktsiya rasteniy na rost kontsentratsii uglekislogo gaza v atmosfere [Response of plants to rising of atmospheric carbon dioxide]. *Living and Bioinert Systems*, 5. Retrieved from <http://www.jbks.ru/archive/issue-5/article-14> [in Russian]
2. Vozhegova, R.A. (2012). Adaptatsiya zemlerobstva stepovoyi zony do umov pidvyshchennya posushlyvosti klimatu [Adaptation of agriculture of the steppe zone to the conditions of increasing aridity of the climate]. Retrieved from: <http://unt.org.ua/adaptats-ya-zemlerobstva-stepovo-zonido-umov-p-dvishchennya-posushlivost-kl-matu> [in Ukrainian]
3. Didukh, Ya.P. (2009). Ekolohichni aspekty hlobal'nykh zmin klimatu: prychny, naslidky, diy. [Ecological aspects of the global climate changes: Reasons, consequences and actions]. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2, 34–44. [in Ukrainian]
4. Zhrebtsov, G.A., Kovalenko, V.A., Molodykh, S.I., & Kirichenko, K.E. (2013). Vliyaniye solnechnoy aktivnosti na temperaturu troposfery i poverkhnosti okeana. [Influence of solar activity on temperature of the troposphere and ocean surface]. *Bulletin of the Irkutsk State Agrarian University. Series "Earth Sciences"*, 6(1), 61–79. [in Russian]
5. Kozak, G.P. (2006). Vplyv ekolohichnykh chynnykiv na stan populyatsiy komakh-fitofahiv ozymoyi pshenytsi v Lisostepu Ukrayiny [Influence of ecological factors on the state of winter wheat phytophagous populations in the Forest-Steppe of Ukraine] (*Candidate's thesis*. National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Kyiv. [in Ukrainian]
6. Lavniy, V.V., & Mazepa, V.H. (2012). Vplyv sonyachnoyi aktyvnosti na vitrovaly i burelomy lisu v Ukrayins'kykh Karpatakh. [Influence of solar activity on forest windthrows and windfalls in the Ukrainian Carpathians]. *Scientific Bulletin of UNFU*, 23.3, 97–103. [in Ukrainian]
7. Martynyuk, V.S., Temuryants, N.A., & Vladimirsky, B.M. (2008). U prirody net plokhoy pogody: kosmicheskaya pogoda v nashey zhizni. [Nature does not have bad weather: Space weather in our life]. Kyiv : Publisher V.S. Martynyuk. [in Russian]
8. Melnyk, P.P. (2016). Ekoloho-ekonomichni osnovy upravlinnya pryrodokorystuvanniam v ahroekosystemakh. [Ecological and economic bases of environmental management in agroecosystems]. Kyiv : DAI. [in Ukrainian]
9. Moroz, V.V., & Vorobyova, O.V. (2020). Vplyv aktyvnosti sontsya na vynyknennya oseredkiv entomoshkidnykiv u Zhytomyrs'komu Polissi. [The effects of solar activity on the occurrence of insect persts sites in Zhytomyr Polissya]. *Norwegian Journal of Development of the International Science*, 2(51), 18–21. [in Ukrainian]
10. Moroz, V.V., & Nikityuk, Yu.A. (2020). Vplyv sonyachnoyi aktyvnosti, volohozabezpechennya ta dioksydu vuhletsyu na zahybel' lisovykh nasadzhen' [The effects of solar activity, moisture supply, and carbon dioxide on Ukrainian forest plantation death]. *Danish Scientific Journal*, 2(34), 8–14. [in Ukrainian]
11. Semenova, I.G. (2014). Otsenka zasushlyvykh usloviy na Ukraine v kontse XX – v nachale XXI stoletiya. [An assessment of drought conditions in Ukraine in the end of the 20th the beginning of the 21st centuries]. *Bulletin of the Immanuel Kant Baltic Federal University*, 1, 20–29. [in Russian]
12. Simonenkova, V.A. (2011). Analiz vozniknoveniya i razvitiya vspyshek massovogo razmnozheniya osnovnykh listogryzushchikh vreditel' [Analysis of the occurrence and development of outbreaks of mass reproduction of the main leaf-eating pests]. *Bulletin of the Orenburg State Agrarian University*, 2(30), 242–244. [in Russian]
13. Simonenkova, V.A. (2011). Mnogomernyy regressionnyy analiz svyazi ploshchadi ochagov nasekomykh vreditel' s ekologo-klimaticheskimi faktorami. [Multivariate regression analysis of the

relationship between the area of foci of insect pests and ecological and climatic factors]. *Bulletin of the Orenburg State Agrarian University*, 3(31), 292–295. [in Russian]

14. Simonenkova, V.A. (2011). Obosnovaniye regressionnoy modeli dlya otsenki ploshchadi ochagov nasekomykh-vrediteley. [Substantiation of the regression model for assessing the area of foci of insect pests]. *Bulletin of the Orenburg State Agrarian University*, 4(32), 276–280. [in Russian]

15. Tarariko, O.H., Iliencko, T.V., & Kuchma, T.L. (2016). Vplyv zmin klimatu na produktyvnist' ta valovi zbory zernovykh kul'tur: analiz ta prohnoz [The impact of climate change on productivity and gross harvest of grain crops: Analysis and forecast]. *Ukrainian Geographical Journal*, 1, 14–22. [in Ukrainian]

16. Ustskiy, I.M., Mikhailichenko, O.A., & Dyshko, V.A. (2020). Spadkovi oznaky stiykosti korenevoyi hubky siyantsiv sosny, vyroshchennykh iz nasynnya derev v oseredkakh usykhannya [Hereditary characters resistance to heterobasidion annosum resistance of pine seedlings grown from tree seeds in the disease foci]. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 11(1), 78–86. doi: 10.31548/forest2020.01.078

17. Faraone, P. (1995). Yezhednevnyye nablyudeniya (1970–1992 gg.) fluktuatsiy chastoty poyavleniya sektornoy struktury v koloniyakh bakteriy, otobrannykh iz okruzhayushchego vozdukhha i iz kul'tur *S. aureus* [Daily observations (1970–1992) of fluctuations in frequency of occurrence of a sector structure in bacterial colonies selected from open air and from *S. aureus* cultures]. *Biofizika*, 40(4), 786–792. [in Russian]

18. Chernyshev, V.B. (1989). Solnechnaya aktivnost' i nasekomye. [Solar activity and insects]. *In Space biology problems* (pp. 215–224). Leningrad : Nauka. [in Russian]

19. Chizhevsky, A.L. (1976). Zemnoye ekho solnechnykh bur' [Earth echo of solar storms]. Moscow : Mysl. [in Russian]

20. Shunkina, E.A. (2015). Otsenka vliyaniya klimaticheskikh izmeneniy na vozniknoveniya i rasprostraneniye lesnykh pozharov na Severo-Zapade Rossii [Estimation the impact of climatic change on the emergence and spread of forest fires in the North-West of Russia]. *Forestry Information*, 4, 39–45. [in Russian]

21. Yavorskiy, P.P. (2015). Vplyv zmin klimatu na lisovi ekosystemy. Lisove i sadovoparkove hospodarstvo [Impact of climate change on forest ecosystems]. *Forestry and Landscape Gardening*, 6. [in Ukrainian]

22. Bentz, B.J., Régnière, J., Fettig, Ch.J., Hansen, E.M., Hayes, J.L., Hicke, J.A., Kelsey, R.G., Negrón, J.F., & Seybold, S.J. (2010). Climate change and bark beetles of the Western United States and Canada : Direct and indirect effect. *BioScience*, 60(8), 602–613. doi: 10.1525/bio.2010.60.8.6. [in English]

23. Clilverd, M.A., Clarke, E., Ulich, T., Rishbeth, H., & Jarvis, M.J. (2006). Predicting solar cycle 24 and beyond. *Space weather*, 4, S09005. doi: 10.1029/2005SW000207 [in English]

24. Dorotovič, I., Louzada, J., Rodrigues, J., & Karlovský, V. (2014). Impact of solar on the growth of pine trees: a case study. *European Journal of Forest Research*, 133, 639–648. doi: 10/1007/s10342-014-0792-8 [in English]

25. Fangmeier, A. (2012). *Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on insects and pathogens of spring wheat (Triticum aestivum L. cv. Triso) and oilseed rape (Brassica napus cv. Campino)*. (Doctoral dissertation, University of Hohenheim, Poltava, Ukraine). [in English]

26. Getmanchuk, A., Kychylyuk, O., Voytyuk, V., & Borodavka, V. (2017). The regional changes of climate as primary causes of strong withering of pine stands in Volyn Polissya. *Scientific Bulletin of UNFU*, 27(1), 120–124. doi: 10.15421/40270127 [in English]

27. Guerenstein, P.G., & Hildebrand, J.G. (2008). Roles and effects of environmental carbon dioxide in insect life. *Annual Review of Entomology*, 53, 161–78. doi: 10.1146/annurev.ento.53.103106.093402. [in English]

28. Hrunyk, N.I., Yusyrovych, Yu.M., Kovaleva, V.A., & Gout, R.T. (2015). Heterobasidion annosum root rot infection development in scots pine and evaluation of the expression levels of lipid transfer protein and defensins in infected tissues. *Scientific Bulletin of UNFU*, 25(8), 25–32. doi: 10.15421/40250803 [in English]

29. Jactel, H., Petit, J., Desprez-Loustau, M.-L., Delzon, S., Piou, D., Battisti, A., & Koricheva, J. (2012). Drought effect on damage by forest insects and pathogens: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 18(1), 267–276. [in English]

30. Levchenko, V., Martenuk, G., Pasichnyk, I., & Maksymova, T. (2020). Pathological process of root sponge of pine in the conditions of forest edatops and climate change state enterprise “Zarichanske forestry”. *Paradigm of Knowledge*, 5(43). doi: 10.26886/2520-7474.5(43)2020.2 [in English]

31. Levchenko, V.B., Shulga, I.V., & Zalewski, R.A. (2017). Entomologizes factory in the process of spreading common pine root sponge under the conditions of ship timber forestry of state enterprise "Zhytomyr Forestry". *Innovative Solutions in Modern Science*, 1(20). doi: 10.26886/2414-634x.1(20)2018.2 [in English]
32. Li, K.-J., Gao, P.-X., & Su, T.-W. (2005). Estimating the size and timing of the maximum amplitude of solar cycle 24. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 5, 539–545. doi: 10.1088/1009-9271/5/5/011 [in English]
33. Radovanović, M.M., Pavlović, T.M., Stanojević, G.B., Milanović, M.M., Pavlović, M.A., & Radivojević, A.R. (2015). The influence of solar activities on occurrence of the forest fires in South Europe. *Thermal Science*, 19(2), 435–446. doi: 10.2298/TSCI130930036R [in English]
34. Muller, J., Bubler H., Gobner, M., Rettelbach, T., & Duelli, P. (2008). The European spruce bark beetle *Ips typographus* in a national park: from pest to keystone species. *Biodiversity and Conservation*, 17(12), 2979–3001. doi: 10.1007/s10531-008-9409-1 [in English]
35. Ozair, M., Hussain, T., Aslam, A., Anees, R., Tanveer, M., & Gomez-Aguilar, J.F. (2021). Management of pine forests by assessment of insect pests and nematodes. *European Physical Journal Plus*, 107, 2411–2502 [in English]
36. Pesnell, W.D. (2008). Predictions of solar cycle 24. *Solar Phys*, 252, 209–220. doi: 10.1007/s11207-008-9252-2 [in English]
37. Radovanović, M.M., Pavlović, T.M., Stanojević, G.B., Milanović, M.M., Pavlović, M.A., & Radivojević, A.R. (2015). The influence of solar activities on occurrence of the forest fires in South Europe. *Thermal Science*, 19(2), 435–446. [in English]
38. Srinivasa Rao, M., Manimanjari, D., Vanaja, M., Rama Rao, C.A., Srinivas, K., Rao, V., & Venkateswarlu, B. (2012). Impact of elevated CO₂ on tobacco caterpillar, *Spodoptera litura* on peanut, *Arachis hypogea*. *Journal of Insect Science*, 12, article number 103. [in English]
39. Wermelinger, B. (2004). Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus* – review of recent research. *Forest Ecology and Management*, 202, 67–82. doi: 10.1016/j.foreco.2004.07.018 [in English]

В. В. Мороз, Ю. А. Никитюк

Современное состояние сосновых насаждений Киевского Полесья при влиянии экологических факторов

Аннотация. В статье приведена характеристика климатических изменений в регионе исследований за период 1968–202 гг. Установлено, что за последние пятьдесят девять лет наблюдается повышение среднегодовой температуры воздуха на 2,5°C, снижение относительной влажности воздуха на 6,0% и среднегодовой суммы осадков на 5 мм. Согласно проведенному анализу определено, что за период 2009–2020 гг. значительный ущерб сосновым насаждениям Киевского Полесья наносят среди хвоегрызущих – обычный сосновый пильщик (*Diprion pini* L.); среди других вредителей – сосновый подкоровой клоп (*Aradus cinnamomeus* Panz), сосновый шелкопряд (*Dendrolimus pini* L.), сосновая щитовка (*Leucaspis pusilla* Loew), сосновый звездчатый пилильщик-ткач (*Acantholyda nemoralis* Matsumura). Также выяснено, что среди фитоболезней сосновым лесам значительный ущерб за последние одиннадцать лет наносит *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref., поврежденная площадь составляет от 12,8–15,9 тыс. га. Согласно проведенному гидротермическому анализу района исследования определено, что в 2009 г., 2015 г. характеризовались как годы средней засухи: 2010 г., 2016 г., 2017 г., 2020 г. – годы слабой засухи; 2011–2014 гг., 2018 г., 2019 г. – годы достаточного влагообеспечения. Проведенный анализ влияния числа *W* установил, что в годы повышенной солнечной активности численность фитовредителей возрастает, а в годы минимальной солнечной активности снижается. Согласно статистическим показателям проведен анализ количества выбросов CO₂ в окружающую среду за период 2009–2020 гг. и выяснено, что с 2012 г. количество выбросов диоксида углерода уменьшилось с 10,2 млн т до 3,7 млн т. Корреляционный анализ всех показателей указал на взаимовлияние площади поврежденных деревьев энтомоповреждителями и числом Вольфа, выбросами CO₂ в окружающую среду, среднегодовых сумм осадков и гидротермическим коэффициентом увлажнения Селянинова Г.Т. Также наблюдается корреляция между площадью поврежденных насаждений корневой губкой и среднегодовой температурой воздуха, относительной влажностью воздуха и выбросами CO₂.

Ключевые слова: изменения климата, фитовредители, фитоболезни, выбросы CO₂, солнечная активность, гидротермический коэффициент, корреляция, математическое моделирование

V.V. Moroz, Yu. A. Nykytyuk

Current condition of pine plantations of Kyiv Polissya under the influence of environmental factors

Abstract. The article describes the climate change in the study region for the period 1968–2020. It was specified that over the past fifty-nine years there has been an increase in average annual air temperature by 2,5°C, a decrease in relative humidity by 6,0% and average annual rainfall by 5 mm. According to the analysis, it was determined that during the period 2009–2020 significant damage to pine plantations of Kyiv Polissya is caused by the pests like common pine sawfly (*Diprion pini* L.), pine bark beetle (*Aradus cinnamomeus* Panz), pine silkworm (*Dendrolimus pini* L.), pine weevil (*Leucaspis pusilla* Loew), and pine star weaver (*Acantholyda nemoralis* Matsumura). *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. has also caused a significant damage to pine forests over the past eleven years; the damaged area is of 12,8–15,9 thousand hectares.

According to the hydrothermal analysis of the study area, it was determined that 2009 and 2015 were characterized as years of medium drought; 2010, 2016, 2017, 2020 were the years of low drought; 2011–2014, 2018, 2019 were the years of sufficient moisture supply. The analysis of the number *W* influence found that in the years of increased solar activity the number of phytopests increases, while in the years of minimal solar activity it decreases. Based on the statistical indicators, the analysis of CO₂ emissions into the environment for the period 2009–2020 and it was found that since 2012 the amount of carbon dioxide emissions has decreased from 10,2 million tons to 3.7 million tons. Correlation analysis of all indicators showed the interaction between the area of damaged trees by insect pests and the Wolf number, CO₂ emissions into the environment, average annual precipitation amounts and hydrothermal moisture coefficient of Selyaninov G.T. There is also a correlation between the area of damaged plantations by pine fungus and the average annual air temperature, relative humidity and CO₂ emissions.

Key words: climate change, phyto-pests, phyto-diseases, CO₂ emissions, solar activity, hydrothermal coefficient, correlation, mathematical modeling

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-308>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/308>

УДК 551.583:631.1:556.182

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗРОШЕННЯ ЗАЛЕЖНО ВІД ВАРТОСТІ ВОДИ

М.І. Ромащенко¹, докт. техн. наук, Р.В. Сайдак², канд. с.-г. наук, Т.В. Матяш³, канд. техн. наук, М.В. Яцюк⁴, канд. геогр. наук

¹ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-9997-1346>; e-mail: mi.romashchenko@gmail.com ;

² Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-0213-0496>; e-mail: saidak_r@ukr.net;

³ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0003-1225-086X>; e-mail: t.v.matiash@gmail.com;

⁴ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-5535-715X>; e-mail: mv_yatsiuk@ukr.net

Анотація. *Викладено аналітичний огляд щодо досягнутих рівнів урожайності сільськогосподарських культур на зрошенні в дослідних та виробничих умовах. Наразі кращий виробничий досвід використання зрошуваних земель свідчить, що за умови дотримання всіх агротехнічних вимог урожайність ранніх зернових культур сягає 8–10 т/га, кукурудзи – 10–14 т/га, олійних культур – 4–6 т/га, овочевих культур – понад 60 т/га, що становить близько 90% від їх продуктивності, досягнутої в дослідних наукових установах. Порівняльна оцінка виробництва зерна в різних природно-кліматичних зонах України за період найбільш інтенсивних кліматичних змін свідчить, що за останні тридцять років частка виробництва зерна в зоні Степу зменшилась від 45 до 35% від загального по Україні. Викладено аналіз вартості послуг із транспортування води для зрошення в південних регіонах України. Виявлено, що, незважаючи на єдину типову методіку з розрахунку вартості транспортування води, її ціна значно варіює по експлуатаційних підрозділах Державного агентства водних ресурсів України. Основними чинниками коливання вартості та величини плати за послуги з транспортування води для зрошення є рівень бюджетного фінансування експлуатаційних організацій, що забезпечують дану послугу, кількість перекачувань, обсяг фактичного поливу зрошуваних земель, частка поливних площ в зоні обслуговування. Проведене економічне оцінювання ефективності зрошення за різних рівнів вартості води та інших технологічних витрат, з урахуванням амортизації капітальних вкладень, свідчить, що за ціни на воду 4,0–5,0 грн/м³ валовий прибуток від вирощування найбільш рентабельних польових культур на 35–40% перевищує ефективність богарного землеробства. За вартості води 3,0–3,5 грн/м³ та за використання виробничих потужностей міжгосподарської зрошувальної мережі на рівні 60–70% створюються фінансові передумови для ефективної експлуатації зазначених мереж.*

Ключові слова: зрошення, модернізація, урожайність, економічна ефективність, вартість води, управління

Актуальність дослідження. Сільське господарство України генерує 10–13% ВВП, понад 40% експорту і є одним із найважливіших важелів зростання національної економіки та сталого соціально-економічного розвитку. Проте кліматичні зміни, що відбуваються, негативно впливають на сталість та ефективність сільськогосподарського виробництва України. Південь, а віднедавна і центральні райони України страждають від безсніжних зим, значної нерівномірності та загальної нестачі опадів і, як наслідок, недостатнього рівня вологозабезпечення ґрунтів [1–3].

Розгалужена система зрошення в Україні, що була створена за радянських часів для поливу 2,65 млн га ріллі, сьогодні, після

багатьох років недостатнього інвестування, не може нормально функціонувати: її не реконструювали з 1990 р., інфраструктура застаріла та втратила ефективність, площа фактичного поливу в Україні постійно зменшується – у 2020 році було реально полито менше 550 тис. га (менше 20%). Через це система не в змозі виконувати роль компенсатора негативного впливу кліматичних змін і ефективно впливати на підвищення стійкості агровиробників до змін клімату. У нинішніх умовах обсягів фінансування, яке формується з надходжень за надання послуг із постачання води на зрошення та бюджетних дотацій недостатньо для належного обслуговування систем зрошення, а технічний стан самих мереж продовжує погіршуватися.

Підвищення стійкості агровиробників до змін клімату в районах, що страждають від посух, потребує розширення та вдосконалення систем зрошення. Розширення площ зрошення та дренажу збільшить обсяги та якість продукції рослинництва та зменшить його волатильність, а отже підвищить загальну продуктивність галузі та валютний дохід країни, що позитивно вплине на національний платіжний баланс та продовольчу безпеку.

Дослідження вітчизняних наукових та міжнародних фінансових установ [4–8] показали високу інвестиційну привабливість діяльності з відновлення та розвитку гідротехнічної меліоративної інфраструктури, завдяки відновленню та нарощуванню потенціалу якої Україна зможе стати одним із світових лідерів із виробництва сільськогосподарської продукції.

Аналіз попередніх досліджень. Загально визнаним вітчизняною і світовою наукою та практикою є факт значного позитивного впливу зрошення на підвищення врожайності сільськогосподарських культур [9,17]. Так, результати досліджень [10] свідчать, що зрошення на півдні країни сприяло формуванню врожайності сучасних сортів пшениці озимої на рівні 7,74–9,83 т/га (10,35 т/га максимально), тоді як в богарних умовах ця величина становила 2,77–3,83 т/га. Тобто за рахунок зрошення врожайність зерна пшениці зростала в 2,6–2,8 рази.

Урожайність зерна кукурудзи в стаціонарному досліді, залежно від режимів зрошення дощуванням, способів і глибини обробітку ґрунту, в умовах півдня Херсонської області становила від 10,4 до 14,9 т/га [11]. За краплинного зрошення врожайність цієї культури складала від 16,44 до 20,69 т/га, а сої від 4,14 до 5,87 т/га. За таких рівнів урожайності умовний чистий прибуток (у цінах 2020 р.) становив 53,65–73,55 тис. грн за вирощування кукурудзи і 71,62–101,55 тис. грн – сої з рівнем рентабельності 80–90 і 37–60% відповідно [4, 12].

Аналіз виробництва овочів у виробничих умовах на политих землях загалом по Україні засвідчив, що їх урожайність з 2010 по 2017 рр. збільшилась майже вдвічі [9]. Загалом, вирощування овочевих культур відкритого ґрунту на зрошенні забезпечує найвищу прибавку як урожайності, так і валового доходу, який в цінах 2019 р. сягав майже 140 тис. грн/га [13].

Отже, результати застосування зрошення свідчать про його високу ефективність,

особливо за умов значного дефіциту природного вологозабезпечення. Проте, розробка та впровадження проектів відновлення або модернізації зрошувальних систем потребує обґрунтування й прийняття рішень щодо агроекологічних, гідромеліоративних, техніко-технологічних й організаційно-економічних аспектів реалізації зазначених проектів [14]. Окрім цього, оцінюючи ефективність зрошення, слід урахувувати, що вода є важливим виробничим ресурсом, який має вартість, а використання його – раціональні межі [15].

Метою досліджень є аналіз використання зрошення в сучасних умовах змін клімату та оцінювання впливу різних рівнів вартості води на економічну ефективність вирощування основних сільськогосподарських культур.

Методи досліджень. У процесі досліджень використано такі методи: опитування, анкетування (узагальнення наукового та практичного досвіду використання зрошувальних земель); порівняння та імітаційного моделювання (визначення граничної економічно доцільної вартості води для зрошення); системного аналізу (узагальнення результатів досліджень).

Результати досліджень. Внаслідок змін клімату в Україні відбувається вкрай негативний за наслідками процес зневоднення території країни, який спричинив значне погіршення умов вологозабезпечення. Вплив цього процесу на умови ведення та сталість сільськогосподарського виробництва в різних природно-кліматичних зонах України є неоднозначним.

В зоні Степу, де середньорічна кількість опадів не перевищує 400–450 мм, унаслідок істотного (близько 100 мм/рік) зростання сумарного випаровування значно погіршилися умови вирощування сільськогосподарських культур насамперед через високі ризики втрати врожаю внаслідок відсутності ґрунтової вологи. Саме недостатнє вологозабезпечення є причиною низьких врожаїв сільськогосподарських культур в умовах богарного землеробства.

Стосовно ж зони Лісостепу і Полісся, то зміни клімату поки що, спричинили переважно позитивний вплив на умови та сталість ведення сільського господарства в цих регіонах.

За оцінкою ФАО, агроресурсний потенціал України дозволяє забезпечити виробництво продуктів харчування для 450–500 млн людей. На сьогодні реалізується лише 1/3 цього потенціалу. Головними причинами низького рівня його використання є технологічна

відсталість та недостатній рівень природного вологозабезпечення.

Про технологічну відсталість сільського господарства України свідчить той факт, що середня врожайність сільськогосподарських культур донині є суттєво (у 2 і навіть більше разів) нижчою за середню врожайність цих же культур у країнах ЄС [17]. Але справедливості заради, необхідно констатувати, що цей розрив поступово скорочується. Більш того, вже існує достатньо велика кількість агропідприємств, технологічний рівень вирощування сільськогосподарських культур в яких відповідає європейському і світовому, а в деяких випадках може слугувати прикладом для наслідування. Особливо значно виріс технологічний рівень вирощування сільськогосподарських культур на зрошуваних землях. Це зумовлено відносно високим рівнем затрат на зрошення, окупність яких може бути забезпечена лише за умови дотримання сучасних, науково обґрунтованих технологій вирощування сільськогосподарських культур.

Стосовно впливу умов вологозабезпечення на ефективність сільськогосподарського виробництва, слід констатувати, що зі зростанням посушливості клімату внаслідок його змін вплив умов вологозабезпечення на ефективність сільськогосподарського виробництва теж невпинно зростає.

Підтвердженням цього є результати аналізу даних про обсяги виробництва та врожайність сільськогосподарських культур в різних природно-кліматичних зонах України.

Так зона Степу, де зосереджено 46% посівів зернових, сьогодні забезпечує лише 35% загального обсягу виробництва зерна, тоді як у 1990 р. ця частка становила 45%.

Зростання валового виробництва зерна в Україні впродовж останніх 20 років відбувається за рахунок збільшення його виробництва в Лісостепу і на Поліссі. Причому збільшення виробництва зерна в цих зонах відбувається за рахунок значного (майже удвічі) зростання врожайності зернових. В зоні Степу навпаки, розширення площ посіву зернових не змогло компенсувати втрат, обумовлених зниженням врожайності (рис. 1).

Отже, в умовах постійного погіршення вологозабезпечення ґрунтів унаслідок змін клімату розвиток зрошення і дренажу є дієвим інструментом підвищення ефективності аграрного виробництва. Особливо важливою є роль зрошення в підвищенні ефективності та сталості сільськогосподарського виробництва в зоні Степу.

Дослідження, виконані в Інститутах водних проблем і меліорації, зрошувального землеробства, рису Національної академії аграрних наук, свідчать, що за повного дотримання всіх складових агротехнологій застосування зрошення дає можливість забезпечити рівень урожайності сої понад 6 т/га, зерна кукурудзи 19–20 т/га, озимої пшениці – 9–10 т/га, озимого ячменю 10–12 т/га, томатів – понад 150 т/га, картоплі – понад 70 т/га, цукрових буряків – понад 120 т/га, рису – 8–10 т/га (рис. 2) [3, 6]. Ці рівні врожайності підтверджені багатьма сільгоспвиробниками у виробничих умовах. Так у групі компаній «Агроф'южн» при вирощуванні томатів за краплинного зрошення на загальній площі понад 8,0 тис. га отримано середню врожайність на всій площі вирощування 100 т/га, компанія «Терра Тарса» у 2019 р. отримала врожай озимої пшениці 10 т/га, а компанія «Фрідом Фарм Інтернешнл»,

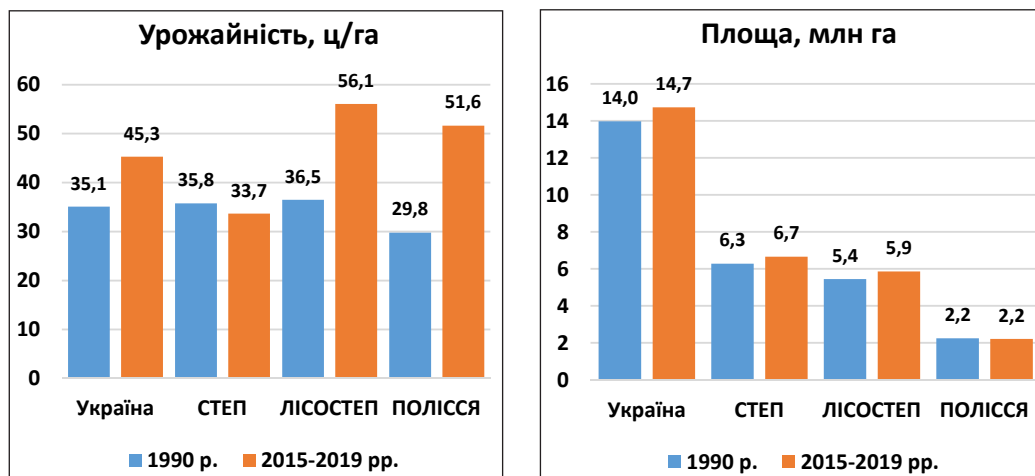


Рис. 1. Порівняльний аналіз урожайності та збиральних площ зернових і зернобобових культур

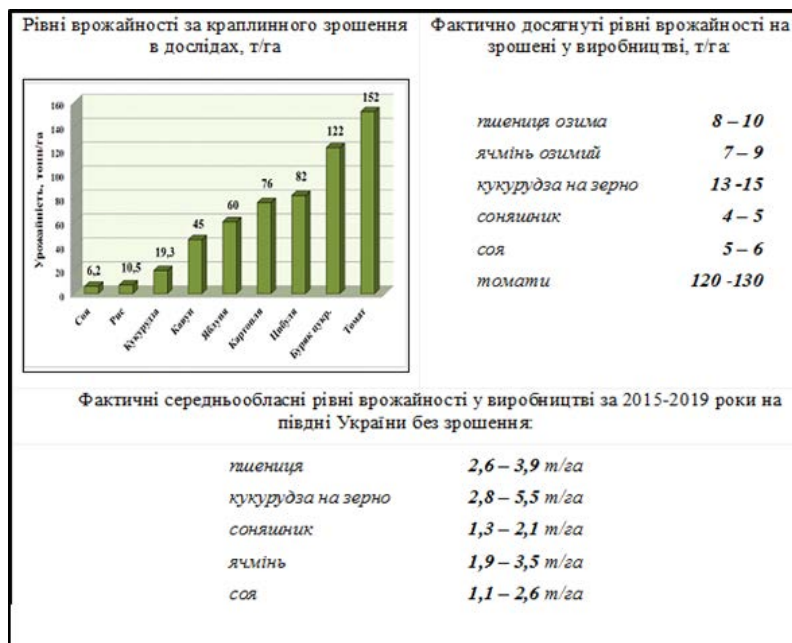


Рис. 2. Фактичні середньообласні рівні врожайності у виробництві за 2015–2019 роки на півдні України

яка має найбільший масив зрошуваних земель в Україні (понад 27 тис. га), при вирощуванні сої на загальній площі понад 5 тис. га має середній рівень врожайності 4,5 т/га. Загалом у 2019 р. у виробничих умовах врожайність озимих ячменю та пшениці становила 7–10 т/га, зерна кукурудзи 13–15 т/га і більше, сої – 5–6 т/га.

Яскравим прикладом ефективності зрошення є дані порівняльного аналізу середньообласної врожайності сої і кукурудзи в Одеській та Херсонській областях за період з 2000 по 2019 роки (рис. 3). Так, у Херсонській області, де близько 80% сої та кукурудзи вирощуються на зрошенні, врожайність становить 3,0–3,5 і 7–8 т/га відповідно. В Одеській області, де ці

сільськогосподарські культури вирощуються в основному на богарі, їх урожайність становить близько 2,5 і 4,0 т/га відповідно, тобто є значно нижчою.

Отже, можна однозначно стверджувати, спираючись на дані вітчизняних наукових установ та провідних агровиробників, які вирощують сільськогосподарські культури в умовах зрошення, що його застосування забезпечує можливість одержати урожайність, як мінімум у 2 рази вищу, порівняно з богарними умовами. До того ж, внаслідок змін клімату у зоні Степу, особливо південного, сформувались умови, за яких вирощування низки сільськогосподарських культур (овочеві, соя, кукурудза на зерно) без зрошення є практично неможливим.

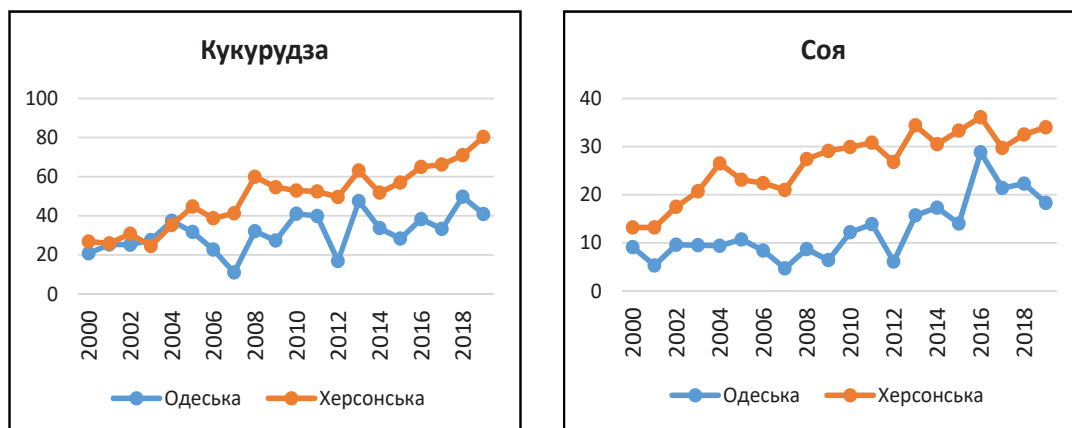


Рис. 3. Динаміка фактичних середніх рівнів врожайності в Одеській та Херсонській областях за 2000–2019 рр., ц/га

Незважаючи на високу ефективність зрошення, стан сучасного меліоративного землеробства щодо використання наявних потужностей створеної раніше інженерної інфраструктури зрошення та дренажу може бути охарактеризований як кризовий, із загрозою погіршення, адже площі фактичного поливу на зрошуваних землях і водорегулювання на осушених не перевищують 25% та 10% відповідно. Зважаючи на це, сьогодні головним заходом адаптації землеробства до кліматичних змін є створення можливостей для більш повного використання потенціалу наявної меліоративної інфраструктури з метою відновлення ефективного використання меліорованих земель на загальній площі не менше 3,0–3,5 млн га, зокрема 1,2–1,5 млн га зрошуваних земель, що передбачено Стратегією зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року [16].

В Україні подача води на зрошення здійснюється експлуатаційними підрозділами Держводагентства, які за формою господарювання є бюджетними неприбутковими організаціями, тому система тарифів і самі тарифи на подачу води на зрошення відсутні. Згідно з діючим законодавством підрозділи Держводагентства мають право справляти лише збори за послуги з водоподачі та водовідведення. Збір плати за послуги з подачі води на зрошення, комунальні та інші цілі здійснюється згідно з «Порядком визначення вартості та надання платних послуг бюджетними установами, що належать до

сфери управління Державного агентства водних ресурсів України» від 25.12.2013 № 544/1561/1130, затвердженого КМ України. Цей Порядок визначає особливості формування вартості та надання платних послуг юридичним та фізичним особам та передбачає визначення ціни відповідно до «Методики формування вартості послуг з подачі води на зрошення, промислові та комунальні потреби», що розроблена ІВПіМ і схвалена НТР Держводагентства України (протокол № 6 від 20.11.2012 р.). Вказана «Методика...» передбачає включення у вартість послуг із подачі води на зрошення лише нестачі (дефіциту) бюджетного фінансування для покриття управлінських і експлуатаційних витрат водогосподарської організації. Діюча система плати за послуги з подачі води на зрошення базується на об'ємному методі, тобто передбачає оплату водокористувачами певної суми за кожний поданий кубометр води і включає часткову оплату вартості електроенергії та безпосередній збір за послуги з подачі води.

Нині плата за послуги з подачі води на зрошення суттєво різниться між водогосподарськими організаціями, причём не тільки на рівні басейнових управлінь водних ресурсів (БУВР) чи регіональних офісів водних ресурсів (РОВР), а навіть і в межах окремого БУВР або РОВР і у 2019 р., коливалась від 0,13–0,98 до 1,4–2,53 грн/м³ (рис. 4) за даними Держводагентства.

Значно різняться і питомі витрати електроенергії на подачу води для зрошення, що,

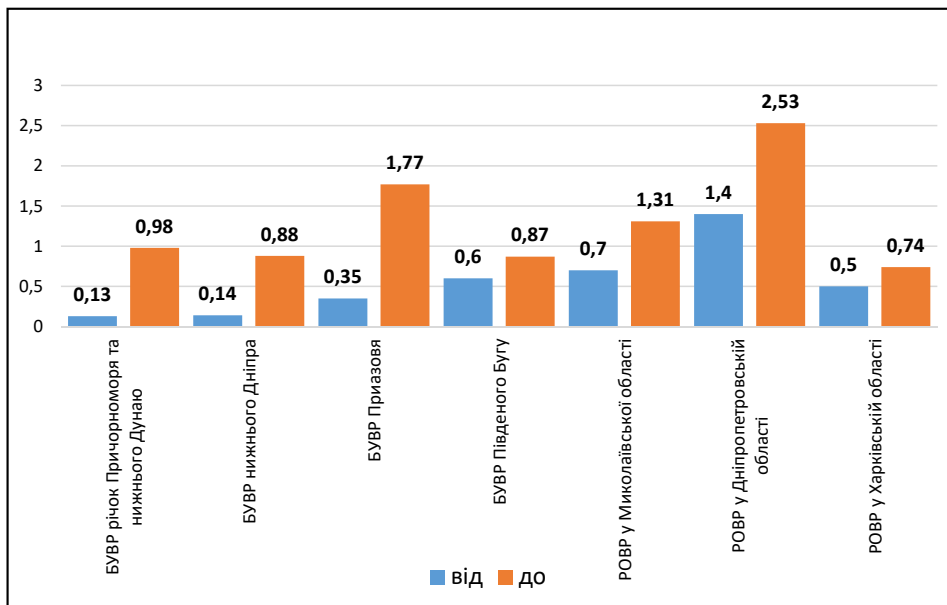


Рис. 4. Вартість послуг із подачі води на зрошення (без електроенергії) в 2019 р., грн/м³

зрештою впливає і на загальну вартість послуг з її подачі для різних БУВР і РОВР. У тому ж 2019 р. середня вартість послуг із подачі води на зрошення по БУВР нижнього Дніпра (основний масив зрошення в Херсонській області) становила 0,94 грн/м³, а по БУВР Південного Бугу (переважно зрошувальні системи Миколаївської області) – 4,15 грн/м³, тобто відрізнялась майже в 4,5 рази за даними Держводагентства.

Зрозуміло, що такий підхід до формування вартості послуг із подачі води на зрошення є недосконалим і викликає низку зауважень:

– з боку водокористувачів через непрозорість формування вартості, значну розбіжність її величини і, відповідно, різну доступність води для водокористувачів, наявність значних ризиків щодо постачання необхідних, обумовлених договорами, обсягів води у потрібні терміни тощо;

– з боку водогосподарських організацій через недостатність коштів від послуг з подачі води на зрошення на повноцінну експлуатацію та модернізацію зрошувальної інфраструктури, неможливість залучення кредитних або інвестиційних ресурсів, зокрема коштів самих водокористувачів, незацікавленість в об'єктивному водообліку та зниженні втрат води при транспортуванні тощо.

Головним недоліком існуючої системи плати за послуги з подачі води на зрошення є неможливість її застосування за умови створення організацій водокористувачів (ОВК) і передачі їм функцій управління та експлуатації не тільки внутрішньогосподарських мереж, а й частини міжгосподарських (станції

підкачки та перекачки, канали і трубопроводи нижчого рівня), що зараз перебувають у державній власності і експлуатуються бюджетними водогосподарськими організаціями. За створення ОВК частина робіт із подачі води на зрошення перейде до водокористувачів в якості експлуатаційних витрат, а оплаті будуть підлягати лише послуги з подачі (транспортування води) до точки водовиділу (насосної станції підкачки). Причому величина цієї плати в перспективі має забезпечити можливість переведення зрошення на самоокупність. Крім удосконалення організаційної структури управління зрошенням, можливість його переведення на самоокупність визначальною мірою залежить від економічної ефективності зрошення.

Розрахунки економічної ефективності зрошення, що виконані з використанням даних про затрати на зрошення, та вартості сільськогосподарської продукції станом на липень 2020 р. свідчать, що навіть за загальної вартості зрошення в перерахунку на 1 м³ води (з врахуванням тарифу на транспортування, плати за спецводокористування і обслуговування засобів зрошення) на рівні 4–5 грн м³, за умови вирощування на зрошенні пшениці озимої, кукурудзи, сої і соняшника в чотирьохпільній сівозміні з урожайністю на рівні 80–85% від досягнутого у виробничих умовах, прибуток від зрошення становитиме близько 12 тис. грн/га (рис. 5). Водночас враховано амортизацію капітальних витрат на внутрішньогосподарську мережу та поливну техніку з розрахунку: 1500 дол. США/10 років; система краплинного зрошення – 3000 дол. США/7 років.

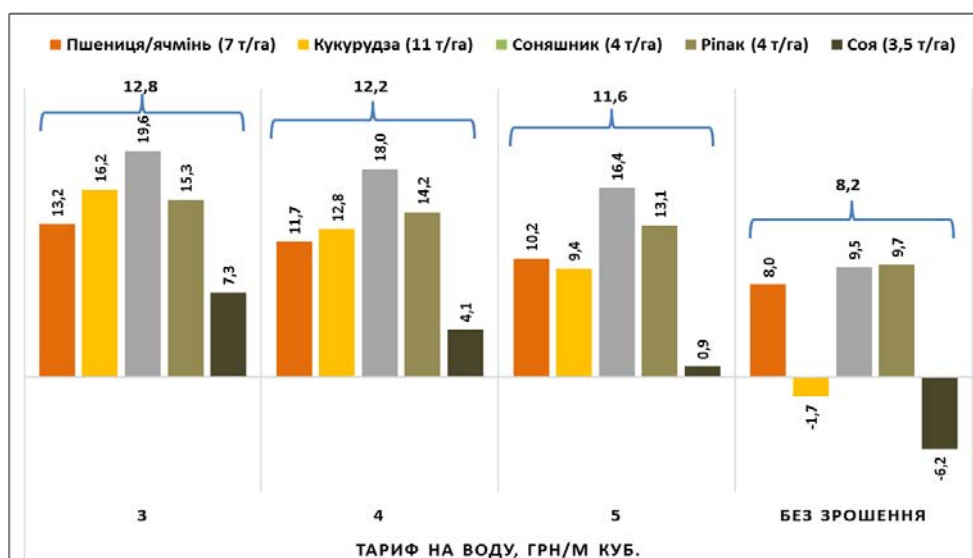


Рис. 5. Валовий прибуток за рахунок вирощування основних с.-г. культур на зрошенні, тис грн/га

Ведення зрошення за такого рівня економічної ефективності створює повні фінансові можливості для проведення заходів з реконструкції та модернізації зрошення з прийнятним (не більше 8–10 років) терміном окупності витрат на них.

Переведення зрошення на самоокупність в Україні загалом стане можливим за середньої величини плати за воду на рівні 3,0–3,5 грн/м³ і збільшення площ фактичного поливу мінімум у 2 рази, тобто до 1,0 млн га.

На окремих зрошувальних системах, де площі фактичного поливу становлять 50% і більше від їх проектної потужності, переведення зрошення на самоокупність можливе уже сьогодні за умови встановлення середньозваженого по системі рівня плати за воду в розмірі 3,0–3,5 грн/м³.

У перспективі при створенні ОВК і подальшому нарощуванні площ поливу собівартість подачі води буде зменшуватись. Отже переведення зрошення на самоокупність стане можливим за умови реформування системи управління шляхом розподілення функцій управління зрошувальною інфраструктурою між ОВК та спеціально створеними державними суб'єктами господарювання за одночасного запровадження прозорої системи тарифоутворення на послуги з водоподачі та водовідведення.

Висновки. Подальший розвиток зрошення в Україні, зокрема і виконання завдань «Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року» напряду залежить від економічної ефективності зрошення, яка зі свого боку є похідною від вартості послуг із подачі води на зрошення.

Дослідженнями та розрахунками економічної ефективності зрошення доведено, що навіть за загальної його вартості зрошення в перерахунку на 1 м³ води на рівні 4–5 грн/м³, за умови вирощування на зрошенні пшениці озимої, кукурудзи, сої і соняшника в чотирьохпільній сівозміні з урожайністю на рівні 80–85% від досягнутого у виробничих умовах кращими сільгоспвиробниками, прибуток від зрошення становитиме близько 12 тис. грн/га, що створює фінансові передумови для реалізації інвестиційних проектів із модернізації, реконструкції та будівництва нових систем зрошення з терміном окупності інвестицій не більше 8–10 років.

Переведення зрошення на самоокупність в Україні стане можливим за середньої величини плати за воду на рівні 3,0–3,5 грн/м³ і доведення площ фактичного поливу на кожній зрошувальній системі до 65–70% від проектного рівня, а також переходу від практики відшкодування вартості послуг за подачу води до запровадження системи тарифоутворення.

Бібліографія

1. Romashchenko M.I., Saydak R.V., Matyash T.V. Development of irrigation and drainage as the basis of sustainable agriculture in Ukraine in climate change/IX International scientific and technical conference «Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction», 22–27 July. Georgia. – P. 243–250.
2. Вплив сучасних кліматичних змін на водні ресурси та сільськогосподарське виробництво / Ромащенко, М.І. та ін. *Меліорація і водне господарство*. 2020. Вип. 1. С. 5–22. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202001-235>
3. Тараріко Ю.О., Сайдак Р.В., Сорока Ю.В. Підсумки та перспективи досліджень з оцінки та раціонального використання агроресурсного потенціалу сільськогосподарських територій. *Меліорація і водне господарство*. 2019. № 2. С. 186–198. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg201902-194>
4. Овчатов І.М. Ефективність способів зрошення за вирощування сої і кукурудзи. *Вісник аграрної науки*. 2020. № 12. С. 79–83. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202012-10>
5. Наукові засади розвитку аграрного сектора економіки південного регіону України / за наук. ред: Ромащенко М.І., Вожегової Р.А., Шатковського А.П. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС. 2017. 438 с.
6. Тараріко Ю.О., Сайдак Р.В., Сорока Ю.В. Кліматичні зміни та економічна ефективність аграрного виробництва в степовій зоні. *Меліорація і водне господарство*. 2020. № 2. С. 56–69. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202002-256>
7. Malek K. Yoder J. Givens J. Stockle C. Brady M. Karimi T. Rajagopalan K. Liu M. Reed P. (2021) Impacts of irrigation efficiency on water-dependent sectors are heavily controlled by region-specific institutions and infrastructures. *Journal of Environmental Management*. 2021. 300. DOI 10.1016/j.jenvman.2021.113731

8. Cachipuendo, C. (2021) The Technification of Irrigation as a Strategy of Community Resilience. Case Study: Pisque River Basin, Ecuador. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 252, P. 207–216. DOI:10.1007/978-981-16-4126-8_20
9. Фомічов М.В. Зрошення як чинник підвищення ефективності вирощування сільськогосподарських культур в Україні. *Економіка та держава*. 2019. № 4. С. 92–96. DOI: 10.32702/2306-6806.2019.4.92
10. Вплив зрошення на продуктивність різних сортотипів озимої пшениці в умовах Південного Степу України / Лавриненко Ю.О. та ін. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2019. № 3(79). <https://doi.org/10.31548/dopovidi2019.03.014>
11. Писаренко П.В., Малярчук А.С., Куц Г.М., Біляєва І.М., Мишукова Л.С. Вплив водного режиму та способів обробітку ґрунту на продуктивність кукурудзи. *Журнал “Агроном”*. 2020. <https://www.agronom.com.ua/vplyv-vodnogo-rezhymu-ta-sposobiv-obrobitku-gruntu-na-produktyvnist-kukurudzy/> (дата звернення: 01.12.2021)
12. Шатковський А.П., Журавльов О.В. Наукові основи технологій краплинного зрошення сільськогосподарських культур : монографія. Одеса : Гельветика, 2021. 440 с.
13. Кернасюк Ю.В. Адаптація до кліматичних змін: економіка технологій поливу. Економічний гектар. 2020. <http://agro-business.com.ua/agro/ekonomichnyi-hektar/item/17754-adaptatsiia-do-klimatichnykh-zmin-ekonomika-tekhnohii-polyvu.html> (дата звернення: 01.12.2021).
14. Кучер Л., Дрокін С., Улько Є. Еколого-економічна ефективність зрошувальних проєктів у контексті змін клімату. *Agricultural and Resource Economics*. 2020. 6(2): 57–77. DOI: 10.22004/ag.econ.303857
15. Андрійчук В.Г. Економіка підприємств агропромислового комплексу: підручник / В.Г. Андрійчук. Київ : КНЕУ, 2013. 779 с.
16. Стратегія зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року: Стратегія від 14 серп. 2019 року № 688-р. // *Урядовий кур’єр*. 2019. № 170. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/688-2019-%D1%80#Text>
17. Crop Prospects and Food Situation. Quarterly Global Report 4/FAO. Rome, 2019.4.

References

1. Romashchenko, M.I., Saydak, R.V., & Matyash, T.V. (2019). Development of irrigation and drainage as the basis of sustainable agriculture in Ukraine in climate change. IX International scientific and technical conference «Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction». Georgia, 243–250.
2. Romashchenko, M.I., Husyev, Y.V., Shatkovskiy, A.P., Saidak, R.V., Yatsyuk, M.V., Shevchenko, A.M., & Matiash, T.V. (2020). Impact of climate change on water resources and agricultural production. *Land Reclamation and Water Management*, (1), 5–22. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg201902-194>. [in Ukrainian]
3. Tararico, Y., Saidak, R., & Soroka, Y. (2019). Results and prospects of research on the evaluation and rational use of agro-resource potential of agricultural areas. *Land Reclamation and Water Management*, 2, 186–198. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg201902-194> [in Ukrainian]
4. Ovchatov, I.M. (2020). Efektyvnist sposobiv zroshennia za vyroshchuvannia soi i kukurudzy [The efficiency of irrigation methods for soybean and corn cultivation]. *Bulletin of Agricultural Science*, 98(12), 79–83. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202012-10> [in Ukrainian]
5. Romashchenko, M.I., Vozhehova, R.A., & Shatkovskiy, A.P. (2017). Naukovi zasady rozvytku aharnoho sektora ekonomiky pivdennoho rehionu Ukrainy [Scientific principles of development of the agrarian sector of the economy of the southern region of Ukraine]. Kherson : Oldi-Plyus [in Ukrainian]
6. Tararico, Y., Soroka, Y., & Saidak, R. (2020). Climate change and economic efficiency of agricultural production in the Steppe zone. *Land Reclamation and Water Management*, 2, 56–69. <https://doi.org/10.31073/mivg202002-256> [in Ukrainian]
7. Malek, K., Adam, J., Yoder, J., Givens, J., Stockle, C., Brady, M., & Reed, P. (2021). Impacts of irrigation efficiency on water-dependent sectors are heavily controlled by region-specific institutions and infrastructures. *Journal of Environmental Management*, 300, 113731. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113731

8. Cachipundo, C. (2022). The Technification of Irrigation as a Strategy of Community Resilience. Case Study: Pisque River Basin, Ecuador. In Communication, Smart Technologies and Innovation for Society. Springer, Singapore. DOI:10.1016/j.jenvman.2021.113731
9. Fomichov, M. (2019). Zroshennia yak chynnyk pidvyshchennia efektyvnosti vyroshchuvannia silskohospodarskykh kultur v Ukraini. [Irrigation as the factor enhancing the efficiency of agricultural crops production in Ukraine], Ekonomika ta derzhava, vol. 4, 92–96. DOI: 10.32702/2306-6806.2019.4.92 [in Ukrainian]
10. Lavrynenko, Y., Vozhegova, R., Bazalii, G., Usyk, L., & Zhupyna, A. (2019). Irrigation effect on the productivity of winter wheat different varieties in the condition of the Southern Steppe of Ukraine. Scientific reports of NULES of Ukraine, 3(79). DOI:http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi2019.03.014 [in Ukrainian]
11. Pysarenko, P.V., Maliarchuk, A.S., Kuts, H.M., Biliaieva, I.M., Myshukova, L.S. (2020). Vplyv vodnoho rezhymu ta sposobiv obrobitku gruntu na produktyvnist kukurudzy [Influence of water regime and tillage methods on corn productivity]. Ahronom. Retrieved from: <https://www.agronom.com.ua/vplyv-vodnogo-rezhymu-ta-sposobiv-obrobitku-gruntu-na-produktyvnist-kukurudzy/> [in Ukrainian]
12. Shatkovskiy, A.P., & Zhuravlov, O.V. (2021). Naukovi osnovy tekhnolohii kraplynnoho zroshennia silskohospodarskykh kultur : monohrafiia. [Scientific bases of drip irrigation technologies of agricultural crops : monograph]. Odesa : Helvetyka. [in Ukrainian]
13. Kernasyuk, Yu.V. (2020). Adaptation to climate change: economics of irrigation technologies. Economic hectare. Retrieved from: <http://agro-business.com.ua/agro/ekonomichnyi-hektar/item/17754-adaptatsiia-do-klimatychnykh-zmin-ekonomika-tekhnolohii-polyvu.html>
14. Kucher, L., Drokin, S., & Ulko, Y. (2020). Ekoloho-ekonomichna efektyvnist zroshuvannykh proektiv u konteksti zmin klimatu. [Ecological-economic efficiency of irrigation projects in the context of climate change] Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal, 6 (1868-2020-1164), 57–77. DOI: 10.22004/ag.econ.303857 [in Ukrainian]
15. Andriichuk V.H.(2013), Ekonomika pidpriemstv ahropromyslovoho kompleksu: pidruchnyk [Economics of agro-industrial enterprises : textbook]. Kyiv : KNEU. [in Ukrainian]
16. Stratehiia zroshennia ta drenazhu v Ukraini na period do 2030 roku : Stratehiia [Irrigation and Drainage Strategy in Ukraine up to 2030: Strategy] vid 14 serp. 2019 roku № 688-r. Uriadovyi kurier 2019. № 170. [in Ukrainian]
17. Prospects, C. (2019). Food Situation–Quarterly Global Report FAO.

М.И. Ромащенко, Р.В. Сайдак, Т.В. Матяш, М.В. Яцюк

Эффективность орошения зависимости от стоимости воды

***Аннотация.** В статье приведен аналитический обзор достигнутых уровней урожайности сельскохозяйственных культур на орошении в опытных и производственных условиях. На сегодняшний день лучший производственный опыт использования орошаемых земель свидетельствует, что при соблюдении всех агротехнических требований урожайность ранних зерновых культур достигает 8–10 т/га, кукурузы – 10–14 т/га, масличных культур – 4–6 т/га, овощных культур – свыше 60 т/га, что составляет около 90% их производительности, достигнутой в опытах научных учреждений. Сравнительная оценка производства зерна в разных природно-климатических зонах Украины за период наиболее интенсивных климатических изменений свидетельствует, что за последние тридцать лет доля производства зерна в зоне Степи уменьшилась от 45 до 35% от общего по Украине. Изложен анализ стоимости услуг по транспортировке воды для орошения в южных регионах Украины. Выявлено, что, несмотря на единую типовую методику расчета стоимости транспортировки воды, ее цена значительно варьирует по эксплуатационным подразделениям Государственного агентства водных ресурсов Украины. Основными факторами колебания стоимости и величины платы за услуги по транспортировке воды для орошения являются уровень бюджетного финансирования эксплуатационных организаций, обеспечивающих данную услугу, количество перекачек, объем фактического полива орошаемых земель, доля политых площадей в зоне обслуживания. Проведенная экономическая оценка эффективности орошения при разных уровнях стоимости воды и других технологических затратах, с учетом амортизации капитальных вложений, свидетельствует, что при цене на воду 4,0–5,0 грн/м³ валовая прибыль от выращивания наиболее рентабельных полевых культур на 35–40% превышает эффективность богарного земледелия. При стоимости воды 3,0–3,5 грн/м³ и использовании производственных мощностей межхозяйственной оросительной сети на уровне 60–70% создадутся финансовые предпосылки для эффективной эксплуатации указанных сетей.*

***Ключевые слова:** орошение, модернизация, урожайность, экономическая эффективность, стоимость воды, управление*

M.I. Romashchenko, R.V. Saidak, T.V. Matyash, M.V. Yatsiuk
Irrigation efficiency depending on water cost

Abstract. *The article provides an analytical review of the achieved crop yields under irrigation in experimental and production conditions. For today, the best production experience in the use of irrigated land indicates that, subject to all agrotechnical requirements, the yield of early grain crops reaches 8–10 t/ha, corn – 10–14 t/ha, oilseeds – 4–6 t/ha, vegetable crops – over 60 t/ha, which is about 90% of their productivity achieved in the experiments of scientific institutions. The comparative assessment of grain production in different climatic zones of Ukraine for the period of the most intense climatic change shows that over the past thirty years, the share of grain production in the Steppe zone has decreased from 45 to 35% of the total in Ukraine. The analysis of service cost for the transportation of water for irrigation in the southern regions of Ukraine is given. It was revealed that, despite a unified standard method for calculating the cost of water transportation, its price varies significantly by operational units of the State Agency for Water Resources of Ukraine. The main factors of fluctuations in the cost and fees for the transportation services of water for irrigation are the budgetary funding level of operating organizations, providing these services, the number of water transfers, the volume of actual irrigation on irrigated lands, the share of irrigated areas in the service area.*

The economic assessment of irrigation efficiency when having different water and other technological costs, taking into account the depreciation of capital investments, indicates that having a water price of 4,0–5,0 UAH/m³, the gross profit from growing the most profitable field crops is 35–40% higher than the efficiency in rainfed agriculture. At the cost of water is 3,0–3,5 UAH/m³ and the use of the production capacity of the inter-farm irrigation network by 60–70%, financial prerequisites will be created for the effective operation of these networks.

Key words: *irrigation, modernization, productivity, economic efficiency, water cost, management*

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-294>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/294>

УДК 631.6:631.45:633.18

ВПЛИВ РЕЖИМУ ЗРОШЕННЯ РИСУ НА ОКИСНО-ВІДНОВНИЙ РЕЖИМ ҐРУНТУ

К.В. Дудченко¹, канд. с.-г. наук, Т.М. Петренко², м.н.с., О.І. Флінта³, м.н.с., М.М. Дацюк⁴, м.н.с.

¹ Інститут рису Національної академії аграрних наук, 75705, Херсонська обл., Скадовський р-н, с. Антонівка; <https://orcid.org/0000-0001-5567-7690>, e-mail: catherin.dudchenko@gmail.com ;

² Інститут рису Національної академії аграрних наук, 75705, Херсонська обл., Скадовський р-н, с. Антонівка; <https://orcid.org/0000-0002-5096-5973>, e-mail: chemikal777@gmail.com;

³ Інститут рису Національної академії аграрних наук, 75705, Херсонська обл., Скадовський р-н, с. Антонівка; <https://orcid.org/0000-0003-4181-3836>, e-mail: aflinta.83@gmail.com;

⁴ Інститут рису Національної академії аграрних наук, 75705, Херсонська обл., Скадовський р-н, с. Антонівка; <https://orcid.org/0000-0002-4128-3997>, e-mail: nikolaydacuk@gmail.com

Анотація. Під час вирощування рису в умовах затоплення на полі протягом 3-х місяців підтримується шар води, відбуваються процеси, що призводять до зміни складу органічних та мінеральних компонентів ґрунту, а саме: винос легкорозчинних речовин та рухомих форм елементів живлення, домінування відновних процесів над окисними. Зрошення посівів рису за допомогою системи краплинного зрошення також зумовлює зміни в сольовому та водно-повітряному режимах, що призводить до формування сольових мішків та токсичного засолення ґрунту у шарі 0–60 см. Негативний вплив краплинного зрошення не настільки відчутний, порівняно з умовами затоплення і може бути ліквідований дотриманням сівозміни з наповненістю основною культурою не більше 50%.

Дослідження проводили протягом 2016–2020 рр. на території Інституту рису НААН та ДП «ДГ Інституту рису НААН» (Скадовський район, Херсонська область), ґрунтовий покрив представлено темно-каштановим солонцюватим ґрунтом. Вивчення впливу вирощування рису в умовах затоплення проводили на рисовій зрошувальній системі площею 190 га, а в умовах краплинного зрошення на полігоні площею 4 га. Окисно-відновний режим орного шару ґрунтів рисових сівозмін за вирощування рису має сезонний характер – у період підтримання шару води на полі в орному шарі ґрунту переважають процеси відновлення, після збирання врожаю та осушення чеків інтенсивність відновних процесів помірні і знижується.

Побудовано модель, що описує даний процес рівнянням квадратичної параболі. Вирощування рису в умовах краплинного зрошення також призводить до зниження окисно-відновного потенціалу до від'ємних значень, але на короткий період, що не чинить негативний вплив на ґрунт. Динаміка даного показника в умовах краплинного зрошення описана рівнянням квадратичної параболі. Постійний моніторинг даного процесу дозволяє характеризувати стабільність коливань окисно-відновної рівноваги ґрунтового середовища, що є важливим для оцінювання якості ґрунту.

Ключові слова: рис, ґрунт, зрошення затопленням, краплинне зрошення, окисно-відновний режим

Актуальність. Рис – один з найцінніших продуктів харчування, його виробництво є складовою частиною зернового господарства України, як стратегічної галузі народного господарства. Крім цього, вирощування рису має важливе значення також як фактор ефективного використання малопродуктивних земель, поліпшення їх родючості й меліоративного стану та одержання на них високих урожаїв інших зернових та кормових культур [1].

Враховуючи сучасний стан зрошувального землеробства в Україні, незадовільний технічний стан значної частини зрошувальних систем, а також рівень ресурсного

технологічного та технічного забезпечення галузі, можна стверджувати, що існує висока потенційна небезпека розвитку негативних процесів та явищ на зрошуваних ландшафтах. Тому роботи, пов'язані зі спостереженням за станом зрошуваних земель, зокрема рисових зрошувальних систем, мають особливу значущість, як з точки зору своєчасного виявлення негативних процесів та явищ, так і з метою визначення фактичного еколого-агрономіоративного стану земель. Вони мають бути основою для розробки та здійснення комплексу заходів із поліпшення стану та підвищення продуктивності зрошуваних агроландшафтів [2, 3].

Своєрідний окислювально-відновний режим зрошуваних ґрунтів порушує природну рівновагу, що сформувалась у природних для даної зони гідрологічних умовах, впливає на інтенсивність міграції по профілю хімічних сполук і окремих елементів, синтез і розкладання мінеральних і органічних речовин, швидкість протікання мікробіологічних і біохімічних процесів, які значною мірою визначають рівень родючості та продуктивності таких ґрунтів [4]. Режим зрошення сільськогосподарських культур формує окисно-відновний, водно-повітряний, поживний та сольовий режими ґрунту, які, своєю чергою, впливають на хімічні, фізичні та фізико-хімічні властивості ґрунту, його родючість.

Під час вирощування рису в умовах затоплення на полі протягом 3-х місяців підтримується шар води протягом, відбуваються процеси, що призводять до зміни складу органічних та мінеральних компонентів ґрунту, а саме, винос легкорозчинних речовин та рухомих форм елементів живлення, домінування відновних процесів над окисними [5]. Через постійне чергування відновних та окисних умов відбувається глибоке розкладання мінеральної основи ґрунтоутворних порід, що спричиняє розвиток процесів оглеєння та злитизації ґрунтів [6, 7]. Довготривале вирощування рису призводить до глибокого розсолонення, розсолонцювання та створює нетиповий водно-повітряний та сольовий режими ґрунтів. Через значні зміни, які зумовлює тривале використання ґрунтів для вирощування рису, такі ґрунти називаються рисовими або акваземами [8]. Зрошення посівів рису за допомогою системи краплинного зрошення також зумовлює зміни в сольовому та водно-повітряному режимах, що призводить до формування сольових мішків та токсичного засолення ґрунту у шарі 0–60 см. Негативний вплив краплинного зрошення не настільки відчутний, порівняно з умовами затоплення, і може бути ліквідований дотриманням сівозміни з наповненістю основною культурою не більше 50%.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Вплив вирощування рису на ґрунт вивчався багатьма вітчизняними та закордонними вченими (Edwards, Santos-Medellín, Nguyen, Kilmer, Liechty, Veliz, Ni, Phillips, Sundaresan, Шеуджен А.Н., Гуторова О.А., Баширов М.А., Шапошников Д.Г., Морозов В.В., Корнбергер В.Г., Рокочинський А.М., Кропивко С.М., Турченко В.О., Титков О.О. та ін.). У їхніх працях було розглянуто вплив вирощування рису, в умовах затоплення та краплинного

зрошення, на водно-повітряний, поживний, сольовий, окисно-відновний режими ґрунтів, вплив рисівництва на прилеглі території [4–12]. На нашу думку, окисно-відновний режим, а саме моделювання динаміки окисно-відновного потенціалу в орному шарі ґрунту упродовж вегетаційного періоду рису досліджено недостатньо.

Отже, **метою досліджень** є вивчення окисно-відновних режимів ґрунту (шар 0–20 см), що використовуються для вирощування рису в різних меліоративних умовах.

Матеріали і методи дослідження.

Дослідження проводили протягом 2016–2020 рр. на території Інституту рису НААН та ДП «ДГ Інституту рису НААН», що знаходяться у Скадовському районі, Херсонської області. Вплив вирощування рису на ґрунт в умовах затоплення вивчали на рисовій зрошувальній системі площею 190 га, що експлуатується близько 60 років, а вплив вирощування рису за краплинного зрошення – на полігоні краплинного зрошення площею 4 га. Ґрунтовий покрив представлено темно-каштановим солонцюватим ґрунтом.

Змішані зразки ґрунту відбирали з шару 0–20 см до посіву рису, 1 раз на місяць у період вегетації, та після збирання рису. Показник рН визначався потенціометрично (ДСТУ ISO 10390:2007), вміст заліза за ДСТУ 7913:2015.

Окисно-відновний потенціал ґрунту визначався за рівнянням І. П. Сердобольського, яке пов'язує окисно-відновний потенціал (ОВП) та вміст у ґрунті закисного заліза (1). В цьому рівнянні враховано величину нормального ОВП та добуток розчинності гідроксидів заліза [14].

$$E = 1,122 + 0,145\sqrt{I} - 0,174\text{pH} - 0,0581\text{lg}[Fe^{2+}] \quad (1)$$

де, I – іонна сила розчину.

Результати дослідження та їх обговорення. Рисові зрошувальні системи побудовані на темно-каштанових та каштанових солонцюватих ґрунтах у комплексі з солонцями (10–30%). В формуванні хімічних властивостей ґрунту, його генетичних горизонтів та родючості окисно-відновні процеси відіграють провідну роль. Під час вирощування рису за діючою технологією на полі протягом 3-х місяців підтримується шар води протягом, що призводить до розвитку процесів заболочення. Найбільше звертають увагу на відновлювану трансформацію заліза, марганцю, азоту, сірки, груповий та фракційний склад гумусу [12–14].

Властивість ґрунту вступати в окисно-відновні реакції можна виміряти за допомогою **окисно-відновного потенціалу (ОВП). Нормальний окисно-відновний потенціал**

дорівнює окисно-відновному потенціалу системи, в якій активність окисленої та відновленої форм речовини рівні [13].

Найважливіші цикли перетворення азоту в ґрунті – процеси нітрифікації та денітрифікації пов'язані з умовами аерації і, відповідно, з особливостями окисно-відновного режиму. Процеси нітрифікації найбільш інтенсивно розвиваються в умовах доброї аерації ґрунту, а оптимальний ОВП складає 0,35–0,55 В. Зниження аерації значно ускладнює процес нітрифікації, який сповільнюється на стадії утворення нітритів. В анаеробних умовах розвиваються відновлювальні процеси і нітрифікація повністю припиняється, а в ґрунті переважають процеси денітрифікації, з якими пов'язані основні втрати азоту з ґрунту.

І. П. Сердобольський розробив градацію окисно-відновних умов розвитку процесів денітрифікації: ОВП >0,48 В – нітрати; ОВП 0,48–0,34 В – нітрати-нітрити; ОВП 0,34–0,20 В – нітрити; ОВП <0,20 – оксиди азоту-молекулярний азот [13].

Динаміка ОВП обернена до динаміки вмісту закисного заліза. При вирощуванні рису, до затоплення чеків, ОВП становить

0,08–0,16 (помірно відновні процеси), потім даний показник опускається до –0,03...–0,14, що свідчить про інтенсивні процеси відновлення, після осушення чеків ОВП піднімається до 0,08–0,18 (рисунок 1).

Коефіцієнт варіації ОВП за вирощування рису становить 18,95–33,00%, що свідчить про середній рівень варіативності низки даних та про їх типовість. Динаміку ОВП орного шару ґрунту РЗС за вирощування рису можна описати рівнянням квадратичної параболи, при цьому коефіцієнт детермінації становитиме 0,85 (рис. 1).

В умовах краплинного зрошення за вирощування рису ОВП орного шару ґрунту варіювався в межах від –0,041 до 0,272. Даний показник до початку поливу рису становив 0,214–0,272, що свідчить про помірно відновні процеси в ґрунті, потім ОВП знижувався від 0,075–0,086, до –0,041. В період від 10.07 до 20.09 в орному шарі ґрунту переважають відновні процеси. Після 20.09 значення ОВП піднімаються до початкових значень (рис. 2).

Статистична оцінка результатів досліджень ОВП орного шару ґрунту полігону краплинного зрошення свідчить про низьку

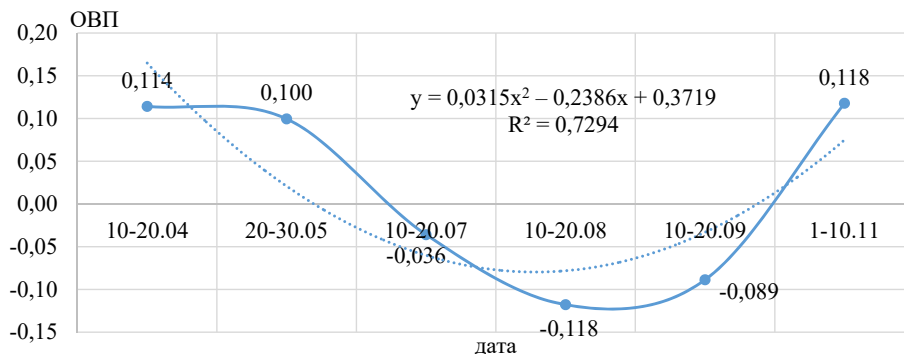


Рис. 1. Модель динаміки окисно-відновного потенціалу в орному шарі ґрунту РЗС за вирощування рису

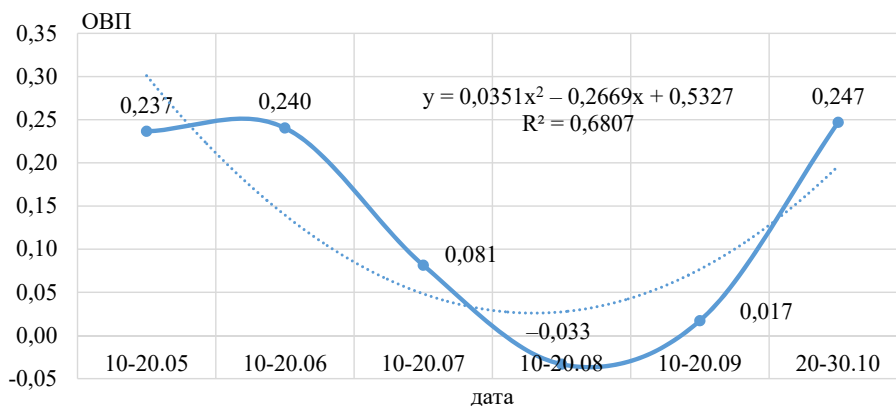


Рис. 2. Модель динаміки окисно-відновного потенціалу орного шару ґрунту за краплинного зрошення рису

та середню варіативність даних. Коефіцієнт варіації за вирощування рису становить 6,25–19,26. Динаміка ОВП орного шару ґрунту полігону краплинного зрошення за вирощування рису описана рівнянням квадратичної параболи (рис. 2). Коефіцієнт детермінації становить за вирощування рису 0,83.

Висновки. Проаналізовано окисно-відновний режим орного шару ґрунтів рисових сівозмін за вирощування рису, визначено, що даний процес має сезонний характер – у період підтримання шару води на полі в орному шарі ґрунту протікають інтенсивно процеси відновлення, після збирання врожаю та осушення чеків інтенсивність відновних процесів помірна і знижується. Динаміка окисно-відновного потенціалу протягом вегетаційного режиму рису описана рівнянням квадратичної параболи.

Вирощування рису в умовах краплинного зрошення також призводить до зниження окисно-відновного потенціалу до від'ємних значень, але на короткий період, що не впливає негативно на ґрунт. Динаміка даного показника в умовах краплинного зрошення описана рівнянням квадратичної параболи.

Постійний моніторинг даного процесу дозволяє характеризувати стабільність коливань окисно-відновної рівноваги ґрунтового середовища, що є важливим для оцінювання якості ґрунту. При дотриманні науково-обґрунтованих сівозмін та задовільного технічного стану рисової системи забезпечується швидке осушення чеків та зниження рівня підґрунтових вод після закінчення поливу рису, що дозволяє підтримувати родючість ґрунтового покриву на високому рівні та не допустити розвиток деградаційних процесів.

Бібліографія

1. Ванцовський А. А., Вожегова Р. А., Вожегов С. Г. Рис – цінна харчова культура. Нетрадиционное растениеводство. Эниология. Экология и здоровье : материалы XIV международного симпозиума : тезисы докл. Симферополь, 2005. С. 211–213.
2. Ромащенко М. І., Балюк С. А. Зрошення земель в Україні. Стан та шляхи поліпшення. Київ : Світ, 2000. 114 с.
3. Ромащенко М. І., Драчинська Е. С., Шевченко А. М. Інформаційне забезпечення зрошувального землеробства. Концепція, структура, методологія організації. Київ : Аграрна наука, 2005. 196 с.
4. Гуророва О. А. Современное состояние плодородия почв рисовых агроландшафтов Кубани и тренд его изменения в процессе сельскохозяйственного использования : дис. ... доктора с.-г. наук: 03.02.13 Краснодар : Всероссийский научно-исследовательский институт риса, 2020. 509 с.
5. Гуророва О. А., Шеуджен А. Н. Морфогенез рисовых лугово-болотных почв Кубани // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2016. № 6. С. 25–27.
6. Тронза Г. В., Баширов М. А. Эволюция почв рисовых агроценозов сухостепной зоны Крыма // *Агрономия и лесное хозяйство*. 2015. № 5. С. 33–53.
7. Soil texture and cultivar effects on rice (*Oryza sativa*, L.). Grain yield, yield components and water productivity in three water regimes / Fugen Dou and other // *PLoS One*. 2016. 11(3). e0150549. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150549>
8. Тортник М. Й. Особливості засоленості ґрунтів рисових систем Одещини // *Геополітика та есореодинаміка регіонів*. 2014. № 5. С. 909–913.
9. Soil domestication by rice cultivation results in plant-soil feedback through shifts in soil microbiota / Edwards, J. and other // *Genome Biol*. 2019. № 20. P. 221. <https://genomebiology.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13059-019-1825-x>
10. Титков А. А. О возможном развитии неблагоприятных последствий прекращения работы Северо-Крымского канала для Крымского рисосеяния // *Известия сельскохозяйственной науки Тавриды*. 2016. № 7(170). С. 23–27.
11. Титков А. А., Кольцов А. В. Влияние орошения затоплением на мелиоративные условия и почвенный покров Присивашья. Симферополь, 1995. 196 с.
12. Рис в Україні : [колективна монографія / за ред. д.т.н., професора, член-кор. НААНУ В. А. Сташука, д.т.н., професора А. М. Рокочинського, д.е.н., професора Л. М. Грановської. Херсон : Гринь Д. С., 2014. 976 с.
13. Орлов Д. С. Химия почв : учебник. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Изд-во МГУ, 1992. 400 с.
14. Зонн С. В. Железо в почвах (генетические и географические аспекты). Москва : Наука, 1982. 208 с.

References

1. Vantsovskiy, A. A., Vozhehova, R. A., & Vozhehov S. H. (2005). Rys – tsinna kharchova kultura [Rice is a valuable food crop]. *Netradytsyonnoe rastenyevodstvo. Enyolohyia. Ekolohyia y zdorove : materyalu KhIV mezhdunarodnoho sympozyuma. Symferopol*, 211–213. [in Russian]
2. Romashchenko, M. I., & Baliuk, S. A. (2000). Zroshennia zemel v Ukraini. Stan ta shliakhy polipshennia [Irrigation in Ukraine. State and ways to improve]. Kyiv : Svit. [in Ukrainian]
3. Romashchenko, M. I., Drachynska, E. S., & Shevchenko, A. M. (2005). Informatsiine zabezpechennia zroshuvanoho zemlerobstva. Kontseptsii, struktura, metodolohiia orhanizatsii [Information support of irrigated agriculture. Concept, structure, methodology of the organization]. Kyiv : Ahrarna nauka. [in Ukrainian]
4. Hutorova, O. A. (2020). Sovremennoe sostoianye plodorodyia pochv risovykh ahrolandshaftov Kubani i trend eho izmeneniya v protsesse selskokhoziaistvennoho ispolzovaniya [The current state of soil fertility of rice agrolandscapes of Kuban and the trend of its change in the process of agricultural use]. Doctor's thesis. Krasnodar : Vserossyiskiy nauchno-ysledovatel'skiy institut risa. [in Russian]
5. Hutorova, O. A., & Sheudzen, A. N. (2016). Morfohenez rsovykh luhovo-bolotnykh pochv Kubani [Morphogenesis of rice meadow-swamp soils of Kuban]. *Rossyiskaia selskokhoziaistvennaia nauka*, 6, 25-27. [in Ukrainian]
6. Tronza, H. V., & Bashyrov, M. A. (2015). Evoliutsiya pochv risovyykh ahrotsenozov sukhostepnoi zony Kryma [Evolution of rice agrocenoses soils of the dry steppe zone of Crimea]. *Ahronomyia y lesnoe khoziaistvo*, 5, 33–53. [in Russian]
7. Fugen, Dou, Junel, Soriano, Rodante E., Tabien, Kun, Chen. (2016). Soil texture and cultivar effects on rice (*Oryza sativa*, L.). Grain yield, yield components and water productivity in three water regimes. *PLoS One*, 11(3), e0150549. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150549>
8. Tertyk, M. Y. (2014). Osoblyvosti zasolenosti hruntiv rysovykh system Odeshchyny [Features of salinity of rice systems soil of Odesa region]. *Neopolityka ta esoreodynamika rehioniv*, 5, 909–913. [in Ukrainian]
9. Edwards, J., Santos-Medellín, C., Nguyen, B., Kilmer, J., Liechty, Z., Veliz, E., Ni, J., Phillips, G., Sundaresan, V. (2019). Soil domestication by rice cultivation results in plant-soil feedback through shifts in soil microbiota. *Genome Biol*, 20, 221. <https://genomebiology.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13059-019-1825-x>
10. Titkov, A. A. (2016). O vozmozhnom razvitii neblahopryiatnykh posledstvyi prekrashcheniya raboty Severo-Krymskoho kanala dlia Krymskoho rysoseianiya [About possible development of adverse consequences of the termination of work of the North Crimean channel for the Crimean rice growing]. *Yzvestiya selskokhoziaistvennoi nauky*, 7(170), 23–27. [in Russian]
11. Titkov, A. A., & Kol'cov, A. V. (1995). Vliyanie orosheniya zatopleniem na meliorativnyie usloviya i pochvennyi pokrov Prisivashya [The effect of irrigation by flooding on reclamation conditions and soil cover of the Sivash region]. *Simferopol*. [in Russian]
12. Stashuk, V. A. (Ed.), Rokochynskiy, A. M. (Ed.), & Hranovska, L. M. (Ed.) (2014). Rys v Ukraini [Rise in Ukraine]. Kherson : Hrin D. S. [in Ukrainian]
13. Orlov, D. S. (1992). Khimia pochv [Soil chemistry] Moskva : Yzd-vo MHU. [in Russian]
14. Zonn, S. V. (1982). Zhelezo v pochvakh (henetycheskie i heoraficheskie aspekty) [Iron in soils (genetic and geographical aspects)]. Moskva : Nauka. [in Russian]

Е.В. Дудченко, Т.Н. Петренко, Е.И. Флинта, Н.Н. Дацюк

Влияние режима орошения риса на окислительно-восстановительный режим почв

***Аннотация.** При выращивании риса в условиях затопления на поле в течение 3-х месяцев поддерживается слой воды, протекают процессы, провоцирующие изменение состава органических и минеральных компонентов почвы, а именно: вынос легкорастворимых веществ и подвижных форм элементов питания, доминирование восстановительных процессов над окислительными. Капельное орошение посевов риса изменяет солевой и водно-воздушный режимы почвы, что приводит к формированию солевых мешков и токсическому засолению почвы в слое 0–60 см. Негативное влияние капельного орошения не столь ощутимо, по сравнению с поливом затоплением, и может быть ликвидировано соблюдением севооборота с наполненностью основной культурой риса не более 50%. Исследование проводили в течение 2016–2020 гг. на территории Института риса НААН и ГП «ОХ Института риса НААН» (Скадовский район, Херсонская область), почвенный покров представлен темно-каштановой солонцеватой почвой. Изучение влияния выращивания риса в условиях затопления проводили на рисовой оросительной системе площадью 190 га, а в условиях капельного орошения на полигоне площадью 4 га. Окислительно-восстановительный режим пахотного*

слоя почв рисовых севооборотов при выращивании риса имеет сезонный характер – в период поддержания слоя воды на поле в почве преобладают процессы восстановления, после уборки урожая и осушения чеков интенсивность восстановительных процессов умеренная и снижается. Построена модель, описывающая данный процесс уравнением квадратичной параболы. Выращивание риса в условиях капельного орошения также приводит к снижению окислительно-восстановительного потенциала до отрицательных значений, но на короткий период, что не оказывает негативное влияние на почву. Динамика данного показателя в условиях капельного орошения описана уравнением квадратичной параболы. Постоянный мониторинг данного процесса позволяет характеризовать стабильность колебаний окислительно-восстановительного равновесия почвенной среды, что является важным для оценки качества почвы.

Ключевые слова: рис, почва, орошение затоплением, капельное орошение, окислительно-восстановительный режим

K. V. Dudchenko, T. M. Petrenko, O. I. Flinta, M. M. Datsiuk

Effect of the irrigation regime of rise on soil oxidation-reduction status

Abstract. During the cultivation of rice in the field for 3 months, the required water layer is maintained. In these conditions, there are the processes that lead to changes in the composition of organic and mineral components of the soil, namely: removal of easily soluble substances and mobile forms of nutrients, the dominance of reduction processes over oxidation ones. Irrigation of rice crops using drip irrigation also causes changes in salt and water-air regimes, which leads to the formation of salt bags and toxic salinization of the soil in a layer of 0–60 cm. The negative effect of drip irrigation is not so noticeable compared to flooding conditions and can be eliminated by observing crop rotation with the rate of the main crop not more than 50%.

The research was conducted during 2016–2020 in the territory of the Rice Institute of NAAS and its experimental farm (Skadovsk district, Kherson region), where the soil cover is represented by dark chestnut saline soil. The study of the effect of rice cultivation in flood conditions was carried out on a rice irrigation system with an area of 190 ha, and under drip irrigation – on a demonstration trail with an area of 4 ha. The oxidation-reduction status of the arable soil layer of rice crop rotations when rice growing, is seasonal. In the period of water layer maintaining in the field, in the arable layer reduction processes predominate, while after harvesting and checks draining the intensity of the reduction processes is moderate and decreases.

A model describing this process by the equation of a quadratic parabola was constructed. Growing rice under drip irrigation also reduces the oxidation-reduction soil capacity to negative values, but for a short period, which does not adversely affect the soil. The dynamics of this indicator in the conditions of drip irrigation is described by the equation of a quadratic parabola. Continuous monitoring of this process enables to evaluate the stability of fluctuations of the oxidation-reduction soil balance, which is important for assessing soil quality.

Key words: rice, soil, flood irrigation, drip irrigation, oxidation-reduction status

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-299>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/299>

УДК 633.88:631.53.03

ЕФЕКТИВНІСТЬ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРИЙОМІВ ВИРОЩУВАННЯ ЛІКАРСЬКИХ КУЛЬТУР НА ЗРОШЕННІ

А.П. Шатковський¹, докт. с.-г. наук, Н.В. Приведенюк², канд. с.-г. наук, Л.А. Глущенко³, канд. біол. наук

¹ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0002-4366-0397>; e-mail: andriy-1804@ukr.net;

² Дослідна станція лікарських рослин ІАП НААН, с. Березоточа, Лубенський район, Полтавська область, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-0748-8083>; e-mail: privedenyuk1983@gmail.com;

³ Дослідна станція лікарських рослин ІАП НААН, с. Березоточа, Лубенський район, Полтавська область, Україна; <https://orcid.org/0000-0003-2329-5537>; e-mail: l256@ukr.net

Анотація. У статті наведено результати експериментальних досліджень з оптимізації густоти садіння лікарських рослин родини *Lamiaceae* Juss. (Губоцвіті) як фактору формування їх продуктивності в умовах краплинного зрошення. Науково-дослідну роботу проведено з найбільш поширеними лікарськими культурами цієї родини: материнкою звичайною (*Origanum vulgare* L.), мелісою лікарською (*Melissa officinalis* L.), м'ятою перцевою (*Mentha piperita* L.) та чебрецем звичайним (*Thymus vulgaris* L.) в умовах Лівобережного Лісостепу України протягом 2016–2020 рр. на землях Дослідної станції лікарських рослин Інституту агроєкології та природокористування НААН (Лубенський район Полтавської області) за участю Інституту водних проблем і меліорації НААН (ІВПіМ). В однофакторному польовому досліді вивчено 8 елементарних варіантів густоти садіння рослин: від 33 тис./га до 222,0 тис./га. Під час проведення досліджень доведено, що, незважаючи на генетичну спорідненість, представники родини *Lamiaceae* Juss. мають доказово різну реакцію на густоту висаджування рослин в умовах краплинного зрошення. Так, найвищу врожайність сухої трави материнки звичайної як на перший так і на другий рік вирощування було отримано у варіанті з густотою садіння 166,7 тис. росл./га. Найбільш продуктивні посіви меліси лікарської першого та другого років вирощування були за густоти 83,3 тис. росл./га. Найвищу врожайність чебрецю звичайного на перший рік отримали у варіанті 222,0 тис. росл./га., а на другий рік – у варіанті з густотою 111,0 тис. росл./га. М'ята перцева найвищу продуктивність формувала за густоти 55,6 тис. росл./га як на першому, так і на другому році вегетації. Новим науковим результатом є отримані залежності врожайності лікарських рослин родини *Lamiaceae* Juss. від кількості рослин на одиницю площі, які описано відповідними математичними рівняннями.

Ключові слова: лікарські культури, густота рослин, краплинне зрошення, урожайність, математичні залежності

Актуальність дослідження. Лікарське рослинництво – нішева галузь сільсько-господарського виробництва, яка все більше привертає увагу товаровиробників через зростання попиту на вітчизняну лікарську рослинну сировину як на внутрішньому, так і на зовнішньому споживчих ринках. Проте усталена практика вирощування лікарських культур, яка ще 5–10 років тому була ефективною, у зв'язку з кліматичними трансформаціями не забезпечує отримання високих урожаїв якісної лікарської сировини. Тому все гостріше постає питання удосконалення технологій та окремих технологічних прийомів вирощування лікарських культур. Вирішення цих питань потребує комплексного підходу, тому впродовж 2016–2020 рр. Дослідна станція лікарських рослин Інституту агроєкології та природокористу-

вання НААН (ДСЛР) спільно з Інститутом водних проблем і меліорації НААН (ІВПіМ) проводили дослідження з розроблення та оцінювання ефективності агротехнологічних прийомів вирощування лікарських культур на зрошенні. Зокрема, проведено дослідження з визначення оптимальної густоти садіння лікарських рослин родини *Lamiaceae* Juss. (Губоцвіті) в умовах краплинного зрошення. Науково-дослідну роботу проведено з найпоширенішими представниками цієї родини: материнкою звичайною (*Origanum vulgare* L.), мелісою лікарською (*Melissa officinalis* L.), м'ятою перцевою (*Mentha piperita* L.) та чебрецем звичайним (*Thymus vulgaris* L.).

Для материнки звичайної, меліси лікарської і чебрецю звичайного характерне дуже дрібне насіння – маса 1000 шт. становить лише 0,07 г, 0,6 г та 0,25 г відповідно, що

потребує особливих умов для проростання. Дрібнонасінність значно ускладнює їх розмноження через пряме висівання у відкритий ґрунт, тому ці культури доцільно вирощувати через розсаду із застосуванням зрошення [1, 2, 3, 13, 14].

М'ята перцева є гібридом, тому збереження сортових і господарсько-цінних ознак забезпечується лише за розмноження вегетативним способом – кореневищами або розсадою (відростки вегетуючих рослин у фазі 6–8 справжніх листків) [4–6]. За розсадного способу розмноження м'яти в умовах краплинного зрошення актуальним є питанням вивчення особливостей росту і розвитку культури в нових умовах та встановлення оптимальної площі живлення.

М'ята перцева – багаторічна ефіроолійна та лікарська культура, сировиною якої є трава, листя, ефірна олія та її компоненти, зокрема ментол. Сировину м'яти широко застосовують як у хіміко-фармацевтичній промисловості, так і в парфумерно-косметичному, харчовому, лікєро-горілчаному, лакофарбувальному, кондитерському і тютюновому виробництві та інших галузях [1, 4, 5]. Широке застосування культури обумовлює торговий ресурс різновекторного напрямку продуктивності та значні посівні площі у світі. М'яту вирощують в Англії, Болгарії, Франції, Індії, Єгипті, Японії, США, Канаді, Італії та Молдові. В Україні цю рослину культивують по всій території, а найбільші виробничі плантації розміщено у Кіровоградській області [1, 2].

Материнка звичайна – багаторічна лікарська рослина, сировиною якої є надземна маса, зібрана у фазу цвітіння [7–10]. Оскільки природні запаси виду досить значні, основна маса сировини, що представлена на ринку, є дикорослою. Основним контрольованим параметром якості сировини материнки звичайної є вміст ефірної олії та її компоненти [3, 8]. Сировина зібрана в природних умовах на території України, часто не відповідає національним вимогам, які є дещо нижчими за вимоги Європейської фармакопеї. Для отримання сировини з відповідним вмістом ефірної олії материнку звичайну вирощують розсадним способом. Досвід багатьох країн світу із застосування систем і методів управління якістю в процесі вирощування сировини материнки звичайної вказує на перспективність застосування елементів інтенсивних технологій [7–12]. Зокрема, питання оцінювання ефективності застосування зрошення в комплексі із внесенням добрив вивчали німецькі, іранські та єгипетські вчені, які

визначили оптимальні режими зрошення для отримання стабільних урожаїв сировини з високим вмістом ефірної олії [9, 10, 12]. Разом з тим, низкою дослідників було вивчено питання впливу деяких агротехнологічних прийомів вирощування материнки звичайної на якість отримуваної сировини. Так, польськими вченими з Варшавського університету наук про життя встановлено, що якість сировини можна корегувати термінами її збирання [11].

Меліса лікарська – багаторічна трав'яниста рослина із специфічним лимонним ароматом. Сировиною цієї культури є надземна частина (трава), яка здавна широко застосовується традиційною медициною [1, 2, 3, 15]. У світовій практиці меліса лікарська широко культивується в Німеччині, Туреччині, Росії, США та ін. країнах. На території України її вирощують як культурну рослину, але в Криму вона також зустрічається як дикорос: на лісових галявинах, по берегах водойм та на узбіччях [1, 2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблеми, пов'язані з необхідністю удосконалення технологій вирощування лікарських і ефіроолійних рослин в умовах змін клімату, притаманні в більшості країн світу, про що свідчать численні публікації [7–12]. Так, у європейських країнах проведені дослідження з розроблення агротехнологічних прийомів розсадного способу вирощування деяких лікарських культур. Серед основних напрямів є вивчення та впровадження енергозберігаючих та екологічно безпечних технологій культивування. До прикладу, турецькі вчені провели дослідження з вивчення впливу площі живлення меліси лікарської на врожайність та якість сировини в умовах Фракійської області Північно-Західної Туреччини. Найвищу врожайність (11,167 т/га) було отримано на другому році вегетації за схеми вирощування 40 x 20 см. Вміст ефірної олії (0,20–0,28%) істотно не змінювався за варіантами досліду [17, 18]. В умовах Єгипту встановлено вплив площі живлення меліси лікарської на її продуктивність. Доведено, що збільшення кількості рослин на одиницю площі сприяло підвищенню врожайності сировини культури, а зменшення кількості рослин сприяло їх кращому росту та розвитку [16].

Чебрець звичайний – багаторічна лікарська рослина, яка в природних умовах зростає в країнах Середземномор'я [19, 20]. В Україні зустрічається лише в культурі [21, 22, 23]. У світі описано понад 360 видів, що належать до роду *Thymus* L., найпоширенішим

у світі видом, який зазвичай культивується, є чебрець звичайний (*Thymus vulgaris*) [1, 24, 25]. Досить значне поширення свідчить про високу пластичність виду до різних умов навколишнього середовища. Лікарською сировиною чебрецю звичайного є надземна частина – трава або обмолочене листя із суцвіттями. Основною біологічно активною речовиною сировини є ефірна олія, до складу якої входять – карвакрол та тимол [1, 21, 23, 26]. Суха сировина та ефірна олія рослини чебрецю звичайного мають велике значення для фармацевтичної, косметичної та парфумерної промисловості, це також популярна пряна рослина, яка використовується як самостійно, так і для виготовлення спецій [27]. Наукові дослідження з удосконалення технології вирощування чебрецю звичайного шляхом застосування мінеральних добрив, зрошення, регуляторів росту проведено вченими Литви, Чехії, Ірану, Єгипту, Туреччини та ін. країн. Зокрема, вплив азотних добрив на врожайність та якість сировини чебрецю досліджували литовські вчені: вони встановили, що внесення азоту підвищувало врожайність сухої трави та збільшувало вихід ефірної олії з одиниці площі [28]. В умовах Йорданії протягом 2007–2008 рр. вивчали вплив ширини міжрядь на продуктивність чебрецю: найвищу врожайність сировини отримали за ширини міжрядь 15 см як на першому, так і на другому році вегетації [20]. Іранські вчені досліджували вплив міжполивного інтервалу та густоти висаджування на врожайність чебрецю. Встановлено, що при загущенні посівів чебрецю звичайного маса рослин та вміст ефірної олії знижувалися, а зміна інтервалів міжполивних періодів не вплинула на врожайність культури [29]. В Україні на базі Херсонського аграрно-економічного університету проведено дослідження із впливу внесення мінеральних та органічних добрив, глибини основного обробітку ґрунту, термінів сівби та ширини міжрядь на продуктивність чебрецю звичайного. Було встановлено, що внесення гною та мінеральних добрив на фоні глибокої оранки (28–30 см) покращувало водний і поживний режими ґрунту, мало позитивний вплив на фітосанітарний стан плантацій і забезпечувало найвищу врожайність та якість сировини цієї культури [21, 22].

Мета дослідження. Встановити вплив густоти висаджування лікарських рослин родини *Lamiaceae* на їх продуктивність за краплинного зрошення в умовах Лівобережного Лісостепу.

Матеріали та методи досліджень.

Польові дослідження проведено протягом 2016–2020 рр. на полях ДСЛР ІАП НААН (Полтавська обл. Лубенський район) спільно з ІВПіМ НААН.

Ґрунт дослідного поля – чорнозем потужний, легкосуглинковий, малогумусний, потужність гумусового горизонту становить 87–100 см. Реакція ґрунтового розчину слабко-кисла, за обмінною кислотністю ґрунт характеризується як середньокислий. Забезпеченість ґрунту основними елементами живлення: легкогідролізованим азотом – низька, рухомим фосфором – дуже висока, обмінним калієм – підвищена. За сумою солей ґрунт належить до незасолених. Найменша вологомісткість (НВ) метрового шару – 18,2%, 0–50 см – 17,5%, щільність складення – 1,32 г/см³.

Розробку схем дослідів проводили за методиками Доспехова Б.О. з урахуванням специфіки краплинного зрошення [31–32]. Відбір рослинних зразків, біометричні виміри та фенологічні спостереження проводили з урахуванням особливостей лікарських культур за методиками Брикіна А.І. та Поради О.А. [30, 33].

Розсаду висаджували у відкритий ґрунт протягом I декади травня за схемами:

– материнку звичайну (*Origanum vulgare* L.) та мелісу лікарську (*Melissa officinalis* L.) – 41,7 тис. росл./га (60 x 40 см), 55,6 тис. росл./га (60 x 30 см), 83,3 тис. росл./га (60 x 20 см), 166,7 тис. росл./га (60 x 10 см);

– чебрець звичайний (*Thymus vulgaris* L.) – 55,6 тис. росл./га (45 x 40 см), 74,1 тис. росл./га (45 x 30 см), 111,1 тис. росл./га. (45 x 20 см) та 222,2 тис. росл./га (45 x 10 см);

– м'яту перцеву (*Mentha piperita* L.) – 33,3 тис. росл./га (60 x 50 см), 41,7 тис. росл./га (60 x 40 см), 55,6 тис. росл./га (60 x 30 см), 83,3 тис. росл./га (60 x 20 см).

Закладання дослідної ділянки м'яти перцевої сорту Мама проводили розсадою 10–12 см заввишки у фазі 4–5 пар справжніх листків; меліси лікарської (місцева популяція) – розсадою, вирощеною з насіння 8–10 см заввишки у фазі 4–5 пар справжніх листків; материнки звичайної сорту Україночка – 10–12 см заввишки у фазі 5–6 пар справжніх листків, чебрецю звичайного сорту Духмяний – 8–9 см заввишки у фазі 6–8 пар справжніх листків.

Загальна площа ділянок – 35–55 м², облікова – 20–35 м² за чотириразового повторення. Розміщення ділянок рендомізоване.

Протягом вегетації чебрецю звичайного, материнки звичайної та меліси лікарської

вологість ґрунту у шарі 0–40 см підтримували на рівні 75–80% від найменшої вологомісткості, на дослідних ділянках із м'ятою перцевою вологість ґрунту утримувалася на рівні 80–85% від найменшої вологомісткості за допомогою системи краплинного зрошення. Контроль за вологістю ґрунту виконували тензіометричними датчиками типу ВВТ-П.

Облік урожайності здійснювали у фазу цвітіння культур. Чебрець звичайний, мелісу лікарську та м'яту перцеву скошували на висоті 5 см від поверхні ґрунту, материнку звичайну скошували на висоті нижнього ярусу листя (15–20 см від поверхні ґрунту). Висушували зібрану сировину природним шляхом до вологості 10–12%.

Результати дослідження та їх обговорення. Під час виконання досліджень зі встановлення впливу густоти висаджування лікарських рослин родини *Lamiaceae* в умовах зрошення визначено, що збільшення кількості рослин на одиницю площі сприяло підвищенню урожайності культур. Так, за густоти 41,7 тис./га рослин урожайність сухої сировини материнки звичайної першого року вегетації становила 1,76 т/га. Зі збільшенням кількості висаджених рослин до 55,6 тис./га урожайність підвищилася до 2,07 т/га. За густоти 83 тис./га рослин материнка звичайна сформувала урожайність сухої трави на рівні 2,75 т/га. Найбільшу ж урожайність – 3,16 т/га зафіксовано у варіанті з густотою 166,7 тис./га, що збільшило урожайність на 79,5% порівняно з варіантом із густотою садіння 41,7 тис./га. Материнка звичайна в перший рік вегетації формувала відносно невеликі за розміром рослини, тому збільшення густоти садіння рослин навіть до 166,7 тис./га сприяло підвищенню продуктивності посівів (табл. 1).

Аналіз даних з урожайності сухої трави меліси лікарської першого року вегетації

залежно від густоти садіння виявив, що кращим за виходом сировини є варіант із густотою 83,3 тис. росл./га, де врожайність складала 4,53 т/га. Подальше збільшення кількості рослин на одиницю площі – до 166,7 тис. росл./га достовірно знижувало врожайність на 0,84 т/га – до 3,69 т/га. Мінімальний вихід сухої сировини – 3,45 т/га з одиниці площі на першому році вегетації отримано у варіанті з найменшою густотою рослин – 41,7 тис. росл./га. Меліса лікарська має біологічну особливість – зі збільшенням густоти садіння понад 83,3 тис. росл./га площа листової поверхні рослин знижується і, як наслідок, знижується врожайність посівів.

Підвищення врожайності від збільшення кількості висаджених рослин на одиницю площі також добре підтверджують досліді з чебрецем звичайним, особливо – на першому році вегетації культури. У варіанті з густотою 55,6 тис. росл./га урожайність сухої трави на першому році вегетації становила 1,70 т/га, зі збільшенням кількості рослин до 74,0 тис. росл./га урожайність трави підвищилася до 2,46 т/га. У варіанті з густотою 111,0 тис. росл./га вихід сухої сировини становив 3,05 т/га, а найвищу врожайність сухої трави чебрецю звичайного – 3,37 т/га першого року вегетації було отримано у варіанті з найбільшою густотою рослин – 222,0 тис. росл./га. Чебрець звичайний серед досліджуваних культур має найменші лінійні розміри – його висота у перший рік вегетації не перевищує 30 см, а діаметр куща – 20 см, тому збільшення кількості рослин навіть до 222,0 тис. росл./га сприяло підвищенню врожайності посівів.

За дослідження впливу площі живлення рослин на врожайність сухої трави м'яти перцевої першого року вегетації було встановлено, що за густоти садіння 33,3 тис. росл./га

Густота садіння рослин	Урожайність, тонн/га			
	материнка звичайна	меліса лікарська	чебрець звичайний	м'ята перцева
33,3 тис./га	–*	–	–	0,68
41,7 тис./га	1,76	3,45	–	0,78
55,6 тис./га	2,07	4,06	1,70	0,82
74,0 тис./га	–	–	2,46	–
83,3 тис./га	2,75	4,53	–	0,79
111,0 тис./га	–	–	3,05	–
166,7 тис./га	3,16	3,69	–	–
222,0 тис./га	–	–	3,37	–
НІР0.5	0,13	0,21	0,15	0,06

–* досліджень за цим варіантом не проводили.

урожайність становила 0,68 т/га. Збільшення кількості рослин на 1 га до 41,7 тис. сприяло підвищенню врожайності до 0,78 т/га. Найвищу ж продуктивність посівів м'яти перцевої першого року вегетації – 0,82 т/га було отримано за густоти 55,6 тис. росл./га. Подальше збільшення кількості висаджених рослин на одиницю площі знижувало врожайність листя, що пояснюємо конкуренцією рослин за освітлення і доступні елементи живлення. Із подальшим збільшенням густоти рослини м'яти формують більше стеблової частини, облиственість рослин знижувалась, як наслідок знижувався і загальний вихід та врожайність фармацевтичної сировини – листя.

Досліджувані лікарські рослини родини *Lamiaceae* упродовж другого року вегетації більш інтенсивно розвивалися та мали значно більші лінійні розміри, як наслідок – їх урожайність також була вищою. Зокрема, материнка другого року вегетації в умовах зрошення формувала фітомасу достатню для проведення двох укосів сировини: перший укіс проводили на початку липня, другий – у середині вересня. Тенденція до збільшення врожайності сухої сировини зі збільшенням кількості висаджених рослин зберігалася і на другому році вегетації культури. Так, за густоти 41,7 тис. росл./га врожайність сухої трави материнки звичайної становила 6,10 т/га, а збільшення кількості рослин до 55,6 тис./га сприяло збільшенню врожайності до 7,37 т/га. Найвищу ж продуктивність материнки звичайної другого року вегетації було зафіксовано у варіанті з максимальною густотою – 166,7 тис. росл./га, де врожайність сухої трави за два укоси становила 10,08 т/га, достовірно перевищуючи варіант

із найменшою густотою на 4,02 т/га. Досить високу продуктивність материнки звичайної пояснюємо сприятливими погодними умовами для росту та розвитку культури, а ключовим фактором було застосування краплинного зрошення у поєднанні з фертигацією, яке протягом всього періоду вегетації оптимізувало водний і поживний режими. Завдяки цьому, рослини інтенсивно розвивалися, їх висота на дослідних ділянках у фазу цвітіння становила біля 70 см, що не є характерним для цієї рослини в богарних умовах вирощування (табл. 2).

Встановлено залежність урожайності сухої трави меліси лікарської другого року вегетації від кількості висаджених рослин на одиницю площі. Так, мінімальний вихід сухої сировини 5,5 т/га отримано у варіанті з найменшою густотою рослин – 41,7 тис. росл./га. Збільшення кількості рослин до 55,6 тис. росл./га забезпечило отримання сухої сировини меліси на рівні 6,7 т/га. Найвищу продуктивність меліси лікарської другого року вегетації – 6,99 т/га було зафіксовано у варіанті з густотою 83,3 тис. росл./га, а подальше збільшення кількості рослин знижувало врожайність.

На другому році вегетації чебрецю звичайного у варіанті 56 тис. росл./га урожайність сухої трави становила 3,56 т/га, а збільшення кількості рослин до 74 тис./га забезпечувало отримання врожайності на рівні 4,89 т/га. Найвищу врожайність сухої трави чебрецю звичайного – 5,12 т/га другого року вегетації було отримано у варіанті з густотою 111 тис. росл./га. Подальше збільшення кількості рослин на одиницю площі знижувало врожайність сировини, що пояснюємо конкуренцією рослин за освітлення, вологу та поживні речовини.

2. Вплив густоти висаджування рослин на врожайність сухої сировини лікарських рослин родини *Lamiaceae* другого року вегетації в умовах краплинного зрошення

Густота садіння рослин	Урожайність, тонн/га			
	материнка звичайна	меліса лікарська	чебрець звичайний	м'ята перцева
33,3 тис./га	–*	–	–	1,74
41,7 тис./га	6,10	5,50	–	1,98
55,6 тис./га	7,37	6,70	3,56	2,25
74,0 тис./га	–	–	4,89	–
83,3 тис./га	9,12	6,99	–	2,12
111,0 тис./га	–	–	5,12	–
166,7 тис./га	10,08	6,57	–	–
222,0 тис./га	–	–	5,03	–
НІР0.5	0,18	0,12	0,07	0,11

–* досліджень за цим варіантом не проводили.

Залежність урожайності лікарських рослин родини *Lamiaceae* від кількості рослин на одиницю площі описано математично такими рівняннями:

– для материнки звичайної (*Origanum vulgare* L.):

$y = -1E-10x^2 + 4E-05x + 0,2092$, $R^2 = 0,99$ – перший рік вегетації;

$y = -5E-10x^2 + 0,0001x + 1,4102$, $R^2 = 0,99$ – другий рік вегетації;

– для меліси лікарської (*Melissa officinalis* L.):

$y = -3E-10x^2 + 6E-05x + 1,4301$, $R^2 = 0,98$ – перший рік вегетації;

$y = -3E-10x^2 + 8E-05x + 3,1268$, $R^2 = 0,83$ – другий рік вегетації;

– для м'яти перцевої (*Mentha piperita* L.):

$y = -2E-10x^2 + 2E-05x + 0,189$, $R^2 = 0,99$ – перший рік вегетації;

$y = -5E-10x^2 + 7E-05x - 0,0371$, $R^2 = 0,99$ – другий рік вегетації;

– для чебрецю звичайного (*Thymus vulgaris* L.):

$y = -1E-10x^2 + 5E-05x - 0,3787$, $R^2 = 0,98$ – перший рік вегетації;

$y = -2E-10x^2 + 6E-05x + 1,2043$, $R^2 = 0,80$ – другий рік вегетації;

де y – урожайність сухої сировини, т/га,
 x – кількість рослин, тис. шт./га,
 R^2 – величина достовірності апроксимації.

Величина достовірності апроксимації становить від 0,80 до 0,99, що свідчить про високу достовірність залежності врожайності сухої сировини лікарських рослин родини *Lamiaceae* від кількості рослин на одиницю площі (рис. 1–4).

Висновки. Встановлено залежності продуктивності лікарських рослин родини

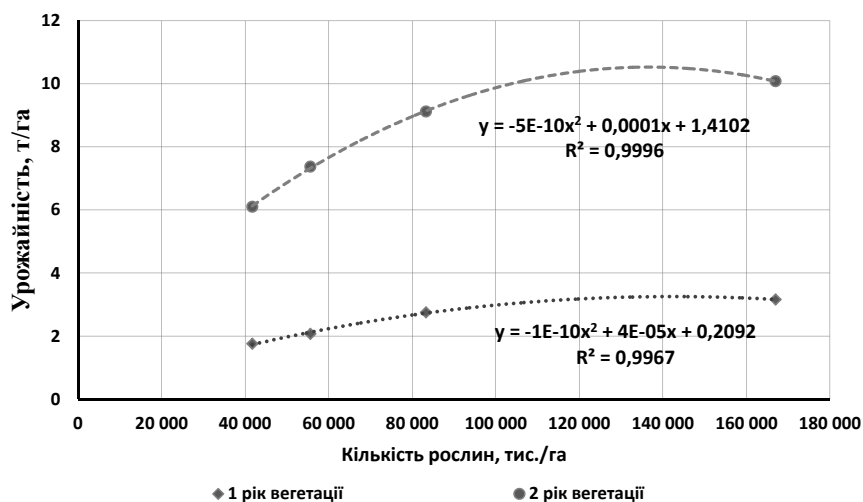


Рис. 1. Залежність урожайності трави материнки звичайної (*Origanum vulgare* L.) від густоти садіння рослин

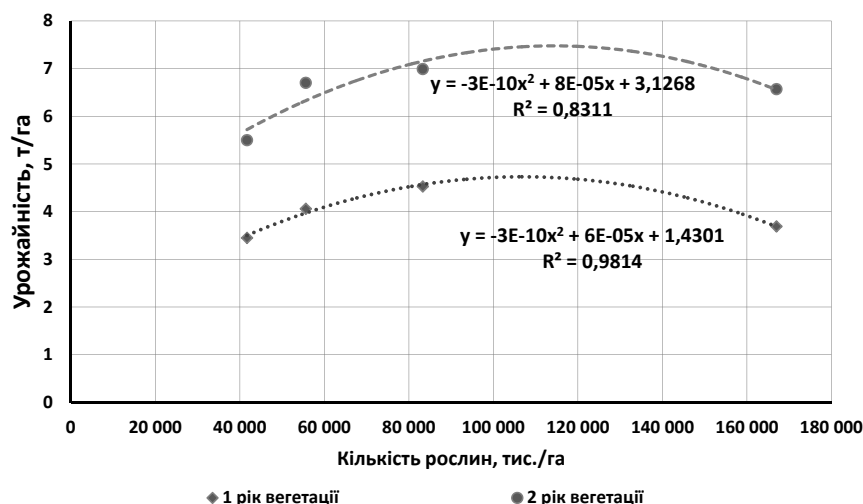


Рис. 2. Залежність урожайності трави меліси лікарської (*Melissa officinalis* L.) від густоти садіння рослин

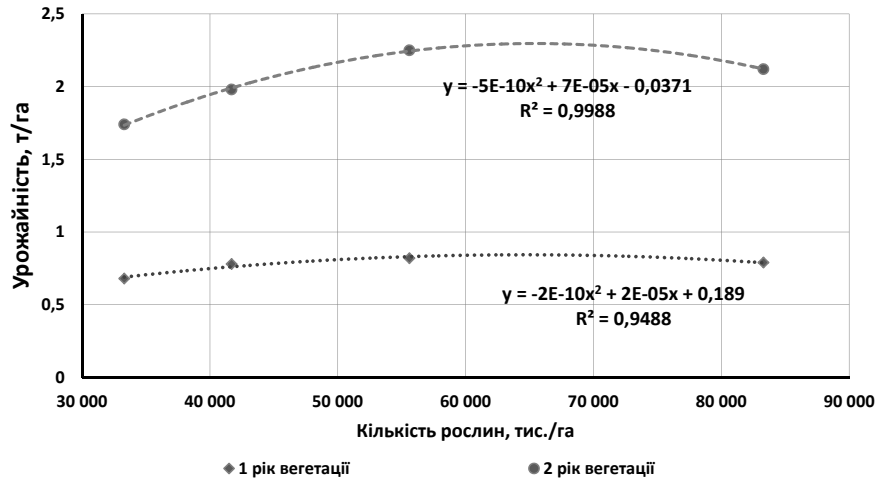


Рис. 3. Залежність урожайності трави м'яти перцевої (*Mentha piperita* L.) від густоти садіння рослин

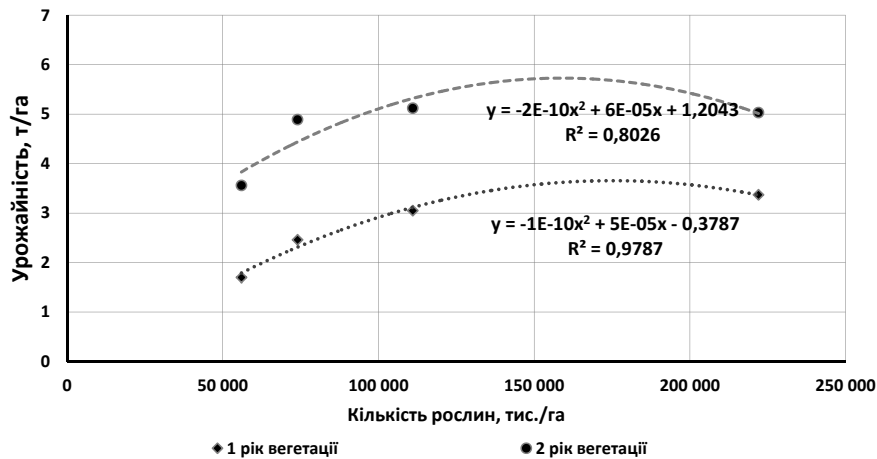


Рис. 4. Залежність урожайності трави чебрецю звичайного (*Thymus vulgaris* L.) від густоти садіння рослин

Lamiaceae від густоти садіння рослин на одиницю площі – зі збільшенням густоти врожайність сухої сировини збільшується.

Найвищу врожайність сухої трави материнки звичайної як на перший, так і на другий рік вирощування було отримано у варіанті з густотою садіння 166,7 тис. росл./га. Найбільш продуктивні посіви меліси лікарської першого та другого років вирощування, були за густоти 83,3 тис. росл./га. Найвищу врожайність чебрецю звичайного на перший рік отримали у варіанті 222,0 тис. росл./га, а на другий рік – у варіанті з густотою 111,0 тис. росл./га. М'ята

перцева найвищу продуктивність формувала за густоти 55,6 тис. росл./га як на першому, так і на другому році вегетації.

Отже, на базі отриманих результатів встановлено, що, незважаючи на генетичну спорідненість, представники родини *Lamiaceae* (материнка звичайна, меліса лікарська, м'ята перцева та чебрець звичайний) мають різну реакцію на густоту висаджування рослин за краплинного зрошення. Цей важливий аспект слід обов'язково враховувати за вирощування цих лікарських культур у зрошуваних умовах Лівобережного Лісостепу України.

Бібліографія

1. Шелудько Л. П., Куценко Н. І. Лікарські рослини (селекція та насінництво). Полтава : ТОВ «Копі-центр». 2013. 475 с.
2. Лікарські рослини: технології вирощування та використання. Біленко В. Г. та ін. Житомир : Рута, 2015. 600 с.

3. Полуденный Л. В., Сотник В. Ф., Хлапцев Е. Е. Эфиромасличные и лекарственные растения. Москва : Колос. 1979. 285 с.
4. Мустяцэ Г. И. Культура мяты перечной. Кишинев : Штиинца. 1985. С. 87–98.
5. Шелудько Л. П. М'ята перцева. Полтава : ВАТ «Видавництво «Полтава». 2004. 200 с.
6. Nedko K. Nedkov & Georgi V. Georgiev. A Study of Different Irrigation Practices Used for *Mentha piperita* in Bulgaria. *The Journal of Essential Oil Research*. 3. 1991. P. 435–440.
7. Soha El-Sayed Khalil and Abdel-Salam Ali El-Noemani. Effect of bio-fertilizers on growth, yield, water relations, photosynthetic pigments and carbohydrates contents of *Origanum vulgare* L. plants grown under water stress conditions. *American-Eurasian journal of sustainable agriculture*. 2015. № 9(4). P. 60–73.
8. Котюк Л. А., Рахметов Д. Б. Біологічно активні речовини *Origanum vulgare* L. *Физиология растений и генетика*. 2016. Т. 48. № 1. С. 20–25.
9. Gerami Farzad, Moghaddam Parviz R, Ghorbani Reza, HassanI Abbas. Effects of irrigation intervals and organic manure on morphological traits, essential oil content and yield of oregano (*Origanum vulgare* L.). *An. Acad. Bras. Ciênc.* Vol. 88. № 4. 2016. Pp. 2375–2385.
10. Said-Al Ahl, Hussein M.S. Effect of water stress and potassium humate on the productivity of oregano plant using saline and fresh water irrigation. *Journal of Applied Sciences*. 2010. № 3(1). P. 125–141.
11. Nurzyńska-Wierdak R. Herb yield and chemical composition of common oregano (*Origanum vulgare* L.) essential oil according to the plant's developmental stage. *Herba Polonica*. Vol. 55. № 3. 2009. P. 55–62.
12. Azizi A., Yan F., Honermeier B. Herbage yield, essential oil content and composition of three oregano (*Origanum vulgare* L.) populations as affected by soil moisture regimes and nitrogen supply. *Industrial Crops and Products*. V. 29, Issues 2–3. 2009. P. 554–561.
13. Коротких И. Н., Хазиева Ф. М. Особенности вегетативного размножения *Origanum Vulgare* L. способом деления корневища. *Таврический вестник аграрной науки*. Симферополь, 2016. № 3(7). С. 16–29.
14. Мягих Е. Ф., Мишнёв А. В. Зависимость продуктивности душицы от способа получения посадочного материала. *Научные ведомости БелГУ*. Серия «Естественные науки». 2013. № 24 (167). Вып. 25. С. 66–71.
15. Ушкаренко В. А. и др. Эфиромасличные и лекарственные растения : учебное пособие. Херсон : Айлант, 2004. 232 с.
16. Shalaby, A. S., Khattab, M. D., El-Gamassy, A. and El-Gamassy, K. Cultivation of *Melissa officinalis* in Egypt. Effects of fertilization, spacing and planting season. *Acta Hortic.* 1993. P. 115–120.
17. Saglam C., Atakisi I., Turhan H., Kaba S., Arslanoglu F. & Onemli F. Effect of propagation method, plant density, and age on lemon balm (*Melissa officinalis*) herb and oil yield., *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 32:4, 2004. P. 419–423.
18. Osman Sari A., Ceylan A. Yield Characteristics and Essential Oil Composition of Lemon Balm (*Melissa officinalis* L.) Grown in the Aegean Region of Turkey. *Turkish Journal OF Agriculture and Forestry*, 26, 2002. P. 217–224.
19. Hosseinzadeh S., Jafari Kukhdan A., Hosseini A., Armand R. The Application of Medicinal Plants in Traditional and Modern Medicine: A Review of *Thymus vulgaris*. *International Journal of Clinical Medicine*. 2015. № 06(09). P. 635–642.
20. Ezz AL-Dein Muhammed Al-Ramamneh. Plant growth strategies of *Thymus vulgaris* L. in response to population density. *Industrial Crops and Products*, 2009. V. 30. № 3. P. 389–394.
21. Чабан В. О. Розробка агротехнічних прийомів вирощування тим'яна звичайного при зрошенні в умовах півдня України. *Таврійський науковий вісник* : зб. наук. пр. Херсон : Айлант, 1999. Вип. 11. Ч. 1. С. 85–87.
22. Чабан В. О. Біологічні особливості накопичення ефірної олії в тим'яні звичайному при різних прийомах вирощування в умовах зрошення Півдня України. *Таврійський науковий вісник* : зб. наук. пр. Херсон : Айлант, 1998. Вип. 5. Ч. 2. С. 25–26.
23. Моніторинг ресурсів видів роду *Thymus* L. в Україні. Тимченко І. А. та ін. *Український ботанічний журнал*. 2007. 64. № 1. С. 78–87.
24. Lawrence B. M., Tucker A. O. The genus *Thymus* as a source of commercial products. *Thyme, the genus Thymus*. Taylor & Francis. London, 2002. P. 252–262.

25. Zarzuelo A., Crespo E. The medicinal and non medicinal uses of thyme. In thyme. The genus *Thymus*. In: Stahl-Biskup, E. and Saez, F., Eds. Medicinal and Aromatic Plants Industrial Profiles. New York : Taylor and Francis, 2002. P. 263–292.
26. Бондарєва Л. М. Вивчення комплексу макроскопічних та мікроскопічних діагностичних ознак чебрецю звичайного (*Thymus vulgaris* L.) в складі лікарської рослинної сировини «Thymi herba». *Вісник Сумського національного аграрного університету: науковий журнал. Серія «Агрономія і біологія»*. Суми : СНАУ, 2017. Вип. 2 (33). С. 17–22.
27. Nickavar B., Mojab F., Dolat-Abadi R. Analysis of the essential oils of two *Thymus* species from Iran. *Food Chemistry*. 2005. № 90. P. 609–611.
28. Baranauskiene R., Venskutonis P. R., Viskelis P., Dambrauskiene E. Influence of Nitrogen Fertilizers on the Yield and Composition of Thyme (*Thymus vulgaris*). *Journal of agricultural and food chemistry*. 2004. № 51(26). P. 7751–7759.
29. Khazaie H. R., Nadjafi F., Bannayan M. Effect of irrigation frequency and planting density on herbage biomass and oil production of thyme (*Thymus vulgaris*) and hyssop (*Hyssopus officinalis*). *Industrial Crops and Products*, 2008. V. 27. № 3. P. 315–321.
30. Брикин А. И. Проведение полевых опытов с лекарственными культурами. Москва : ЦБНТИМП, 1981. 60 с.
31. Методичні рекомендації з проведення досліджень за краплинного зрошення / за ред. М. І. Ромащенко. Київ : ТОВ «ДІА». 2014. 46 с.
32. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). Москва : Агропромиздат, 1985. 351 с.
33. Порада О. А. Методика формування і ведення колекцій лікарських рослин. Полтава : ПДАА. 2007. 50 с.

References

- Shelud'ko, L. P., & Kutsenko, N. I. (2013). *Likarski roslyny (seleksiia ta nasinnystvo)* [Medicinal plants (selection and seed production)]. Poltava : LLC «Copy-center». [in Ukrainian]
- Bilenko, V. G., Yakubenko, B. E., Likar, Ya. O., & Lushpa, V. I. (2015). *Likarski roslyny: tekhnolohii vyroshchuvannia ta vykorystannia*. [Medicinal plants: technologies of cultivation and use]. Zhytomyr : Ruta. [in Ukrainian]
- Poludennyi, L. V., Sotnyk, V. F., & Khlapsev, E. E. (1979). *Efiromaslichnye i lekarstvennye rastenyia* [Essential oil and medicinal plants]. Moscow : Kolos. [in Russian]
- Mustiatse, G. I. (1985). *Kultura miaty perechnoi* [Peppermint culture]. Chisinau : Shtiintsa. [in Moldova]
- Shelud'ko, L. P. (2004). *Miata pertseva* [Peppermint]. Poltava : LLC «Publishing house «Poltava»». [in Ukrainian]
- Nedkov, N. K., & Georgiev, G. V. (1991). A Study of Different Irrigation Practices Used for *Mentha piperita* in Bulgaria. *The Journal of Essential Oil Research*, 3, 435–440.
- Khalil, Soha El-Sayed, & El-Noemani, Abdel-Salam Ali (2015). Effect of bio-fertilizers on growth, yield, water relations, photosynthetic pigments and carbohydrates contents of *Origanum vulgare* L. plants grown under water stress conditions. *American-Eurasian journal of sustainable agriculture*, 9(4), 60–73.
- Kotiuk, L. A., & Rahmetov, D. B. (2016). *Bioloichno aktyvni rehovyny Origanum vulgare L.* [Biologically active substances]. *Fiziolohiia rastenii i hetetika*, 48(1), 20–25.
- Farzad, G., Parviz, M., Reza, G., & Abbas, H. (2016). Effects of irrigation intervals and organic manure on morphological traits, essential oil content and yield of oregano (*Origanum vulgare* L.). *An. Acad. Bras. Ciênc*, 88(4), 2375–2385.
- Ahl, Said-Al, & Hussein, M. S. (2010). Effect of water stress and potassium humate on the productivity of oregano plant using saline and fresh water irrigation. *Journal of Applied Sciences*, 3(1), 125–141.
- Nurzyńska-Wierdak, R. (2009). Herb yield and chemical composition of common oregano (*Origanum vulgare* L.) essential oil according to the plant's developmental stage. *Herba Polonica*, 55(3), 55–62.
- Azizi, A., Yan, F., & Honermeier, B. (2009). Herbage yield, essential oil content and composition of three oregano (*Origanum vulgare* L.) populations as affected by soil moisture regimes and nitrogen supply. *Industrial Crops and Products*, 29(2–3), 554–561.

13. Korotkikh, I. N., & Haziieva, F. M. (2016). Osobiennosti vehetativnoho rozmnozhennia *Origanum Vulgare* L. sposobom dielennia kornievishcha [Features of vegetative propagation of *Origanum Vulgare* L. by dividing the rhizome]. Tavrychieskii vestnik ahrarnoi nauki. Symferopol', 3(7), 16–29. [in Ukrainian]
14. Miahkykh, E. F., & Mishnov, A. V. (2013). Zavisimost produktivnosti dushtytsy ot sposoba poluchennia posadochnoho materiala [Dependence of the productivity of oregano on the method of obtaining planting material]. Nauchnyie vedomosti BelSU, 24 (167), 66–71.
15. Ushkarenko, V. A., Fedorchuk, M. I., Rabotiagov, V. D., & Fedorchuk, V. G. (2004). Efiromaslichnyie i lekarstvennyie rasteniia [Essential oil and medicinal plants]. Kherson : Ailant. [in Ukrainian]
16. Shalaby, A. S., Khattab, M. D., El-Gamassy, A., & El-Gamassy, K. (1993). Cultivation of *Melissa officinalis* in Egypt. Effects of fertilization, spacing and planting season. Acta Horti, 1, 115–120.
17. Saglam, C., Atakisi, I., Turhan, H., Kaba, S., Arslanoglu, F., & Onemli, F. (2004). Effect of propagation method, plant density, and age on lemon balm (*Melissa officinalis* L.) herb and oil yield. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 32(4), 419–423.
18. Osman Sari, A., & Ceylan, A. (2002). Yield Characteristics and Essential Oil Composition of Lemon Balm (*Melissa officinalis* L.) Grown in the Aegean Region of Turkey. Turkish Journal OF Agriculture and Forestry, 26, 217–224.
19. Hosseinzadeh, S., Jafari Kukhdan, A., Hosseini, A., & Armand, R. (2015). The Application of Medicinal Plants in Traditional and Modern Medicine: A Review of *Thymus vulgaris*. International Journal of Clinical Medicine, 6(9), 635–642.
20. Ezz AL-Dein Muhammed Al-Ramamneh. (2009). Plant growth strategies of *Thymus vulgaris* L. in response to population density. Industrial Crops and Products, 30(3), 389–394.
21. Chaban, V. O. (1999). Rozrobka ahrotekhnichnykh pryiomiv vyroshchuvannia tymiana zvychainoho pry zroshenni v umovakh pivdnia Ukrainy [Development of agrotechnical methods of growing thyme under irrigation in the south of Ukraine]. Tavriys'kyy naukovyy visnyk. 11(1), 85–87. [in Ukrainian]
22. Chaban, V. O. (1998). Biolohichni osoblyvosti nakopychennia efirnoi olii v tymiani zvychainomu pry riznykh pryiomakh vyroshchuvannia v umovakh zroshennia Pivdnia Ukrainy [Biological features of accumulation of essential oil in the common crown at different methods of cultivation in the conditions of irrigation of the South of Ukraine]. Tavriys'kyy naukovyy visnyk, 5(2), 25–26. [in Ukrainian]
23. Tymchenko, I. A., Hlushchenko, L. A., Minarchenko, V. M., & Anishchenko, T. M. (2007). Monitorynh resursiv vydiv rodu *Thymus* L. v Ukraini [Monitoring of genus resources *Thymus* L. in Ukraine]. Ukrainskyi botanichnyi zhurnal, 64(1), 78–87. [in Ukrainian]
24. Lawrence, B. M., & Tucker, A. O. (2002). The genus *Thymus* as a source of commercial products. Thyme, the genus *Thymus*. Taylor & Francis. London, 252–262.
25. Zarzuelo, A., & Crespo, E. (2002). The medicinal and non medicinal uses of thyme. In thyme. The genus *Thymus*. In: Stahl-Biskup, E. and Saez, F., Eds. Medicinal and Aromatic Plants Industrial Profiles. New York : Taylor and Francis, 263–292.
26. Bondareva, L. M. (2017). Vyvchennia kompleksu makroskopichnykh ta mikroskopichnykh diahnostychnykh oznak chebretsiu zvychainoho (*Thymus vulgaris* L.) v skladi likarskoi roslynnoi syrovyny «Thymi herba» [Study of the complex of macroscopic and microscopic diagnostic features of thyme (*Thymus vulgaris* L.) in the composition of medicinal plant raw materials]. Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu, 2(33), 17–22.
27. Nickavar, B., Mojab, F., & Dolat-Abadi, R. (2005). Analysis of the essential oils of two *Thymus* species from Iran. Food Chemistry, 90, 609–611.
28. Baranauskienė, R., Venskutonis, P. R., Viskelis P., & Dambrauskienė E. (2004). Influence of Nitrogen Fertilizers on the Yield and Composition of Thyme (*Thymus vulgaris*). Journal of agricultural and food chemistry. 51(26), 7751–7759.
29. Khazaie, H. R., Nadjafi, F., & Bannayan, M. (2008). Effect of irrigation frequency and planting density on herbage biomass and oil production of thyme (*Thymus vulgaris* L.) and hyssop (*Hyssopus officinalis* L.). Industrial Crops and Products, 27(3), 315–321.
30. Brikin, A. I. (1981). Proviedieniie polievkykh opytov s lekarstviennymi kulturami [Conducting field experiments with medicinal crops]. Moscow : TSBNTIMP. [in Russian]

31. Romashchenko, M. I., Shatkovskiy, A. P., & Usata, L. G. (2014). Metodichni rekomendatsii z provedennia pol'ovykh doslidzhen za kraplynnoho zroshennia. [Methodical recommendations for field studies on drip irrigation]. Kyiv : DIA. [in Ukrainian]
32. Dospekhov, B. A. (1985). Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledavaniy) [The methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results)]. Moskow : Agropromizdat. [in Russian]
33. Porada, O. A. (2007). Metodyka formuvannia i vedennia koleksii likarskykh roslyn [Methods of forming and maintaining collections of medicinal plants]. Poltava : PSAA. [in Ukrainian]

А.П. Шатковский, Н.В. Приведенюк, Л.А. Глущенко

Эффективность агротехнологических приемов выращивания лекарственных культур на орошении

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований по оптимизации густоты посадки лекарственных растений семейства *Lamiaceae* Juss. (Губоцветные) как фактора формирования их продуктивности в условиях капельного орошения. Научно-исследовательская работа проведена с наиболее распространенными лекарственными культурами этого семейства: душицей обыкновенной (*Origanum vulgare* L.), мелиссой лекарственной (*Melissa officinalis* L.), мятой перечной (*Mentha piperita* L.) и тимьяном обыкновенным (*Thymus vulgaris* L.) в условиях Левобережной Лесостепи Украины на протяжении 2016–2020 гг. на землях Опытной станции лекарственных растений Института агроэкологии и природопользования НААН (Лубенский район Полтавской области) при участии Института водных проблем и мелиорации НААН (ИВПиМ). В однофакторном полевом опыте изучено 8 элементарных вариантов густоты посадки растений: от 33 тыс./га до 222,0 тыс./га. В ходе проведения исследований доказано, что, несмотря на генетическое родство, представители семейства *Lamiaceae* Juss. имеют разную реакцию на густоту высадки растений в условиях капельного орошения. Так, наивысшая урожайность сухой травы душицы обыкновенной как на первый, так и на второй год выращивания была получена в варианте с густотой посадки 166,7 тыс. раст./га. Наиболее продуктивные посевы мелиссы лекарственной первого и второго годов выращивания были при плотности 83,3 тыс. раст./га. Наивысшую урожайность тимьяна обыкновенного на первый год получили в варианте 222,0 тыс. раст./га, а на второй год – на варианте с густотой 111,0 тыс. раст./га. Мята перечная наивысшую продуктивность формировала при плотности 55,6 тыс. раст./га как на первом, так и на втором году вегетации. Новым научным результатом являются полученные зависимости урожайности лекарственных растений семейства *Lamiaceae* Juss. от количества растений на единицу площади, описанные соответствующими математическими уравнениями.

Ключевые слова: лекарственные культуры, густота растений, капельное орошение, урожайность, математические зависимости.

A.P. Shatkovskiy, N.V. Pryvedeniuk, L.A. Hlushchenko

The effectiveness of agro-technological methods of medicinal crops growing on irrigation

Abstract. The article presents the results of experimental studies on optimizing the planting density of medicinal plants of the *Lamiaceae* Juss family. (Gubotsviti) as a factor in the formation of their productivity in conditions of drip irrigation. Research work has been carried out with the most common medicinal crops of this family: oregano (*Origanum vulgare* L.), lemon balm (*Melissa officinalis* L.), peppermint (*Mentha piperita* L.) and thyme (*Thymus vulgaris* L.) in the conditions of the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine during 2016–2020 on the lands of the Experimental Station of Medicinal Plants of the Institute of Agroecology and Nature Management of NAAS (Lubny district of Poltava region) with the participation of the Institute of Water Problems and Land Reclamation of NAAS. In a one-factor field experiment, 8 elementary variants of planting density were studied: from 33 thousand / ha to 222,0 thousand /ha. Studies have shown that, despite genetic relatedness, members of the family *Lamiaceae* Juss. have a demonstrably different response to the density of planting under drip irrigation. Thus, the highest yield of dried oregano grass for both the first and second year of cultivation was obtained in the variant with a planting density of 166,7 thousand plants / ha. The most productive crops of lemon balm in the first and second years of cultivation were at a density of 83,3 thousand plants / ha. The highest yield of thyme for the first year was obtained in the variant of 222,0 thousand plants / ha, and for the second year – in the variant with a density of 111,0 thousand plants / ha. Peppermint formed the highest productivity at densities of 55,6 thousand plants /ha in both the first and second year of the growing season. A new scientific result is the obtained dependences of the yield of medicinal plants of the family *Lamiaceae* Juss. from the number of plants per unit area, which are described by the corresponding mathematical equations.

Key words: medicinal crops, plant density, drip irrigation, yield, mathematical dependences.

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-291>Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/291>

УДК 631.811.982

ЕЛЕКТРОХІМІЧНО АКТИВОВАНА ВОДА (ЕХАВ): ІСТОРІЯ ВІДКРИТТЯ, СПЕЦИФІКА ПРОЦЕСУ, СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ ПРИ ЗРОШЕННІ

М.І. Ромащенко¹, докт. техн. наук, Б.І. Конаков², канд. техн. наук, В.В. Поліщук³, канд. с.-г. наук, С.В. Усатий⁴, канд. техн. наук

¹ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-9997-1346>; e-mail: mi.romashchenko@gmail.com;

² Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0003-3065-4745>; e-mail: crony@meta.ua;

³ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0001-7786-1843>; e-mail: vitaliyopolishchuk@ukr.net;

⁴ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0001-8784-4078>; e-mail: s_usatyi@ukr.net

Анотація. Проаналізовано історію відкриття, специфіку процесу і сучасного стану використання електрохімічно активованої води (ЕХАВ) у різних галузях господарювання та визначені можливості її застосування при зрошенні. Встановлено, що найбільш перспективним напрямком застосування ЕХАВ в зрошуваному землеробстві є системи краплинного зрошення. Додавання аноліту у воду за краплинного зрошення дозволяє суттєво зменшити (або взагалі виключити) необхідність використання засобів захисту рослин, а додавання католіту – суттєво пришвидшує розвиток і збільшує врожайність сільськогосподарських культур на фоні підвищення якості продукції. Екологічними наслідками цього є зменшення антропогенного навантаження на зрошувані землі шляхом повної або часткової заміни хімічних засобів захисту рослин анолітом, який є екологічно безпечною рідиною; економічними – підвищення рентабельності і скорочення строків окупності проектів зі зрошення земель. Визначено, що перспективність використання ЕХАВ у системах краплинного зрошення обумовлена тим, що технологія водоподачі в них дозволяє подавати католіт і аноліт на поле з мінімальними втратами активаційного потенціалу. Сприятливим чинником використання ЕХАВ у системах краплинного зрошення є створення за модульним принципом, що сприяє можливості обладнання вузлів водопідготовки систем модулями ЕХАВ. Водночас проектування систем слід проводити з врахуванням не тільки необхідності забезпечення рівномірності розподілу крапельницями води по полю, а і зі збереженням активаційного потенціалу електрохімічно активованих компонентів зрошувальної води. На підставі викладеного можна вважати, що розробка засобів електрохімічної активації води для потреб зрошення, а також технологій застосування такої води при вирощуванні сільськогосподарських культур є актуальною та своєчасною. Розгортання фундаментальних і прикладних досліджень щодо цього сприятиме створенню вітчизняного обладнання для промислового виробництва ЕХАВ і дозволить адаптувати світові технології їх використання до умов і потреб українського виробника та споживача. Особливо ефективним може бути застосування електрохімічно активованої води на системах краплинного зрошення.

Ключові слова: електрохімічно активована вода (ЕХАВ), аноліт, католіт, окисно-відновний потенціал (ОВП), зрошення активованою водою, системи краплинного зрошення

Актуальність дослідження. Аналіз доступної світової науково-технічної інформації свідчить, що сьогодні одним із важливих напрямків підвищення ефективності виробничих технологій в медицині, хімічній і будівельній промисловості, сільському господарстві та ін., є застосування електрохімічно активованих рідин. Значна увага приділяється електрохімічно активованій воді – аноліту і католіту – як речовинам, які мають надзвичайно суттєвий вплив на розчини різного складу, біологічні системи і організми. Попередньо

можна припустити, що застосування електрохімічно активованої води при вирощуванні сільськогосподарських культур дозволить забезпечити підвищення врожайності та якості товарної продукції при зрошенні католітом, а також покращити їх стійкість до шкідників і хвороб за рахунок повної або часткової заміни анолітом засобів захисту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Зважаючи на гостру актуальність тематики, в останні десятиліття за кордоном і в Україні проведено значний комплекс

різнопланових досліджень у різних галузях господарювання. Системні дослідження за цією тематикою за кордоном виконано такими вченими як В.М. Бахір, [6], С.Я. Семененко [32], John P. Shanahan, Remigio Benavides Gonzalez [5] та іншими науковцями. В Україні цим питанням присвячувались роботи вчених НУ «Львівська політехніка» [21], Рівненського ДГУ [22], НТУ «Харківський політехнічний інститут» [23], Херсонського державного аграрно-економічного університету [24] та інших ВУЗів і науково-дослідних організацій країни. Однак розробка засобів електрохімічної активації води для потреб зрошення, а також технологій застосування такої води при вирощуванні сільськогосподарських культур є недостатньо вивченою.

Мета дослідження – всебічний аналіз сучасного стану застосування електрохімічно активованої води (ЕХАВ) в різних галузях та визначення перспективи її застосування при зрошенні.

Матеріали і методи дослідження. Застосовано теоретичні методи наукового дослідження: аналіз і синтез, індукція, дедукція та порівняння.

Результати дослідження та їх обговорення. Стрімкий розвиток науки і техніки наприкінці ХІХ століття, поряд з багатьма іншими винаходами і відкриттями, призвів до створення в 1799 р. італійським фізиком і фізіологом Алессандро Джузеппе Вольта батарей гальванічних елементів, які виробляли постійний електричний струм. А приблизно через рік, в 1800 р., використовуючи такі батареї, англійські дослідники Нікольсон і Карлейль відкрили явище *електролізу* у вигляді розкладання води на водень і кисень під час проходження через неї постійного електричного струму. В 1833 р. на підставі аналізу розробок попередників і власних ґрунтовних досліджень англійський хімік і фізик Майкл Фарадей сформулював 2 основних закони електролізу (розкладу речовин постійним електричним струмом), які сьогодні відомі як закони Фарадея. Подальші дослідження і розробки в галузі електролізу багатьох вчених і інженерів різних країн світу призвели до створення технологій отримання за допомогою електролізу таких речовин як хлор, кисень, водень та інших, добування з природних руд і речовин легких, кольорових і благородних металів, синтезу складних речовин, гальванічного покриття поверхонь тощо.

Водночас слід зазначити, що практично усі розчини електролітів в традиційних

електролітичних процесах мають високу концентрацію і високу електропровідність, що суттєво відрізняє їх від прісної або слабо мінералізованої води. Через те, що прісна вода або слабомінералізовані розчини різних речовин не знаходили практичного застосування в прикладній електрохімії в якості розчинів електролітів, то «за більш ніж вікову історію її розвитку сформувалося уявлення про те, що електроліз прісної води неможливий у зв'язку з малою кількістю іонів, що містяться в ній» [1]. Таке уявлення ґрунтувалось на тому, що в промислових електролізерах напруга на електродах становить декілька вольт, а сила струму – декілька сотень ампер. Насправді електроліз прісної і навіть дистильованої води може протікати при низькій щільності струму за умови створення високої напруги між електродами.

Початком робіт у галузі електрохімічної активації води можна вважати 1972 р., коли В.М. Бахір, проводячи дослідження з регулювання властивостей бурових розчинів і води в технологічних процесах буріння нафтових і газових свердловин у Середньоазіатському НДІ газу в Ташкенті, звернув увагу на те, що процес електролізу слабомінералізованої води за наявності діафрагми, яка відокремлює зону розташування аноду від зони розташування катоду, суттєво відрізняється від традиційних процесів, які протікають відповідно до класичних законів електролізу. Водночас властивості води, що зазнала електрохімічної обробки, визначаються як початковою кількістю та складом мінеральних солей, так і параметрами електрохімічного впливу. В.М. Бахір запропонував називати це явище «електрохімічною активацією води» [2].

За існуючими в Україні і ЄС нормативами мінералізація питної води може становити до 1 г/л. Дистильована вода може містити до 5 мг/л розчинених солей. Переважними компонентами в питній воді є іони Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , а також SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , NO_3^- , гази O_2 , H_2 , N_2 та інші речовини. При протіканні постійного електричного струму через воду в ємності, яка має відокремлені напівпроникною перегородкою зони аноду і катоду, відбувається надходження електронів у воду навколо катоду і видалення електронів із води навколо аноду, що супроводжується реакціями на їхній поверхні, у результаті яких утворюються нові речовини (рис. 1) [3].

На відміну від класичного електролізу, при електрохімічній активації прісних або слабомінералізованих вод утворюються католіти і аноліти, властивості яких є нестабільними

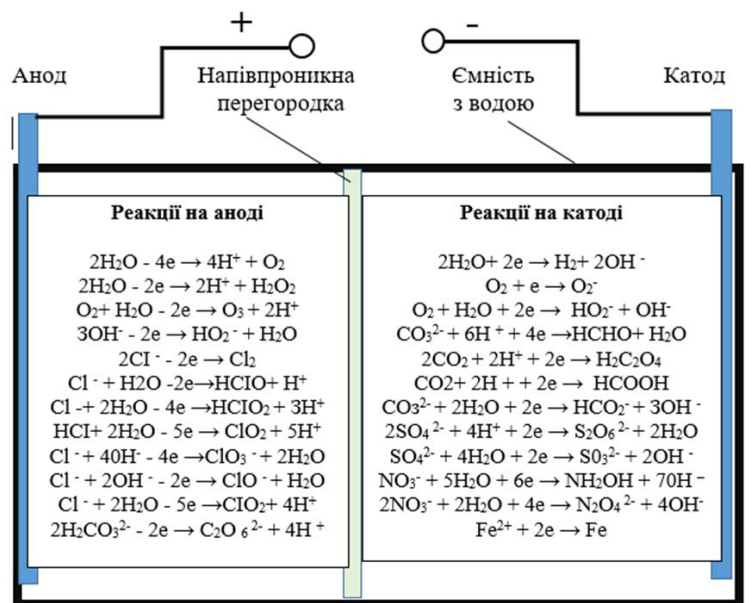


Рис. 1. Принципова схема електрохімічного активатора води і деякі хімічні реакції, притаманні процесу такої активації

в часі і мають термін релаксації – деякий час, за який їх характеристики змінюються і починають відповідати загальновідомим законам електролізу.

Цей час релаксації може становити від десятків хвилин до десятків і навіть сотень годин. Наявність часу релаксації дала підставу назвати аноліт і католіт під час їх релаксації *активованими* або, інакше кажучи, електрохімічними розчинами, і сформулювати основні принципи технології електрохімічної активації [2, 3, 4]. В.М. Бахір також сформулював технологічне призначення електрохімічної активації води як для її очищення від небажаних компонентів, так і в різних технологічних процесах із метою управління фізико-хімічними реакціями для підвищення ефективності виробництва.

Загальноживим став також запропонований ним у 1975 р. термін «*електрохімічна активація води – ЕХАВ*», який означає релаксаційні зміни параметрів розбавлених розчинів в результаті попередньої уніполярної електрохімічної обробки, а дослідження і розробки в цьому напрямку набули надзвичайного розвитку. Протягом наступного десятиліття багатьма вченими (перш за все колективом дослідників під керівництвом В.М. Бахіра) було виконано значний обсяг робіт з обґрунтування параметрів і створення різноманітних промислових засобів ЕХАВ і водних розчинів. Це привернуло увагу дослідників із різних галузей і сприяло поширенню вивчення феномену ЕХАВ не тільки в колишньому СРСР,

але й за кордоном, включаючи такі розвинуті країни як США, Японія і Німеччина. Коло застосування і обсяг питань, пов'язаних з ЕХАВ, настільки широкі, що дослідження в цьому напрямку продовжуються й сьогодні, що підтверджується патентом США 2021 р., який охоплює цілий комплекс технічних рішень, щодо цього [5].

Одним із феноменів ЕХАВ є те, що в катодній зоні вода, навіть дистильована, набуває лужну реакцію за рахунок перетворення деякої частини розчинених солей в гідроксиди (рис. 2) [3].

Водночас окисно-відновний потенціал (ОВП) католіту знижується, зменшується вільний об'єм води та електропровідність,

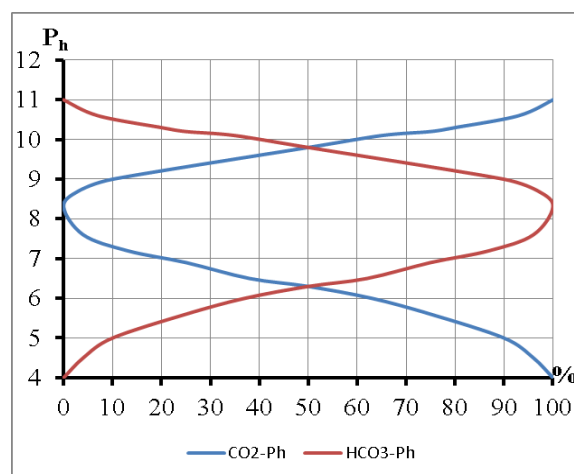


Рис. 2. Залежність рН води від вмісту солей карбонної кислоти

а концентрація водню і вільних гідроксильних груп – навпаки, зростають. Внаслідок підвищення рН іони металів переходять у важкорозчинні і нерозчинні гідроксиди.

В анодній зоні кислотність води підвищується, ОВП зростає завдяки утворенню стійких і нестабільних кислот (сірчаної, соляної, хлорнуватої, надсірчаної), а також пероксиду водню, пероксосульфатів, пероксикарбонатів, кисневмісних сполук хлору й інших речовин. Дещо збільшуються електропровідність, вміст розчинених хлору і кисню, зменшується концентрація водню і азоту (рис. 1).

Загальновідомо, що кількісною характеристикою кислотності або лужності води є водневий показник рН, який визначається активністю іонів водню (aH^+) або, інакше, співвідношенням концентрації іонів гідроксонію H_3O^+ і гідроксиду OH^- . У нейтральної води $pH = 7$, що відповідає рівності концентрацій цих іонів. При додаванні у воду кислоти рН стає менше 7, при додаванні лугу – більше 7. Іншим важливим показником властивостей води і її розчинів є ОВП – окисно-відновний потенціал (або редокс-потенціал), який вимірюється в мВ і характеризує здатність рідини приєднувати чи віддавати іони. Якщо ОВП речовини позитивний, вона – окиснювач, якщо негативний – відновник.

Переважна частина біологічних рідин тварин і людини має від'ємний ОВП (від -100 до -200 мВ), так само, як і соки живих рослин. Природна та бутильована вода має позитивний ОВП в межах від $+70$ до $+700$ мВ. Незважаючи на те, що ОВП сьогодні не нормується існуючими стандартами, за результатами досліджень вчених різних країн світу він суттєво впливає на властивості водних розчинів

щодо їх дії на біологічні організми і процеси, в яких ці водні розчини використовуються. Вода з від'ємним ОВП має антиоксидантні властивості, з позитивним – знезаражуючі. Відповідно в широкій пресі католіт часто називають «живою» водою, аноліт – «мертвою».

Величину ОВП водних розчинів можна змінювати насичуючи їх кислотами або лугами. Так, наприклад, збільшуючи вміст соляної кислоти (HCL) від 0 до 0,36 г/л, ОВП змінимо від $+350$ мВ до $+650$ мВ. Водночас рН зменшиться з 7 до 2. Насичення води гідроксидом натрію (NaOH) від 0 до 0,4 г/л навпаки зменшить ОВП з $+350$ мВ до $+60$ мВ, а рН при цьому зросте з 7 до 12. Зв'язок між ОВП і рН при внесенні гідроксиду натрію або соляної кислоти полягає в тому, що при зміні рН води на 1 ОВП відповідно збільшується або зменшується на 59 мВ. Можна також підвищити ОВП шляхом насичення розчинів киснем (шляхом барботування) і знизити, пропускаючи через нього водень [3].

Сфера значень рН і ОВП при хімічній зміні рН питної води відповідає теоретичним уявленням. При електрохімічній активації води значення рН і ОВП католіту і аноліту питної води виходять далеко за межі сфери хімічного регулювання. Досит показовим є експеримент, проведений В.М. Бахіром на водопровідній воді, результати якого нами для наочності відображено у вигляді таблиці 1.

Водопровідна питна вода із загальною мінералізацією 0,17 г/л і вихідними значеннями $pH = 7,3$ і $ОВП = +270$ мВ в одному досліді піддавалася активації в електрохімічному реакторі РПЕ-6, в другому досліді – активувалась за допомогою кислоти HCL і лугу NaOH. Узагальнення результатів експерименту для кожного з досліджуваних об'єктів наведено

1. Порівняння динаміки змін у часі параметрів електрохімічно і хімічно активованої води

Початкові значення	Час після активації	ЕХАВ						Хімічна активація					
		аноліт			католіт			HCL			NaOH		
		рН	ОВП, мВ		рН	ОВП, мВ		рН	ОВП, мВ		рН	ОВП, мВ	
			Теор.	Експер.		Теор.	Експер.		Теор.	Експер.		Теор.	Експер.
рН= 7,3 ОВП=+270мВ	0 год	3,03	+545	+1040	11,8	+18	-830	3,02	+545	+595	11,8	+18	+25
	24 год	3,1		+1010	10,2		-650	3,01		+590	11,7		+20
	168 год	3,3		+590	9,5		0	3,02		+585	11,8		+20
Зміна параметрів		0,27		450	2,3		830	0		10	0		2

в рядку «Зміна параметрів». Як видно з наведених даних, для анолізу і католізу мають місце значні релаксаційні зміни рН і ОВП, тоді як для їх хімічних моделей такі зміни відсутні. Для хімічних моделей анолізу і католізу спостерігається практично повний збіг вимірних і теоретично розрахованих значень ОВП. З даних таблиці видно, що теоретично розрахований ОВП анолізу майже у 2 рази менший за експериментально встановлений, теоретично розрахований ОВП католізу більш, на понад 800 разів більший за експериментально встановлений. Аналіз можливостей зміни ОВП водних розчинів хімічними реагентами порівнянню з електрохімічною активацією свідчить про їх обмеженість і значно меншу ефективність порівнянню з ЕХАВ, а також неможливість досягнення результатів ЕХАВ суто хімічними методами [3].

Значний обсяг науково-технічних досліджень щодо електрохімічної активації, що були виконані за період з 70-х років минулого століття донині в Росії, вивели її на перші позиції серед країн світу. За твердженнями російських вчених (Бахір В.М. та ін.) в 1990 р. Росія випереджала США і Японію по розробках, що стосуються виробництва і застосування електрохімічно активованих розчинів на 40-50 років, в 2010 – на 10-15 років [6]. Технічні засоби електрохімічної активації Росія постачає багатьом країнам, включаючи високо розвинуті: США, Японію і Німеччину. Водночас стверджується, що використання цих технологій забезпечує багатомільярдні прибутки в розрізі країни. Сьогодні технології використання ЕХАВ застосовуються в різних сферах людської діяльності. Подальші дослід-

ження і популяризація властивостей електрохімічно активованих розчинів призвели до виникнення, перш за все в Росії, цілої галузі науки і техніки, пов'язаної з цією тематикою, включаючи спеціалізовані науково-дослідні заклади. Сьогодні в багатьох російських ВУЗах існують курси дисциплін, присвячених електрохімічним технологіям, мають розділи, присвячені ЕХА [7, 8, 9], для широкого кола студентів і школярів пропонується інфоурок «Технология электрохимической активации (ЭХА)» [8], виконуються дипломні роботи з підготовки і застосування таких рідин [9].

Було створено низку різновидів технічних конструкцій для отримання ЕХАВ, які почали використовувати у медицині і аграрному комплексі [6]. Наприкінці 70-х років минулого століття справжній бум із розробки і впровадження засобів виробництва ЕХАВ відбувся і за межами Росії. Так, тільки в Японії в 1979 р. було вироблено 600 тисяч апаратів активації води [10].

Сьогодні установки і апарати для електрохімічної активації води присутні і на вітчизняному ринку. Практично всі вони ввезені з закордону, включаючи Росію і Білорусь. Промислові установки – переважно для виробництва анолізу і його складових, побутові – для отримання анолізу і католізу. Основними складовими переважної більшості промислових установок (рис. 3) є «модулі Бахіра» або їх аналоги – електрохімічні модульні елементи, кожен з яких є окремою компактною установкою активації води і які складаються з коаксіально розташованих і виповнених у формі циліндрів із платинованого титану анодів, напівпроникних керамічних мембран і катодів із нержавіючої сталі (рис. 4) [6].



Рис. 3. Реактори МБ-26-37-00 і МБ-26-04 установок «Екохлор» з модулями Бахіра



Рис. 4. Прототип модуля Бахіра – проточний модульний електрохімічний елемент ПЕМ

Найбільш активно сьогодні використовуються різновиди аноліту. Це пов'язане, з одного боку, з його властивостями як потужного екологічно чистого антисептичного засобу, з іншого – із спроможністю довго зберігатись, не змінюючи своїх властивостей.

Найважливішими складовими сучасних анолітів, які широко застосовуються в різних галузях багатьох країн, наприклад російського нейтрального Аноліту (АНК), – є хлорнуватиста кислота, кисневі сполуки хлору та пероксидні сполуки, які безпечні для людей і тварин і після використання перетворюються на воду.

В медичних закладах Росії, Швейцарії, Бельгії, Туреччини, США, Кореї, Японії та інших країн цей та аналогічні препарати використовують для дезінфекції і стерилізації поверхонь, обладнання, посуду, білизни, у стоматологічній практиці, при лікуванні захворювань внутрішніх органів, при особливо небезпечних інфекціях тощо [11, 12, 13, 14]. По ефективності аноліти значно разів перевищують розчини гіпохлориту або хлорної води, які еквівалентні за вмістом активного хлору і одночасно мають значно меншу корозійну активність, а патогенна мікрофлора не здатна ставати до них резистентною [15]. В аграрному секторі аноліти можуть використовуватись у рослинництві, комплексах для зберігання сільгосппродукції, кормовиробництві і тваринницьких комплексах, м'ясо- і молокопереробних підприємствах тощо [16, 17, 18, 19].

На відміну від аноліту, час релаксації католіту набагато менший, ніж аноліту, що суттєво

ускладнює його застосування (рис. 5) [20] і залежить від умов зберігання компонентів електрохімічно активованої води: у відкритих ємностях він на 15–25% менший, ніж у герметично закритих. Але саме привабливість католіту як універсального антиоксидантного і оздоровлюючого засобу призвела до сплеску на терені минулого СРСР у 70-ті, 80-ті роки минулого століття уваги до ЕХАВ. З початку робіт з ЕХАВ дослідників цікавив вплив аноліту і католіту на біологічні об'єкти. Наявність цього впливу проявлялась вже на початку робіт, коли бурильники, які працювали з активованими розчинами, помічали, що такі розчини сприяють і пришвидшують загоєння ран і подразнень на руках. Відповідно це привернуло увагу розробників технологій ЕХАВ і науковців різних спеціальностей: медиків, ветеринарів, біологів, аграріїв тощо [2, 4, 6].

Подальший розвиток ЕХАВ при зрошенні. Українська наукова спільнота також проявляє значний інтерес до питань, пов'язаних з ЕХАВ. За останнє десятиріччя окремі міністерства і відомства (МОН України, МОЗ України та ін.) профінансували декілька науково-дослідних тем, у складі яких розроблялись технології виробництва і застосування ЕХАВ. Періодично на електронних ресурсах, а також у друкованому вигляді з'являються матеріали, присвячені цій тематиці. Науковцями і викладачами НУ «Львівська політехніка» [21], Рівненського ДГУ [22], НТУ «Харківський політехнічний інститут» [23], Херсонського державного

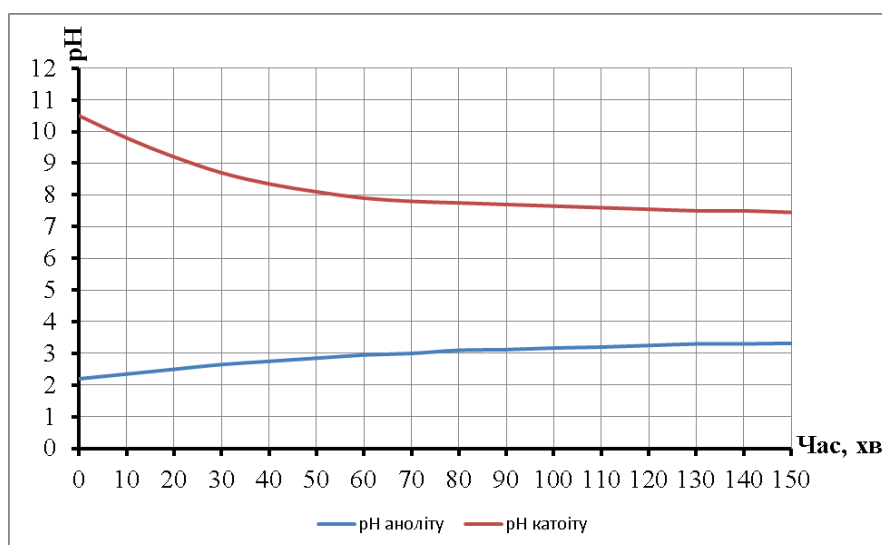


Рис. 5. Характер протікання релаксаційних процесів аноліту і католіту, які зберігались у відкритих ємностях після електрохімічної активації питної води з загальною мінералізацією 0,52 г/л

аграрно-економічного університету [24] та інших ВУЗів і науково-дослідних організацій країни проведено дослідження, підготовлено звіти і, навіть, декілька дисертацій, присвячених ЕХАВ [25]. Але обсяг цих досліджень, порівняно з прогнозованим значенням широкого впровадження технологій ЕХАВ у різні галузі промисловості, медицини і сільського господарства, поки що є недостатнім.

В сільському господарстві одним із перспективних напрямків використання ЕХАВ за кордоном розглядається зрошувальне землеробство. Дослідниками відзначається, що додавання аноліту в зрошувальну воду дозволяє суттєво зменшити (або взагалі виключити) необхідність використання засобів захисту рослин, а додавання католіту – суттєво пришвидшує розвиток і збільшує врожайність сільськогосподарських культур на фоні підвищення якості продукції [26, 27, 28, 29, 30, 31]. Відзначається, що ефект дії електрохімічно активованої води відслідковується як під час проростання насіння, так і протягом усього періоду вегетації рослин і, переважно, залежить від таких основних показників води як кислотність (або лужність) – рН та окислювально-відновлювальний потенціал (ОВП) [31].

Найбільш ґрунтовні дослідження щодо застосування ЕХАВ в зрошувальному землеробстві проведені і продовжують виконуватись у Росії. Перші спроби застосування активованої води при зрошенні дощуванням виявили деякі особливості поведінки католіту при проходженні через сопла дощувальних апаратів: термін релаксації ОВП водночас інтенсивно зменшується і вода, що потрапляє на поле, відновлює значення ОВП до активації. Зовсім інший характер релаксації ОВП католіту в системах краплинного зрошення – майже такий самий, як у закритих ємностях (декілька годин). Це дає можливість подати його з водою на поле з майже незмінними після електрохімічної активації характеристиками [32].

Дослідження застосування ЕХАВ на системах краплинного зрошення засвідчили високу ефективність таких технологій. Так, згідно з [33], після замочування і наступного зрошення католітом, польова схожість насіння цукрової кукурудзи зростає до 90–100%; кількість повноцінних стебел від одного насіння, в середньому, становить 3г; середня маса одного качана – 270–290 г; врожайність – на 68,7% більша, ніж на контролі. Вміст загального цукру у такому разі підвищується на 30,9%, моноцукру – на 40,1%, діцукрів – на

26,3%. Використання ЕХАВ для поливу при краплинному зрошенні дозволяє суттєво активізувати фотосинтетичну активність овочевих культур, насамперед, завдяки збільшенню фотосинтетичного потенціалу посіву. При краплинному зрошенні томатів [31] застосування ЕХАВ забезпечує можливість сукупного вирішення завдань ресурсозбереження, екологічної безпеки виробництва, підвищення якості плодів для формування врожайності на рівні 100 т/га. Використання ЕХАВ за краплинного зрошення томатів також дозволяє стримувати поширення хвороб та інгібує їх розвиток на вже заражених рослинах. Ці дослідження [31] свідчать, що застосування аноліту в рівній пропорції з природною зрошувальною водою може бути найкращою альтернативою хімічним методам стримування поширення фітофтори та септоріозів. Поширення хвороб у дослідках не перевищувало 0,3–1,5%, що співставно з показниками, які забезпечуються стандартними засобами хімічного захисту рослин [31]. Застосування ЕХАВ дозволяє також суттєво покращувати структуру врожаю, одночасно підвищуючи на 14,2–25,0% середнє число плодів на рослині і на 5,0–8,9% – масу середнього плоду [31]. Іншою перевагою використання електрохімічної активації зрошувальної води є підвищення коефіцієнта вирівнювання плодів у врожаї до 95,0–97,6%. Автори цих досліджень [31] стверджують, що застосування ЕХАВ за краплинного зрошення на тлі ощадного режиму використання засобів хімічного захисту рослин (без фунгіцидів) дозволяє формувати економічно вигідні та інвестиційно-привабливі проекти з внутрішньою нормою прибутковості 129% і терміном окупності біля 1 року. Застосування ЕХАВ при краплинному зрошенні кавунів сорту «Холодок» у Поволжі збільшило врожайність на 30% і дозволило отримати продукцію на 12 днів раніше [30]. Високу ефективність, як свідчать дослідження [34], має використання ЕХАВ при краплинному зрошенні томатів у теплицях: врожайність підвищується на 16%, крупність плодів – на 30%.

Використання ЕХАВ на системах краплинного зрошення потребує не тільки розробки технологій її застосування і промислових активаторів, але й прив'язки таких активаторів до параметрів систем краплинного зрошення з врахуванням особливостей ЕХАВ. Сьогодні однією з основних причин стримування широкого впровадження технологій застосування ЕХАВ за краплинного зрошення є відсутність адаптованих алгоритмів

і методів проектування систем краплин-ного зрошення з модулями електроактивації. Дослідженнями [35] встановлено, що при проектуванні таких систем з модулем ЕХАВ, поряд із вирішенням загальної задачі забезпечення рівномірності розподілу крапельни-цями води по полю, слід враховувати необхід-ність збереження активаційного потенціалу ЕХАВ. Очевидним є те, що необхідність збереження активаційного потенціалу ЕХАВ передбачає додаткові вимоги до окремих параметрів систем краплинного зрошення.

На підставі викладеного можливо вважати, що розробка засобів електрохімічної активації води для потреб зрошення, а також технологій застосування такої води при вирощуванні сільськогосподарських культур є актуальним та своєчасним. Розгортання фундаментальних і прикладних досліджень щодо цього сприя-тиме створенню вітчизняного обладнання для промислового виробництва ЕХАВ і дозволить адаптувати світові технології їх використання до умов і потреб українського виробника та споживача. Особливо ефективним може бути застосування електрохімічно активованої води на системах краплинного зрошення.

За результатами досліджень можна стверджувати, що використання ЕХАВ при зрошенні дозволить забезпечити:

- зменшення антропогенного наванта-ження на зрошувані землі шляхом повної або часткової заміни хімічних засобів захисту рослин анолітом, який є екологічно безпечною рідиною;
- підвищення врожайності та покращення якості продукції при додаванні като-літу в поливну воду;
- підвищення рентабельності і скорочення строків окупності проєктів зі зрошення земель.

Висновки. Проведений аналіз свід-чить, що:

- компоненти електрохімічно активованої води (ЕХАВ) широко застосовуються в різних галузях промисловості Росії, Білорусі, США, Японії, Німеччини, Китаю та інших країн, зокрема в аграрному секторі. В сільському господарстві аноліт і його компоненти вико-ристовуються як екологічно чисті антисеп-тичні, дезінфікуючі, фунгіцидозамісні засоби, католіт – як екологічно чистий стимулятор росту, антиоксидант і підживлювач. Одним із перспективних і високоефективних напрямків застосування ЕХАВ в зрошувальному земле-робстві є системи краплинного зрошення;

- застосування ЕХАВ при виробництві різноманітної продукції забезпечує значний економічний ефект, складовими якого є підвищення продуктивності і якості цієї продукції, збереження довкілля та оздоровлення насе-лення. Для забезпечення цього напрямку фахівцями за кордоном в багатьох ВУЗах введені відповідні курси дисциплін, або існуючі курси доповнені розділами, в яких викладені основи теорії і практики вироб-ництва і застосування ЕХАВ. Очевидною є доцільність впровадження таких курсів і в Україні для ознайомлення студентів ВУЗів та коледжів з основами технологій ЕХАВ;

- розгортання робіт з впровадження технологій ЕХАВ в аграрному і переробному секторі країни України потребує проведення досліджень із перевірки існуючих даних щодо ефективності використання складових такої води і адаптації існуючих світових технологій для їх застосування в умовах нашої країни. Необхідно також провести дослідно-кон-структорські роботи зі створення вітчизняних технічних засобів ЕХАВ, а також розробити і обґрунтувати технології їх використання.

Бібліографія

1. Томилов А. П. Электрохимическая активация – новое направление прикладной электрохимии. *Жизнь и безопасность*. 2002. № 3. С. 302–307.
2. Электрохимическая активация: история, состояние, перспективы / Бахир В. М. и др. Москва : ВНИИИМТ, 1999. 256 с.
3. Бахир В. М. Теоретические аспекты электрохимической активации. ОАО «НПО «ЭКРАН». Москва. URL: <https://ikar.udm.ru/sb/sb21-2-08.htm> (дата звернення: 18.07.2021).
4. Прилуцкий В. И., Бахир В. М. Электрохимически активированная вода: аномальные свойства, механизм биологического действия. Москва : ВНИИИМТ, 1997. 228 с.
5. Shanahan J. P., Gonzalez R. B. Electrochemical activation of water. – US11000883B2- 2021-05-11. URL: <https://patents.google.com/patent/US11000883B2/en>. (дата звернення: 05.09.2021).
6. Бахир В. М. Электрохимическая активация: изобретения, техника, технология. Москва : Вива-Стар, 2014. 511 с.
7. Рабочая программа «Электрохимические технологии защиты окружающей среды». Южнороссийский государственный университет им. М. И. Платова. Новочеркасск, 2016. URL:

<https://tf.npi-tu.ru/assets/tf/kht/files/Progr%20TEP%20novie/extexn-zashh-okr-sr.pdf>. (дата звернення: 15.08.2021).

8. Інфоурок «Технология электрохимической активации (ЭХА)». URL: <https://infourok.ru/tehnologiya-elektrohimiicheskoj-aktivacii-eha-4777946.html>. (дата звернення: 06.08.2021).

9. Выпускная квалификационная работа «Анализ и разработка системы автоматического управления процессом электрохимической активации воды». Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова. Воронеж, 2018. URL: <https://nauchkor.ru/uploads/documents/5ecbb20acd3d3e0001403e61.pdf>. (дата звернення: 05.09.2021).

10. Apparatus Producing Continuously Electrolyzed Water. USA Patent Number 5, 051, 161, 1991. Inventors: Shuji Yamagushi, Shiroji Misawa, Giichi Asanuma, all of Saitama, Japan.

11. Electrochemically activated water as an alternative to chlorine for decentralized disinfection/Ghebremichael K., etc. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. 2011. 60(4). P. 210–218. DOI: <https://doi.org/10.2166/aqua.2011.034>

12. ElAmin A. Electrolyzed water effective as chemical cleaner, study finds. 2017. URL: <https://www.foodnavigator.com/Article/2006/01/31/Electrolyzed-water-effective-as-chemical-cleaner-study-finds> (дата звернення: 18.11.2021).

13. Activated and Electrolyzed Water: A Brief Review of a New Generation of Cleaners and Sanitizing Agents. *Food Safety Magazine*. 2010. URL: <https://www.food-safety.com/articles/4263-activated-and-electrolyzed-water-a-brief-review-of-a-new-generation-of-cleaners-and-sanitizing-agents> (дата звернення: 12.11.2021).

14. Electrolyzed Water Generated On-Site as a Promising Disinfectant in the Dental Office During the COVID-19 Pandemic. *Front. Public Health*. 30 April 2021. URL: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.629142> (дата звернення: 08.10.2021).

15. Прилуцкий В.И., Долгополов В.И., Барабаш Т.Б. Анолиты на рынке дезсредств: не ошибитесь в выборе! *Медицинский алфавит*. 2013. Т. 3 «Эпидемиология и гигиена». URL: http://www.bakhir.ru/_img/pdf/3-eg-13-4-corr.pdf (дата звернення: 05.09.2021).

16. Способ предпосевной обработки семян хлопчатника. Авторское свидетельство СССР, № 663358. 1976.

17. Способ хранения цитрусовых плодов. Авторское свидетельство СССР, № 1341743. 1985.

18. Способ консервирования зеленой массы кукурузы. Авторское свидетельство СССР, № 1534772. 1987.

19. Способ обработки яиц сельскохозяйственной птицы. Авторское свидетельство СССР, № 1752401. 1986.

20. Вода «живая» и «мертвая». Новые факты об антиоксидантных и релаксационных характеристиках электроактивированной воды. *Universum: химия и биология : электрон. научн. журн.* / Аронбаев Д. М. и др. 2021. 2(80). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/11225> (дата звернення: 18.11.2021).

21. Електрохімічна активація водних розчинів як екологічний метод водопідготовки / Пташник В. та ін. Львів : “ECOLOGY & TOURISM 2013” (EcoTour-2013), 21–23 NOVEMBER. 2013. С. 12–13. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/27007/1/005-012-013.pdf> (дата звернення: 18.11.2021).

22. Використання електрохімічно активованих (ЕХА) розчинів у ветеринарній медицині і органічному виробництві: (науково-практичні рекомендації) / Мандигра М. С. та ін. Луцьк : ПП Іванюк В.П., 2020. 48 с.

23. Дослідження фізико-хімічних показників води, обробленої безреагентним електрохімічним методом / Маринін А. І та ін. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Нові рішення в сучасних технологіях. 2020. № 2(4). С. 103–109.

24. Кияновский А. М. Устройство для электрохимической активации воды. *Modern engineering and innovative technologies*. 2019. Issue 8, Part 1. С. 52–57. URL: <http://dspace.ksau.kherson.ua/handle/123456789/1868>. (дата звернення: 4.10.2021).

25. Пташник В. В. Екологічно безпечні технології одержання промислових водних розчинів з використанням електрохімічної активації : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 21.06.01 «Екологічна безпека». Суми, 2014. 24 с.

26. Electrochemical disinfection of irrigation water with a graphite electrode flow cell / Geletu Q. et al. *Water*. 2021. Vol. 93. P. 535–548. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wer.1456>. (дата звернення: 15.11.2021).

27. Disinfection of Irrigation Water Using Titanium Electrodes / Geletu Q. et al. *Journal of The Electrochemical Society*. 2021. Vol. 168(6). URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1945-7111/ac0943> (дата звернення: 15.11.2021).
28. The use of ECA-water for water disinfection in horticulture. URL: <https://www.fertinnowa.com/technologies/use-eca-water-water-disinfection-horticulture/> (дата звернення: 19.11.2021).
29. Lévesque S., Graham T., Bejan D. et al. Inactivation of *Rhizoctonia solani* in fertigation water using regenerative in situ electrochemical hypochlorination. *Scientific Reports*. 2019. 9. 14237. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50600-7> (дата звернення: 01.11.2021).
30. Абезин В. Г., Карпунин В. В. Система капельного орошения с модулем электроактивации воды. *Достижения науки и техники АПК*. 2007. № 6. С. 23–25. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-kapelnogo-orosheniya-s-modulem-elektroaktivatsii-orositelnoy-vody/viewer>. (дата звернення: 18.11.2021).
31. Чушкина О. И. Технология применения электрохимически активированной воды при капельном орошении томатов : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. с.-х. наук: спец. 06.02.01 «Мелиорация, рекультивация и охрана земель». Волгоград, 2014. 23 с.
32. Создание эффективных экологически безопасных технологий и технических средств орошения нового поколения / Семененко С. Я. и др. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2018. № 2(50). С. 64–70.
33. Амчеславский О. В. Разработка технологии орошения сахарной кукурузы с использованием оптимизированных составов активированных растворов : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 06.02.01 «Мелиорация, рекультивация и охрана земель». Волгоград, 2011. 24 с.
34. Цокур Д. С. Улучшение качества регулирования кислотности почвы на основе электроактиватора воды при выращивании томатов в условиях закрытого грунта : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.02 «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве». Краснодар, 2013. 24 с.
35. Чушкин О. М. Теоретическое и экспериментальное обоснование алгоритма проектирования систем капельного орошения с модулем электрохимической активации воды : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.02 «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве». Волгоград, 2014. 24 с.

References

1. Tomilov, A. P. (2002). Elektrohimicheskaya aktivatsiya – novoe napravlenie prikladnoy elektrohimi [Electrochemical activation is a new direction of applied electrochemistry]. *Zhizn i bezopasnost*, 3, 302–307. [in Russian]
2. Bahir, V. M., Zadorozhnyi, Yu. G., Leonov, B. I., Panicheva, S. A., Prilutskiy, V. I., & Suhova, O. I. (1996). Elektrohimicheskaya aktivatsiya: istoriya, sostoyanie, perspektivy [Electrochemical activation: history, state, prospects]. Moskva. [in Russian]
3. Bahir, V. M. Teoreticheskie aspektyi elektrohimicheskoy aktivatsii. OAO «NPO «EKРАН» [Theoretical aspects of electrochemical activation]. Moskva. ikar.udm.ru. Retrieved from <https://ikar.udm.ru/sb/sb21-2-08.htm>. [in Russian]
4. Prilutskiy, V. I., & Bahir, V. M. (1997). Elektrohimicheskii aktivirovannaya voda: anomalnyie svoystva, mehanizm biologicheskogo deystviya [Electrochemically activated water: abnormal properties, mechanism of biological action]. Moskva : VNIIMT. [in Russian]
5. Shanahan, J. P., & Gonzalez, R. B. (2021). Electrochemical activation of water. – US11000883B2-2021-05-11. [patents.google.com](https://patents.google.com/patent/US11000883B2/en). Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US11000883B2/en>
6. Bahir, V. M. (2014). Elektrohimicheskaya aktivatsiya: izobreteniya, tehnika, tehnologiya [Electrochemical activation: inventions, technique, technology]. Moskva : Viva-Star. [in Russian]
7. Rabochaya programa «Elektrohimicheskie tehnologii zashchityi okruzhayushey sredy (2016). [Electrochemical technologies of environmental protection]. Yuzhno-rossyiskiy hosudarstvennyy unyversytet ym. M. Y. Platova. Novocheckassk. tf.npi-tu.ru. Retrieved from <https://tf.npi-tu.ru/assets/tf/kht/files/Progr%20TEP%20novie/extexn-zashh-okr-sr.pdf>. [in Russian]
8. Infourok «Tehnologiya elektrohimicheskoy aktivatsii (EHA) [Electrochemical activation technology (ECHA)]. infourok.ru. Retrieved from <https://infourok.ru/tehnologiya-elektrohimicheskoy-aktivatsii-eha-4777946.html>. [in Russian]

9. Vyipusknaya kvalifikatsionnaya rabota «Analiz i razrabotka sistemyi avtomaticheskogo upravleniya protsessom elektrohimi cheskoy aktivatsii vodyi». (2018) [Analysis and development of an automatic control system for the process of electrochemical activation of water]. Voronezhskiy gosudarstvennyiy lesotekhnicheskiiy universitet im. G. F. Morozova. Voronezh. nauchkor.ru. Retrieved from: https://nauchkor.ru/uploads/documents/5ecbb20acd3d3e0001403_e61.pdf. [in Russian]
10. Apparatus Producing Continuously Electrolyzed Water. (1991). USA Patent Number 5, 051, 161, 1991. Inventors: Shuji Yamagushi, Shiroji Misawa, Giichi Asanuma, all of Saitama, Japan.
11. Ghebremichael, K., Muchelemba, E., Petrusovski, B., & Amy, G. (2011). Electrochemically activated water as an alternative to chlorine for decentralized disinfection. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 60(4), 210–218.
12. ElAmin, A. (2007) Electrolyzed water effective as chemical cleaner, study finds. *foodnavigator.com*. Retrieved from <https://www.foodnavigator.com/Article/2006/01/31/Electrolyzed-water-effective-as-chemical-cleaner-study-finds>
13. Activated and Electrolyzed Water: A Brief Review of a New Generation of Cleaners and Sanitizing Agents. (2010). *Food Safety Magazine*: August 1. *Food-safety.com*. Retrieved from <https://www.food-safety.com/articles/4263-activated-and-electrolyzed-water-a-brief-review-of-a-new-generation-of-cleaners-and-sanitizing-agents>
14. Electrolyzed Water Generated On-Site as a Promising Disinfectant in the Dental Office During the COVID-19 Pandemic. *Front. Public Health*, 30 April 2021. Retrieved from <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.629142>
15. Prylutskiy, V. Y., Dolhopolov, V. Y., & Barabash, T. B. (2013). Anolityi na rynke dez sredstv: ne oshibites v vyibore! / [Anolytes in the market of disinfectants: do not make a mistake in the choice!]. *Meditsinskiy alfavIt*, 3. *bakhir.ru*. Retrieved from http://www.bakhir.ru/_img/pdf/3-eg-13-4-corr.pdf. [in Russian]
16. Bahir, V. M., Mamadzhanov, U. D., & Maksudova, M. H. (1976). Sposob predposevnoy obrabotki semyan hlochatnika [The method of pre-sowing treatment of cotton seeds]. *Avtorskoe svidetelstvo SSSR. № 663358*. [in Russian]
17. Tsikoridze, N. G., Liakumovich, A. G., Dadiani, R. G., Kirpichnikov, P. A., & Mechehiya M. V. (1985). Sposob hraneniya tsitrusovyih plodov [Method of storing citrus fruits]. *Avtorskoe svidetelstvo SSSR. № 1341743*. [in Russian]
18. Shtern, K. L., Gusakov, N. I., Spektor, L. E., & Bahir, V. M. (1987). Sposob konservirovaniya zelenoy massyi kukuruzyi [The method of preserving the green mass of corn]. *Avtorskoe svidetelstvo SSSR. № 1534772*. [in Russian]
19. Piskunov, B. A., Fisinin, V. I. Spektor, L. E., Bahir, V. M., Zadorozhniy, Yu. G., & Filonenko, V. I. (1986). Sposob obrabotki yaits selskohozyaystvennoy ptitsyi [Method of processing poultry eggs]. *Avtorskoe svidetelstvo SSSR. № 1752401*. [in Russian]
20. Aronbaev, D. M., Aronbaev, S. D., Raimkulova, Ch. A., Isakova, D. T., & Shertaeva, A. A. (2021). Voda «zhivaya» i «mertvaya». *Novyie faktyi ob antioksidantnyih i relaksatsionnyih harakteristikah elektroaktivirovannoy vodyi* [Water is «alive» and «dead». New facts about the antioxidant and relaxation characteristics of electroactivated water]. *Universum: himiya i biologiya*. *7universum.com*. Retrieved from <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/11225>. [in Russian]
21. Ptashnik, V., Nakonechna, O., Veligorska, M., & Sadova, M. (2013). Elektrokhimichna aktyvatsiia vodnykh rozchyniv yak ekolohichniy metod vodopidhotovky [Electrochemical activation of aqueous solutions as an ecological method of water treatment] *Ecology & tourism*, 12–13. *ena.lp.edu.ua*. Retrieved from <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/27007/1/005-012-013.pdf> [in Ukrainian]
22. Mandigra, M. S., & Lisitsya, A. V. (2020). Vykorystannia elektrokhimichno aktyvovanykh (EKhA) rozchyniv u veterynarnii medytsyni i orhanichnomu vyrobnytstvi: (naukovo-praktychni rekomendatsii) [The use of electrochemically activated (ECA) solutions in veterinary medicine and organic production: (scientific and practical recommendations)]. *Lutsk : PP Ivanyuk V.P.* [in Ukrainian]
23. Marynin, A. I., Bolshak, Yu. V., Sviatenko, R. S., & Shtepa, D. V. (2020). Doslidzhennia fizyko-khimichnykh pokaznykiv vody, obroblenoj bezreahentnym elektrokhimichnym metodom [Research of physicochemical parameters of water treated by reagent-free electrochemical method]. *Visnyk NTU “KhPI”*, 2, 103–109. [in Ukrainian]
24. Kiyanovskiy, A. M. (2019). Ustroystvo dlya elektrohimi cheskoy aktivatsii vodyi [Device for electrochemical activation of water]. *Modern engineering and innovative technologies*, 8,1. *dspace.ksau.kherson.ua*. Retrieved from <http://dspace.ksau.kherson.ua/handle/123456789/1868>. [in Russian]

25. Ptashnyk, V. V. (2014). Ekologichno bezpechni tekhnologii oderzhannia promyslovykh vodnykh rozchyniv z vykorystanniam elektrokhimichnoi aktyvatsii [Ecologically safe technologies for obtaining industrial aqueous solutions using electrochemical activation]. Extended abstract of candidate's thesis. Symu. [in Ukrainian]
26. Geletu, Q., Zahra, A., Shelby, L., Foster, M., & Matlock, G. (2021). Electrochemical disinfection of irrigation water with a graphite electrode flow cell. *Water*, 93, 535–548. onlinelibrary.wiley.com. Retrieved from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wer.1456>
27. Geletu, Q., Mojtaba, A., Raheleh, D., Shelby, L. Foster, & Marty, M. (2021). Disinfection of Irrigation Water Using Titanium Electrodes, *Journal of The Electrochemical Society*, 168(6). iopscience.iop.org. Retrieved from <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1945-7111/ac0943>
28. The use of ECA-water for water disinfection in horticulture. *fertinnowa.com*. Retrieved from <https://www.fertinnowa.com/technologies/use-eca-water-water-disinfection-horticulture/>
29. Lévesque, S., Graham, T., & Bejan, D. (2019). Inactivation of *Rhizoctonia solani* in fertigation water using regenerative in situ electrochemical hypochlorination. *Scientific Reports*, 9, 14237. *nature.com*. Retrieved from <https://www.nature.com/articles/s41598-019-50600-7>
30. Abezin, V. G., & Karpunin, V. V. (2007). Sistema kapelnogo orosheniya s modulem elektroaktivatsii vodyi [Drip irrigation system with water electroactivation module]. *Dostizheniya nauki i tehniki APK*, 6, 23–25. *cyberleninka.ru*. Retrieved from <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-kapelnogo-orosheniya-s-modulem-elektroaktivatsii-orositelnoy-vodyi/viewer>. [in Russian]
31. Chushkina, O. I. (2014). Tehnologiya primeneniya elektrokhimicheskii aktivirovannoy vodyi pri kapelnom oroshenii tomatov [Technology of application of electrochemically activated water at drop irrigation of tomatoes]. Extended abstract of candidate's thesis. Volgograd. [in Russian]
32. Semenenko, S. Ya., Lyitov, M. N., Chushkina, E. Y., & Chushkin, A. N. (2018). Sozдание effektivnykh ekologicheskii bezopasnykh tekhnologiy i tehnikeskikh sredstv orosheniya novogo pokoleniya [Creation of effective environmentally friendly technologies and technical means of irrigation of the new generation], *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa*, 2(50). [in Russian]
33. Amcheslavskiy, O. V. (2011). Razrabotka tekhnologii orosheniya saharnoy kukuruzyi s ispolzovaniem optimizirovannykh sostavov aktivirovannykh rastvorov [Development of sugar corn irrigation technology using optimized compositions of activated solutions]. Extended abstract of candidate's thesis. Volgograd. [in Russian]
34. Tsokur, D. S. (2013). Uluchshenie kachestva regulirovaniya kislotnosti pochvyi na osnove elektroaktivatora vodyi pri vyiraschivani tomatov v usloviyakh zakryitogo grunta [Improving the quality of soil acidity control based on electroactivator of water when growing tomatoes indoors]. Krasnodar. [in Russian]
35. Chushkin, O. M. (2014). Teoreticheskoe i eksperimentalnoe obosnovanie algoritma proektirovaniya sistem kapelnogo orosheniya s modulem elektrokhimicheskoy aktivatsii vodyi [Theoretical and experimental substantiation of the algorithm for designing drip irrigation systems with a module of electrochemical activation of water]. Volgograd. [in Russian]

М.И. Ромащенко, Б.И. Конаков, В.В. Полищук, С.В. Усатый
Электрохимически активированная вода (ЭХАВ):
история открытия, специфика процесса, современное состояние
и перспективы ее применения в условиях орошения

***Аннотация.** Проанализирована история открытия, специфика процесса и современного состояния использования электрохимически активированной воды (ЭХАВ) в различных отраслях экономики и определены возможности ее применения при орошении. Установлено, что наиболее перспективным направлением применения ЭХАВ в орошаемом земледелии являются системы капельного орошения. Добавление анолита в воду при капельном орошении позволяет существенно уменьшить (или вообще исключить) необходимость использования средств защиты растений, а добавление католита существенно ускоряет развитие и увеличивает урожайность сельскохозяйственных культур на фоне повышения качества продукции. Экологическими последствиями этого является уменьшение антропогенной нагрузки на орошаемые земли путем полной или частичной замены химических средств защиты растений анолитом, являющимся экологически безопасной жидкостью; экономическими – повышение рентабельности и сокращение сроков окупаемости проектов по орошению земель. Определено, что перспективность использования ЭХАВ в системах капельного орошения обусловлена тем, что технология водоподдачи позволяет подавать католит и анолит на поле с минимальными потерями активационного потенциала. Предрасполагающим*

фактором использования ЭХАВ в системах капельного орошения является также их конструкции по модульному принципу, способствующему возможности оборудования узлов водоподготовки систем модулями ЭХАВ. В то же время проектирование систем следует проводить с учетом не только необходимости обеспечения равномерности распределения капельницами воды по полю, но и с сохранением активационного потенциала электрохимически активированных компонентов оросительной воды. На основании изложенного можно считать, что разработка средств электрохимической активации воды для нужд орошения, а также технологий применения такой воды при выращивании сельскохозяйственных культур актуальна и своевременна. Проведение фундаментальных и прикладных исследований будет способствовать созданию отечественного оборудования для промышленного производства ЭХАВ и позволит адаптировать мировые технологии их использования к условиям и потребностям украинского производителя и потребителя. Особенно эффективным может быть применение электрохимически активированной воды в системах капельного орошения.

Ключевые слова: электрохимически активированная вода (ЭХАВ), анолит, католит, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), орошение активированной водой, системы капельного орошения

M.I. Romashchenko, B.I. Konakov, V.V. Polishchuk, S.V. Usatyi

Electrochemically activated water (ECHAW): history of discovery, specificity of the process, current state and prospects of its application under irrigation conditions

Abstract. *The history of the discovery, the specificity of the process and the current state of the use of electrochemically activated water (ECHAW) in various sectors of the economy are analyzed and the possibilities of its use in irrigation are determined. It has been established that the most promising area of application of ECHAW in irrigated agriculture are drip irrigation systems. The adding an anolyte to water during drip irrigation can significantly reduce (or even eliminate) the need to use plant protection products and the adding an catholyte significantly accelerates the development and increases the yield of agricultural crops against the background of improving product quality. The ecological consequences of this are the reduction of anthropogenic load on irrigated lands through the complete or partial replacement of chemical plant protection products with anolyte, which is an environmentally safe liquid; economic – increasing profitability and reducing the payback period of land irrigation projects. It has been determined that the prospect of using ECHAW in drip irrigation systems is due to the fact that the water supply technology allows supplying catholyte and anolyte to the field with minimal losses of activation potential. A predisposing factor for the use of ECHAW in drip irrigation systems is also their design according to a modular principle, which contributes to the possibility of equipping water treatment units of systems with ECHAW modules. At the same time, the design of systems should be carried out taking into account not only the need to ensure uniform distribution of water by droppers over the field, but also with the preservation of the activation potential of electrochemically activated components of irrigation water. Based on the foregoing, it can be considered that the development of means of electrochemical activation of water for irrigation needs, as well as technologies for the use of such water in growing crops is relevant and timely. The deployment of fundamental and applied research will contribute to the development of domestic equipment for the industrial production of ECHAW and will allow adapting the world technologies of their use to the conditions and needs of the Ukrainian manufacturer and consumer. The use of electrochemically activated water in drip irrigation systems can be especially effective.*

Key words: electrochemically activated water (ECHAW), anolyte, catholyte, redox potential, irrigation with activated water, drip irrigation systems

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-298>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/298>

УДК 631.421;631.432

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ВОДНОГО РЕЖИМУ ҐРУНТУ ТА ВОДОСПОЖИВАННЯ КУКУРУДЗИ ЗА ПІДҐРУНТОВОГО КРАПЛИННОГО ЗРОШЕННЯ

М.І. Ромащенко¹, докт. техн. наук, А.П. Шатковський², докт. с-г. наук, А.С. Сардак³,
Ю.О. Черевичний⁴, канд. с-г. наук, Н.О. Діденко⁵, канд. с-г. наук, О.А. Марінков⁶

¹ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-9997-1346>; e-mail: mi.romashchenko@gmail.com;

² Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-4366-0397>; e-mail: andriy-1804@ukr.net;

³ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-0540-9492>; e-mail: anastasiabilobrova1993@gmail.com;

⁴ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-9959-8297>; e-mail: yurecgp@gmail.com;

⁵ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-0654-4231>; e-mail: 9449308nd@gmail.com;

⁶ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-3606-5522>; e-mail: marinkovoleg995@gmail.com

Анотація. Наведено результати експериментальних досліджень із вивчення особливостей формування водного режиму ґрунтів, процесів водоспоживання і урожайності кукурудзи за різних схем розміщення поливальних трубопроводів (ПТ) за підґрунтового краплинного зрошення (ПКЗ) в умовах Степу України. Зона зволоження темно-каштанового залишково-солонцюватого супіщаного ґрунту (ДП «ДГ «Брилівське») змінювалась зі збільшенням норми поливу, відбувається зміщення центру відносно краплинного водовипуску у більш глибокі горизонти ґрунтового профілю (до 52 см); шар ґрунту 0-15 см майже не зволожується, незалежно від норми поливу. За відстані ПТ 1,0 м змикання зон зволоження між ПТ відбувається за норми поливу 2,7 м³/100 п.м, а за відстані ПТ 1,4 м – не відбувається навіть за норми поливу 3,7 м³/100 п.м, у цьому разі глибина зволоження доходить до 90 см. Зона зволоження чорнозему осолоділого супіщаного на лесовій породі (ДП «ДГ «Великі Клини») за норми поливу 2,7 м³/100 п.м спостерігалась на поверхні ґрунту. Максимальна глибина зволоження за норми поливу 3,7 м³/100 п.м досягала 70 см із максимальним діаметром 79 см на глибині 25 см. Змикання зон зволоження між ПТ не спостерігалось.

Дослідженнями в ДП «ДГ «Брилівське» підтверджено, що глибина розміщення ПТ (на поверхні ґрунту чи на глибині 30 см) впливала на формування водного режиму ґрунту і урожайність кукурудзи. Мінімальне сумарне водоспоживання становило 6271 м³/га за краплинного зрошення (КЗ) (ПТ 1,4 м), на 17% більше за ПКЗ (ПТ 1,4 м) та на 29% за ПКЗ (ПТ 1,0 м). Найвищий показник урожайності отримано у варіанті за КЗ (ПТ 1,4 м) – 15,72 т/га. За ПКЗ (ПТ 1,0 м) отримано 13,93 т/га, а за ПКЗ (ПТ 1,4 м) – 13,50 т/га.

Відстань між ПТ системи ПКЗ 1,0 м та 1,4 м несуттєво впливала на урожайність кукурудзи (13,93 та 13,50 т/га відповідно), але за відстані ПТ 1,4 м коефіцієнт водоспоживання був на 6,8% меншим, порівняно з ПТ 1,0 м. Величина норми зрошення у варіанті за ПКЗ (ПТ 1,0 м) була вищою за ПКЗ (ПТ 1,4 м) на 13,6%. Отже, за параметром витрат поливальної води і величиною капітальних витрат більш економічною є система ПКЗ (ПТ 1,4 м).

Дослідження, проведені в ДП «ДГ «Великі Клини», показують, що глибина розміщення ПТ (на поверхні ґрунту чи на глибині 20 см) не впливала на урожайність кукурудзи: за КЗ (ПТ 1,0 м) урожайність становила 12,00 т/га, а за ПКЗ (ПТ 1,0 м) – 12,10 т/га, при цьому коефіцієнт водоспоживання – 533,8 м³/т, а за КЗ (ПТ 1,0 м) на 3,6% більше.

Результати досліджень підтверджують важливе значення параметрів системи ПКЗ для формування водного режиму ґрунтів, реалізації потенціалу сортів і гібридів сільськогосподарських культур за ПКЗ.

Ключові слова: підґрунтове краплинне зрошення, кукурудза, водний режим ґрунту, зона зволоження, поливальні трубопроводи

Актуальність дослідження. Потенційні можливості технологій краплинного зрошення, насамперед за рахунок оптимізації водного та поживного режимів ґрунту, дозволяють отримувати достатньо високі рівні врожайності за одночасної мінімізації питомих витрат

ресурсів на одиницю продукції. Цей факт є основним стимулом у впровадженні цього способу зрошення в овочівництві, баштанництві, садівництві, виноградарстві, ягідництві, а останнім часом – і для вирощування низки просапних культур польової сівозміни.

Черговим етапом розвитку краплинного зрошення в Україні є підґрунтове краплинне зрошення. Система підґрунтового краплинного зрошення (ПКЗ) (SDI – subsurface drip irrigation) – це сукупність технологічно та технічно пов'язаних між собою технічних засобів, призначених забирати, очищати, транспортувати та розподіляти поливальну воду на ділянці зрошення за допомогою підземних поливальних трубопроводів з краплинними водовипусками. Термін ПКЗ вживається для систем, призначених для багаторічного використання, які найчастіше встановлені нижче глибини обробітку ґрунту [1].

Поливальні трубопроводи (ПТ) розміщуються в ґрунті на відповідній глибині. При такому способі укладання зменшується фізичне випаровування вологи з поверхні ґрунту. Водночас не створюється небезпека підтоплення та заболочування території, тим самим підвищується екологічна безпека зрошення. Підтримання вологості ґрунту та вмісту поживних речовин в оптимальному діапазоні в межах активного шару ґрунту протягом всього періоду вегетації рослин дає змогу більш повно використовувати генетичний потенціал сільськогосподарських культур. Оскільки поверхня ґрунту не зрошується, стримується проростання бур'янів і відповідно зменшується питоме пестицидне навантаження на територію. Поливальні трубопроводи за підґрунтового розміщення менш вразливі до пошкоджень при механічному обробітку ґрунту. На ділянках, оснащених системами підґрунтового краплинного зрошення, є можливість вирощувати різні сільськогосподарські культури, а витрати праці на обслуговування поливної мережі зменшуються.

Параметри поливної мережі, а саме глибина розміщення поливальних трубопроводів, відстань між ними, відстань між краплинними водовипусками та їх витрата є основними критеріями ефективності системи ПКЗ.

Ефективність ПКЗ часто страждає від таких проблем як засмічення емітера (хімічне осадження, біологічні та фізичні фактори і проростання коріння рослин) і недостатня рівномірність розподілу вологи. Однак, оскільки покращено пластикові матеріали, виробничі

процеси і конструкції емітерів, впровадження ПКЗ відбувається як у дослідницькій, так і в комерційній діяльності більш активно.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вплив конструктивних параметрів системи підґрунтового краплинного зрошення, а саме глибини розміщення поливальних трубопроводів та відстані між ними, на формування водного режиму ґрунту вітчизняними вченими практично не досліджувалася. Є певні дослідження з вивчення впливу способу поливу на формування водного режиму ґрунту, зокрема Лавриненком Ю.О., Аверчевим О.В. та Іванівим М.О., протягом 2017-2019 рр., досліджено вплив різних способів зрошення (краплинне та підґрунтове краплинне зрошення, дощування) на продуктивність гібридів кукурудзи різних груп ФАО в умовах Степу Сухого, на темно-каштанових середньосуглинкових ґрунтах [2,3,4,5]. У цих досліджах доведено, що найвищу урожайність гібридів кукурудзи формували за умов краплинного зрошення. Зменшення урожайності за інших способів зрошення становило в межах від 0,41 до 2,35 т/га. Найкращими результатами за краплинного зрошення відзначались середньопізні гібриди – Арабат і ДН Софія – середня урожайність становила відповідно 15,23 та 15,78 т/га і була вищою на 1,02 – 2,35 т/га ніж за інших способів зрошення. Шатковським А.П., Журавльовим О.В., Овчатовим І.М., протягом 2018-2020 рр., досліджено вплив різних способів зрошення (краплинного та підґрунтового краплинного зрошення (глибина розміщення ПТ 25 см), дощування) на формування водного режиму ґрунту та продуктивність кукурудзи та сої в умовах Степу України, на чорноземі звичайному середньосуглинковому [6]. За результатами досліджень за підґрунтового краплинного зрошення формувалась найменша кількість поливів, норма зрошення та сумарне водоспоживання. Але найвищу урожайність зерна кукурудзи отримано за краплинного зрошення – 20,69 т/га, тоді як за підземного розміщення поливальних трубопроводів вона була достовірно нижча – 16,44 т/га. Проте, за абсолютними параметрами витрат поливальної води найбільш економним було підґрунтове краплинне зрошення. А також дослідженнями підтверджено, що верхній 0–4 см шар ґрунту недостатньо зволожується у результаті поливу [7].

Більш ґрунтовні дослідження, саме впливу конструктивних параметрів системи підґрунтового краплинного зрошення на формування водного режиму ґрунту та урожайність

кукурудзи, проведені в Сполучених Штатах Америки [8, 9, 10]. Так, у дослідженнях глибини розміщення ПТ системи ПКЗ при вирощуванні кукурудзи на супіщаних ґрунтах у штаті Нью-Мексико США зафіксовано більшу урожайність і вищу ефективність використання поливальної води для глибин 0,15 і 0,20 м, ніж для глибин 0,25 і 0,30 м [11]. Вченими з штату Флориди США встановлено збільшення урожайності на 31% для глибин розміщення ПТ 0,23 м, порівняно з 0,33 м, на піщаному ґрунті [12]. На землях Бушленду штату Техас у США досліджено 3 глибини розміщення поливальних трубопроводів: 0,15; 0,23; 0,30 м під посівами кукурудзи на глинисто-суглинкових ґрунтах та встановлено, що урожайність у середньому була найбільша при глибині ПТ – 0,23 м [9]. Підводячи підсумок цим результатам, глибина розміщення поливальних трубопроводів для кукурудзи, яка має велику кореневу систему, може поглинати воду з більш глибоким розміщенням ПТ (приблизно від 0,30 до 0,40 м), а проростання культури може бути покращене при неглибокому розміщенні трубопроводів (від 0,20 до 0,25 м).

За результатами досліджень, проведених у США, щодо визначення оптимальної відстані між ПТ під посівами кукурудзи, виявлено, що більша відстань між ПТ може бути ефективніша для ґрунтів шаруватої будови, що дозволяє збільшити горизонтальну складову перерозподілу води, а також в цілому відстань між ПТ близько 150 см зазвичай рекомендують для вирощування кукурудзи на середніх та важких структурованих ґрунтах. Ці результати відповідають висновкам огляду [13] та історичній дискусії [14].

Метою досліджень є встановлення особливостей формування водного режиму ґрунту, водоспоживання та урожайності рослин кукурудзи за різних схем розміщення поливальних трубопроводів системи підґрунтового краплинного зрошення.

Матеріали і методи дослідження. Польові дослідження проведено на землях Державного підприємства «Дослідного господарства «Брилівське» ІВПіМ НААН протягом 2018–2020 рр. Досліджували три варіанти: підґрунтове краплинне зрошення з розміщенням поливальних трубопроводів (ПТ) на глибині 0,3 м та відстані 1,4 м один від одного (ПКЗ (ПТ 1,4 м)); підґрунтове краплинне зрошення з розміщенням ПТ на глибині 0,3 м та відстані 1,0 м один від одного (ПКЗ (ПТ 1,0 м)); краплинне зрошення з розміщенням ПТ на поверхні ґрунту на відстані 1,4 м один

від одного (КЗ (ПТ 1,4 м) (умовний контроль). Польові дослідження закладали за методом систематичного розміщення елементарних ділянок у чотириразовій повторності. Площа облікових ділянок – 30 м² [15], гібрид кукурудзи – ДКС 5276 (ФАО 460), посів на глибину 4,5–5,0 см за схемою 70+70x15 см (95,238 тис. шт/га). Польова схожість рослин у середньому становила 96%. Джерело зрошення – свердловина із загальною мінералізацією води 0,422 г/дм³ (І класу якості за ДСТУ 2730, ДСТУ 7286, ДСТУ 7591).

Ґрунт дослідної ділянки – темно-каштановий залишково-солонцюватий супіщаний, щільність складення ґрунту у шарі 0–50 см – 1,57 г/см³, у шарі 0–100 см – 1,59 г/см³, найменша вологомісткість у шарі 0–50 см – 18,55% за об'ємом. Реакція ґрунтового розчину (рН_{сольовий}) коливається від близької до нейтральної у шарі 0–40 см (рН=5,75–5,95) та нейтральної у шарі 40–100 см (рН=6,08–6,35). За період вегетації кукурудзи у 2018 р. випало 201,1 мм опадів, що на 33,1 мм більше за середньобогаторічне значення для цього періоду, 2019 р. – 176,4 мм, 2020 р. – 71,8 мм (43% від середньобогаторічної норми).

У 2020–2021 рр. продовжено дослідження на території Державного підприємства «Дослідного господарства «Великі Клини» ІВПіМ НААН. Досліджували два варіанти: підґрунтове краплинне зрошення з розміщенням поливальних трубопроводів (ПТ) на глибині 0,2 м та відстані 1,0 м один від одного (ПКЗ ПТ 1,0 м); краплинне зрошення з розміщенням ПТ на поверхні ґрунту на відстані 1,0 м один від одного (КЗ ПТ 1,0 м). Польові дослідження закладали за методом систематичного розміщення елементарних ділянок у чотириразовій повторності. Площа облікових ділянок – 30 м² [15], гібрид кукурудзи – ДМ Скарб (ФАО 330), посів на глибину 4,5–5,0 см за схемою 70+70x15 см (95,238 тис.шт/га). Польова схожість рослин – 70%. Джерело зрошення – свердловина із загальною мінералізацією води 0,384 г/дм³ (І класу якості за ДСТУ 2730, ДСТУ 7286, ДСТУ 7591).

Ґрунт дослідної ділянки – чорнозем осолоділий супіщаний на лесовій породі, щільність складення ґрунту у шарі 0–50 см – 1,73 г/см³, у шарі 0–100 см – 1,66 г/см³, найменша вологомісткість у шарі 0–50 см – 16,27% за об'ємом. Реакція ґрунтового розчину (рН_{водний}) у шарі 0–60 см була слаболужною (рН=7,51–7,54) і нейтральною у шарі 60–100 см (рН=7,44–7,50). За період вегетації кукурудзи у 2021 р. випало 227,1 мм опадів, що на 29,1 мм більше за середньобогаторічне значення для цього періоду.

Рівень передполивної вологості в дослідях підтримували на рівні 80–85% від НВ. Моніторинг вологозапасів здійснювали за допомогою станції вологості ґрунту iMetos ECO D2, яка обладнана датчиками вологості ґрунту Watermark (200 SS), що призначені для визначення капілярного потенціалу ґрунтової вологи, який характеризує водоутримувальні сили ґрунту та доступність вологи для рослин.

Результати дослідження і їх обговорення. Одним із критеріїв вибору глибини розміщення ПТ системи ПКЗ є можливість формування зон зволоження, параметри яких дозволяють підтримувати оптимальний водний режим ґрунту. Зона зволоження – це об'єм ґрунту, в межах якого акумулюється поливальна вода на момент закінчення поливу [16]. Розміри і форма зон зволоження залежать від водно-фізичних властивостей ґрунту, інтенсивності подачі і кількості поданої води.

На основі проведених досліджень визначено форму та розміри зон зволоження, які формувалися на темно-каштановому залишково-солонцюватому супіщаному ґрунті в ДП «ДГ «Брилівське» за ПКЗ залежно від тривалості поливу (норми поливу) (рис. 1). У дослідженнях використано поливальний трубопровід ASSIF з відстанню між краплинними водовипусками 0,50 м, витратою крапельниць 1,60 дм³/год, глибиною розміщення ПТ 0,30 м. Тривалість поливу складала від 1 до 7 годин. Передполивна вологість ґрунту 85% НВ.

Форма зон зволоження наближається до еліпсу, що обумовлено рухом вологи спершу вниз, а потім у сторони та вгору відносно краплинного водовипуску. Зі збільшенням тривалості поливу відбувається зміщення центру зони зволоження відносно краплинного водовипуску відповідно у більш глибокі горизонти ґрунтового профілю (до 52 см). Верхній 15 см шар ґрунту майже не зволожується, незалежно від тривалості поливу (рис. 1).

Величина норми поливу за ПКЗ (ПТ 1,0 м) у середньому становила 220 м³/га, з розрахунком на те, що смуга зволоження становитиме 100 см. За ПКЗ (ПТ 1,4 м) норма поливу – 180 м³/га, а смуга зволоження – 70–80 см. Згідно з технічними характеристиками системи ПКЗ тривалість поливу у варіанті ПКЗ (ПТ 1,0 м) становила 7 год, а за ПКЗ (ПТ 1,4 м) – 6 год.

За експериментальними даними за відстані ПТ 1,0 м вже на 5 годину поливу (2,7 м³/100 п.м) спостерігалось змикання зон зволоження між ПТ на глибинах від 40 до 60 см, і наступні дві години поливу відбувалось підживлення зони зволоження, що призвело до збільшення втрат вологи за межі кореневмісного шару ґрунту, нижче 80 см.

За відстані ПТ 1,4 м після 6 годин поливу (3,2 м³/100 п.м) максимальний діаметр зон зволоження становив 127,0 см на глибині 50 см, змикання та підживлення зонами зволоження між ПТ не відбувалось. Максимальна глибина зволоження при цьому доходила майже до 90 см.

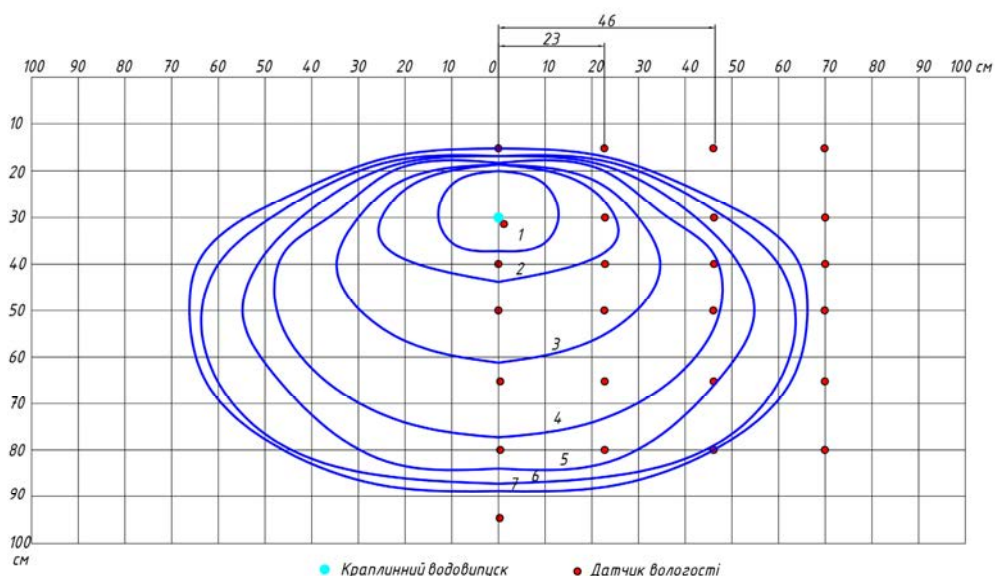


Рис. 1. Контури зон зволоження ґрунтового профілю за ПКЗ залежно від тривалості поливу в ДП «ДГ «Брилівське» (цифрами позначено тривалість поливу, год)

Такі ж дослідження були проведені в ДП «ДГ «Великі Клини» на чорноземі осолоділому супіщаному на лесовій породі (рис. 2). У дослідженнях використано поливальний трубопровід Lin із відстанню між краплинними водовипусками 0,50 м, витратою крапельниць 1,60 дм³/год, глибиною розміщення ПТ 0,20 м. В якості експерименту тривалість поливу складала від 1 до 7 годин. Передполивна вологість ґрунту 85% НВ.

Величина норми поливу за ПКЗ (ПТ 1,0 м) у середньому становила 125 м³/га. Згідно з технічними характеристиками системи ПКЗ тривалість поливу становила 4 год. Після чотирьох годин поливу зона зволоження спостерігалась на поверхні ґрунту, безпосередньо над краплинним водовипуском. Максимальний діаметр зони зволоження становив 52 см, глибина зволоження досягала 50 см.

Починаючи з 5 години поливу (2,7 м³/100 п.м) зона зволоження спостерігалась на поверхні ґрунту, що контролювалася візуально з вимірюваннями ширини смуги зволоження наступні три години. Максимальна глибина зволоження після 7 годин поливу (3,7 м³/100 п.м) досягала 70 см, а максимальний діаметр при цьому становив 79 см на глибині 25 см. Змикання сусідніх зон зволоження між ПТ не спостерігалось.

Отже, результати досліджень форми та розмірів зон зволоження свідчать, що на дослідній ділянці в ДП «ДГ «Брилівське» за обох відстаней розміщення ПТ практично неможливо забезпечити зволоження шару ґрунту 0–15 см, що може негативно впли-

вати на умови вологозабезпечення рослин кукурудзи на початкових фазах її розвитку. Навпаки, на дослідній ділянці в ДП «ДГ «Великі Клини» забезпечується зволоження ґрунту до денної поверхні, що дає підставу сподіватися на можливість формування оптимального для розвитку рослин водного режиму ґрунту протягом всього періоду їх вегетації.

Результати проведених польових досліджень щодо режимів зрошення та параметрів водоспоживання культури показали, що фактично вони формувалися залежно від варіанту дослідів і метеорологічних умов вегетаційного періоду окремо взятого року. Усереднені кількість вегетаційних поливів, величини норм зрошення і сумарного водоспоживання за різних схем розміщення поливальних трубопроводів системи КЗ у розрізі років досліджень наведено в табл. 1.

В середньому за роки дослідження у варіанті за КЗ (ПТ 1,4 м) було проведено 29 поливів, за ПКЗ (ПТ 1,0 м) – 29 поливів та за ПКЗ (ПТ 1,4 м) – 30 поливів. Величини норм зрошення залежно від схеми розміщення поливальних трубопроводів системи ПКЗ змінювалися аналогічно. Мінімальні сумарні витрати поливальної води були за краплинного зрошення – 4350 м³/га, за підґрунтового краплинного зрошення (ПТ 1,4 м) на 24,3% більше (5407 м³/га) та на 43,8% більше (6257 м³/га) за підґрунтового краплинного зрошення (ПТ 1,0 м). Різниця між варіантами ПКЗ (ПТ 1,0 м) та (ПТ 1,4 м) становила 13,6%.

Встановлено, що мінімальне сумарне водоспоживання рослин кукурудзи у середньому

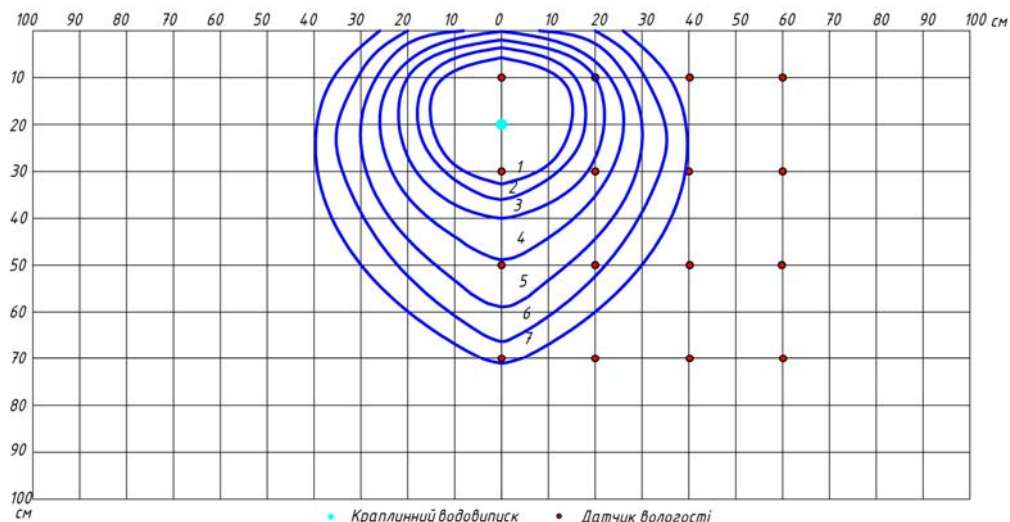


Рис. 2. Контури зон зволоження ґрунтового профілю за ПКЗ залежно від тривалості поливу в ДП «ДГ «Великі Клини» (цифрами позначено тривалість поливу, год)

1. Режим зрошення та сумарне водоспоживання кукурудзи залежно від схем розміщення ПТ на системі КЗ в ДП «ДГ «Брилівське» (2018–2020 рр.)

Схема розміщення ПТ	Кількість поливів	Норма зрошення		Продуктивні опади		Запаси ґрунтової вологи, м ³ /га (шар ґрунту 0–100 см)				Сумарне водоспоживання, м ³ /га
		м ³ /га	%*	м ³ /га	%*	поч.	кін.	баланс		
								м ³ /га	%*	
ПКЗ (ПТ 1,4 м)	30	5407	74,2	1417	19,0	1298	800	498	6,8	7322
ПКЗ (ПТ 1,0 м)	29	6257	77,6		17,3	1343	927	416	5,1	8090
КЗ (ПТ 1,4 м) (умовний контроль)	29	4350	69,8		22,2	1283	778	504	8,0	6271

* балансова частка витрат вологи в сумарному водоспоживанні

за три роки досліджень становило 6271 м³/га за краплинного зрошення (ПТ 1,4 м), майже на 17% більше (7322 м³/га) – за підґрунтового краплинного зрошення (ПТ 1,4 м) та на 29% (8090 м³/га) – за підґрунтового краплинного зрошення (ПТ 1,0 м). Порівнюючи варіанти схеми розміщення поливальної трубопроводів системи ПКЗ виявлено, що за відстані ПТ 1,0 м сумарне водоспоживання становило на 10,5% більше ніж за відстані ПТ 1,4 м.

Частка поливальної води у формуванні сумарного водоспоживання була найбільша і становила 76,6% (підґрунтове краплинне зрошення з ПТ 1,0 м), 74,2% і 69,8% (підґрунтового краплинного зрошення з ПТ 1,4 м і краплинне зрошення з ПТ 1,4 м, відповідно).

На продуктивні опади в сумарному водоспоживанні припадає, відповідно, від 17,3 до 22,2%. Частка продуктивних опадів у формуванні сумарного водоспоживання за краплинного зрошення (ПТ 1,4 м) на 4,9% більша порівняно з підґрунтовим краплинним зрошенням (ПТ 1,0 м).

Використання рослинами запасів ґрунтової вологи у формуванні сумарного водоспоживання було найменшим за підґрунтового краплинного зрошення з ПТ 1,0 м (5,1%),

а за відстані ПТ 1,4 м – 6,8%. За краплинного зрошення (ПТ 1,4 м) найбільше використовуються запаси ґрунтової вологи – 8,0%.

Ефективність схем розміщення поливальної трубопроводів системи ПКЗ визначали, порівнюючи урожайність та коефіцієнти водоспоживання кукурудзи (табл. 2).

Найвищий показник урожайності сухого зерна (14% вологості) отримано у варіанті за краплинного зрошення (ПТ 1,4 м) – 15,72 т/га. За ПКЗ (ПТ 1,0 м) отримано на 1,79 т/га (11%) менше – 13,93 т/га. Також достовірно фіксували зниження урожайності за ПКЗ (ПТ 1,4 м) (на 14%) – до 13,50 т/га. Фактичне зниження урожайності за ПКЗ є наслідком неоптимального вологозабезпечення рослин у період від посіву до фази «6–8 справжній листок». У варіантах із підґрунтовим краплинним зрошенням (ПТ 1,4 м) зниження урожайності зерна на 0,43 т/га порівняно із ПКЗ (ПТ 1,0 м) було у межах похибки польового дослідження, що вказує на тенденцію формування цього параметра.

Коефіцієнт водоспоживання, який характеризує ефективність витрачання поливальної води, був мінімальним за краплинного зрошення (ПТ 1,4 м) – 399,17 м³ вологи на

2. Урожайність та коефіцієнти водоспоживання кукурудзи за різних схем розміщення ПТ на системі КЗ в ДП «ДГ «Брилівське» (2018–2020 рр.)

Схема розміщення ПТ	Урожайність, т/га	Відхилення від контролю, т/га	Сумарне водоспоживання, м ³ /га	Коефіцієнт водоспоживання, м ³ /т
ПКЗ (ПТ 1,4 м)	13,50	-2,22	7322	545,87
ПКЗ (ПТ 1,0 м)	13,93	-1,79	8090	582,90
КЗ (ПТ 1,4 м) (умовний контроль)	15,72	–	6271	399,17
НІР ₀₅	1,24	–	–	–

формування 1 тонни сухого зерна кукурудзи. За підґрунтового краплинного зрошення, з розміщенням поливальних трубопроводів на глибині 30 см, достовірно підвищувало питомі витрати вологи на 37% (ПТ 1,4 м) і 46% (ПТ 1,0 м) порівняно із поверхневим. Порівнюючи варіанти схеми розміщення поливальних трубопроводів системи ПКЗ з'ясовано, що за відстані ПТ 1,0 м коефіцієнт водоспоживання становив на 6,8% більше ніж ПТ 1,4 м.

З урахуванням отриманих результатів та зроблених висновків у 2021 р закладено дослід у ДП «ДГ «Великі Клини» ІВПіМ НААН. Результати наведені в табл. 3.

У варіанті КЗ (ПТ 1,0 м) було проведено 26 поливів, нормою зрошення 3859 м³/га, за ПКЗ (ПТ 1,0 м) – 27 поливів, нормою зрошення – 3837 м³/га. Мінімальне сумарне водоспоживання становило 6458,6 м³/га за підґрунтового краплинного зрошення (ПТ 1,0 м), а на 2,8% більше (6637,1 м³/га) – за краплинного зрошення (ПТ 1,0 м).

Використання рослинами запасів ґрунтової вологи у формуванні сумарного водоспоживання було найменшим за підґрунтового краплинного зрошення (ПТ 1,0 м) – 5,4%, а за краплинного зрошення (ПТ 1,0 м) майже у півтори рази більше – 7,6%.

Урожайність кукурудзи отримано у варіанті за КЗ (ПТ 1,0 м) – 12,00 т/га, за ПКЗ (ПТ 1,0 м) отримано – 12,10 т/га, різниця між варі-

антами знаходиться в межах похибки досліду, що свідчить про відсутність впливу глибини розміщення поливальних трубопроводів на урожайність кукурудзи (табл. 4).

Коефіцієнт водоспоживання за ПКЗ (ПТ 1,0 м) становив 533,77 м³/т, а за КЗ (ПТ 1,0 м) на 3,6% більше – 553,09 м³/т.

Висновки. За результатами експериментальних досліджень, проведених на темно-каштановому залишково-солонцюватому супіщаному ґрунті (ДП «ДГ «Брилівське»), встановлено, що форма та розміри зон зволоження за ПКЗ залежали від норми поливу (тривалості поливу), а саме зі збільшенням норми поливу відбувається зміщення центру зони зволоження відносно краплинного водовипуску відповідно у більш глибокі горизонти ґрунтового профілю (до 52 см), а верхній 15 см шар ґрунту майже не зволожується, незалежно від норми поливу. За відстані ПТ 1,0 м змикання зон зволоження між ПТ відбувається вже за норми поливу 2,7 м³/100 п.м (5 годин поливу), а за відстані ПТ 1,4 м змикання зон зволоження між ПТ не відбувається навіть за норми поливу – 3,7 м³/100 п.м (7 годин поливу), при цьому глибина зволоження доходить майже до 90 см.

За результатами досліджень, проведених на чорноземі осолоділому супіщаному на лесовій породі (ДП «ДГ «Великі Клини»), залежно від норми поливу, зона зволоження формувалась у шарі ґрунту 0–70 см. Вже за вели-

3. Режим зрошення та сумарне водоспоживання кукурудзи залежно від схем розміщення ПТ на системі КЗ в ДП «ДГ «Великі Клини» (2021 р.)

Схема розміщення ПТ	Кількість поливів	Норма зрошення		Продуктивні опади		Запаси ґрунтової вологи, м ³ /га (шар ґрунту 0–100 см)				Сумарне водоспоживання, м ³ /га
		м ³ /га	%*	м ³ /га	%*	поч.	кін.	баланс		
								м ³ /га	%*	
КЗ (ПТ 1,0 м)	26	3859	58,4	2271,0	34,4	1984,1	1476,9	480,5	7,6	6637,1
ПКЗ (ПТ 1,0 м)	27	3837	59,4		35,2	2079,9	1729,3	350,6	5,4	6458,6

* балансова частка витрат вологи в сумарному водоспоживанні

4. Урожайність та коефіцієнти водоспоживання кукурудзи за різних схем розміщення ПТ на системі КЗ в ДП «ДГ «Великі Клини» (2021 р.)

Схема розміщення ПТ	Урожайність, т/га	Сумарне водоспоживання, м ³ /га	Коефіцієнт водоспоживання, м ³ /т
КЗ (ПТ 1,0 м)	12,00	6637,1	553,09
ПКЗ (ПТ 1,0 м)	12,10	6458,6	533,77
НІР05	0,26	–	–

чини норми поливу – 2,7 м³/100 п.м (5 годин поливу) зона зволоження спостерігалась на поверхні ґрунту. Максимальна глибина зволоження, за норми поливу – 3,7 м³/100 п.м (7 годин поливу), досягала 70 см, а максимальний діаметр при цьому становив 79 см на глибині 25 см. Змикання сусідніх зон зволоження між ПТ не спостерігалось.

Дослідженнями в ДП «ДГ «Брилівське» підтверджено, що глибина розміщення ПТ (на поверхні ґрунту чи на глибині 30 см) достовірно впливає на формування водного режиму ґрунту і продуктивність кукурудзи. Краплинне зрошення кукурудзи, з розміщенням ПТ на поверхні ґрунту, забезпечує найвищі рівні урожайності (15,72 т/га) за найменших витрат спожитої вологи на формування одиниці врожаю (коефіцієнта водоспоживання) – 399,17 м³/т. Фактичне зниження урожайності за ПКЗ є наслідком неоптимального вологозабезпечення рослин у період від посіву до фази «6–8 справжній листок».

Відстань між ПТ системи підґрунтового краплинного зрошення 1,0 м та 1,4 м несуттєво впливала на урожайність кукурудзи (13,93 та 13,50 т/га відповідно), але за відстані ПТ 1,4 м коефіцієнт водоспоживання був на

6,8% меншим, порівняно з ПТ 1,0 м. Отже, і за параметром витрат поливальної води і за обсягами капітальних витрат, більш економічною є система підґрунтового краплинного зрошення з розміщенням ПТ через 1,4 м.

За результатами експериментальних досліджень, проведених в ДП «ДГ «Великі Клини», глибина розміщення ПТ (на поверхні ґрунту чи на глибині 20 см) не впливала на урожайність кукурудзи. За КЗ (ПТ 1,0 м) урожайність становила 12,00 т/га, а за ПКЗ (ПТ 1,0 м) – 12,10 т/га, при цьому коефіцієнт водоспоживання становив 533,8 м³/т, а за КЗ (ПТ 1,0 м) на 3,6% більше – 553,1 м³/т. Але цей результат отримано в умовах аномально вологого року.

Загалом результати досліджень підтверджують важливе значення параметрів глибини розміщення та відстані між ПТ для формування водного режиму ґрунтів і відповідно реалізації потенціалу сортів і гібридів сільськогосподарських культур при їх вирощуванні за підґрунтового краплинного зрошення. Тому питання вибору глибини та відстані розміщення ПТ на стадії проектування систем ПКЗ має здійснюватися з використанням математичного моделювання процесів вологоперенесення.

Бібліографія

1. Camp C. R., Lamm F. R. Irrigation Systems, Subsurface Drip // *Encyclopedia Water Science*. Marcel Dekker, New York, 2003. Pp. 560–564.
2. Лавриненко Ю. О., Іванів М. О. Продуктивність та адаптивна здатність гібридів кукурудзи залежно від способів поливу і вологозабезпечення в посушливому Степу України // *Зернові культури*. 2019. Том 3. № 2. С. 207–216. URL: <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0079>
3. Біометричні показники гібридів кукурудзи та їх зв'язок з урожайністю зерна за різних способів поливу та вологозабезпеченості у посушливому Степу України / Аверчев О. В. та ін. // *Таврійський науковий вісник*. 2020. № 111. С. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.111.1>
4. Аверчев О. В., Іванів М. О., Лавриненко Ю. О. Мінливість елементів структури продуктивності у гібридів кукурудзи різних груп ФАО та їх зв'язок з урожайністю за різних способів поливу та вологозабезпеченості в посушливому Степу України // *Таврійський науковий вісник*. 2020. № 112. С. 3–15. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.112.1>
5. Аверчев О. В., Іванів М. О., Лавриненко Ю. О. Індекси врожайності та ефективної продуктивності у гібридів кукурудзи різних груп ФАО за різних способів поливу та вологозабезпеченості в посушливому Степу України // *Таврійський науковий вісник*. 2020. № 114. С. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.114.1>
6. Шатковський А. П., Журавльов О. В., Овчатов І. М. Режим зрошення та водоспоживання сої і кукурудзи залежно від способів зрошення // *Таврійський науковий вісник*. 2020. № 115. С. 262–229. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.115.39>
7. Овчатов І. М. Обґрунтування способів зрошення сої і кукурудзи в умовах Степу України : автореф. дис. ... канд. с.-г. наук : 06.01.02. Київ, 2021. 18 с.
8. Lamm F. R. Cotton, Tomato, Corn, and Onion Production with Subsurface Drip Irrigation // *A Review*. Trans. ASABE, 2016. Vol. 59(1). Pp. 263–278.
9. Colaizzi P. D., Evett S. R., Howell T. A. Crop emergence with alternative SDI designs in a Pullman clay loam soil. In Proc. 28th Annual Southern Conservation Systems Conf. Bushland, Tex.: USDA-ARS Conservation and Production Research Laboratory, 2006. Pp. 16–24.

10. Investigating strategies to improve crop germination when using SDI / Bordovsky, J. P. et al. // In Proc. 24th Ann. Central Plains Irrig. Conf. Colby, Kans. : Central Plains Irrigation Association, 2012. Pp. 117–132.
11. Evaluation of corn grain yield and water use efficiency using subsurface drip irrigation / Pablo R. G. et al. // *J. Sustain. Agric.*, 2007. 30(1), pp. 153–172, available at: http://dx.doi.org/10.1300/J064v30n01_10
12. Dukes M. D., Scholberg J. M. Soil moisture controlled subsurface drip irrigation on sandy soils // *Appl. Eng. Agric.*, 2005. 21(1), pp. 89–101, available at: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.17916>
13. Arbat, G., Lamm, F. R., Kheira, A. A. Abou. Subsurface drip irrigation emitter spacing effects on soil water redistribution, corn yield and water productivity // *Applied Engr. in Agric.* 2010. 26(3), pp. 391–399, available at: <http://www.ksre.ksu.edu/sdi/Reports/2010/ESpace10.pdf>
14. Subsurface drip irrigation: Past, present, and future / Camp C. R. et al // In Proc. 4th Decennial Natl. Irrig. Symp., St. Joseph, Mich. : ASAE, 2000, pp. 363–372.
15. Методичні рекомендації з проведення польових досліджень за краплинного зрошення / за редакцією М. І. Ромашенка. Київ : ІВПМ НААН, 2014. 46 с.
16. ДСТУ 7704:2015. Зрошення. Мікрозрошення. Терміни та визначення понять. [Чинний від 2016-08-01]. Вид. офіц. Київ, 2016. 16 с. (Національний стандарт України).

References

1. Camp, C. R., & Lamm, F. R. (2003). Irrigation Systems, Subsurface Drip. Encyclopedia Water Science. Marcel Dekker, New York, 560–564.
2. Lavrynenko, Yu. O., & Ivaniv, M. O. (2019). Produktivnist' ta adaptivna zdadnist' hibrydiv kukurudzy zalezno vid sposobiv polyvu i volohozabezpechennya v posushlyvomu Stepu Ukrayiny [Productivity and adaptive abilities of corn hybrids under different irrigation modes and moisture supply in the Arid Steppe of Ukraine]. *Zernovi kul'tury*, 3(2), 207–216. URL: <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0079>. [in Ukrainian]
3. Averchev, O. V., Ivaniv, M. O., Mykhalenko, I. V., & Lavrynenko, Yu. O. (2020) Biometrychni pokaznyky hibrydiv kukurudzy ta yikh zv'yazok z urozhaynistyu zerna za riznykh sposobiv polyvu ta volohozabezpechenosti u posushlyvomu Stepu Ukrayiny [The biometric indicators and productivity of maize hybrids under different irrigation modes and moisture supply in the Arid Steppe of Ukraine]. *Tavriys'kyi naukovyy visnyk*, 111, 3–13. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.111.1>. [in Ukrainian]
4. Averchev, O. V., Ivaniv, M. O., & Lavrynenko, Yu. O. (2020). Minlyvist' elementiv struktury produktyvnosti u hibrydiv kukurudzy riznykh hrup FAO ta yikh zv'yazok z urozhaynistyu za riznykh sposobiv polyvu ta volohozabezpechenosti v posushlyvomu Stepu Ukrayiny [Variability of productivity structure elements in corn hybrids of different FAO groups and their relationship with grain yield under different irrigation and moisture conditions in the Arid Steppe of Ukraine]. *Tavriys'kyi naukovyy visnyk*, 112, 3–15. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.112.1>. [in Ukrainian]
5. Averchev, O. V., Ivaniv, M. O., & Lavrynenko, Yu. O. (2020). Indeksy vrozhaynosti ta efektyvnoyi produktyvnosti u hibrydiv kukurudzy riznykh hrup FAO za riznykh sposobiv polyvu ta volohozabezpechenosti v posushlyvomu Stepu Ukrayiny [Indices of yield and effective productivity of maize hybrids of different FAO groups under different methods of irrigation and moisture supply in the Dry Steppe of Ukraine]. *Tavriys'kyi naukovyy visnyk*, 114, 3–13. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.114.1>. [in Ukrainian]
6. Shatkovs'kyi, A. P., Zhuravl'ov, O. V., & Ovchatov, I. M. (2020). Rezhym zroshennya ta vodospozhyvannya soyi i kukurudzy zalezno vid sposobiv zroshennya [Irrigation regimes and water consumption of soybeans and corn depending on irrigation methods]. *Tavriys'kyi naukovyy visnyk*, 115, 262–229. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.115.39>. [in Ukrainian]
7. Ovchatov, I. M. (2021). Obgruntuvannya sposobiv zroshennya soyi i kukurudzy v umovakh Stepu Ukrayiny [Substantiation of methods of irrigation of soybeans and corn in the conditions of the Steppe of Ukraine]. Extended abstract of candidate's thesis. Kyiv. [in Ukrainian]
8. Lamm, F. R. (2016). Cotton, Tomato, Corn, and Onion Production with Subsurface Drip Irrigation. *A Review*. Trans. ASABE, 59(1), 263–278.
9. Colaizzi, P. D., Evett, S. R., & Howell, T. A. (2006). Crop emergence with alternative SDI designs in a Pullman clay loam soil. In Proc. 28th Annual Southern Conservation Systems Conf. Bushland, Tex.: USDA-ARS Conservation and Production Research Laboratory, 16–24.

10. Bordovsky, J. P., Cranmer, A. M., Colaizzi, P. D., Lamm, F. R., Evett, S. R., & Howell, T. A. (2012). Investigating strategies to improve crop germination when using SDI. In Proc. 24th Ann. Central Plains Irrig. Conf. Colby, Kans.: Central Plains Irrigation Association, 117–132.
11. Pablo, R. G., O'Neill, M. K., McCastin, B. D., Remmenga, M. D., Keenan, J. G., & Onken, B. M. (2007). Evaluation of corn grain yield and water use efficiency using subsurface drip irrigation. *Journal of Sustainable Agriculture*, 30(1), 153–172. Retrieved from: http://dx.doi.org/10.1300/J064v30n01_10
12. Dukes, M. D., & Scholberg, J. M. (2005). Soil moisture controlled subsurface drip irrigation on sandy soils. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(1), 89–101. Retrieved from: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.17916>
13. Arbat, G., Lamm, F. R., & Kheira, A. A. (2010). Abou. Subsurface drip irrigation emitter spacing effects on soil water redistribution, corn yield and water productivity. *Applied Engineering in Agriculture*, 26(3), 391–399. Retrieved from: <http://www.ksre.ksu.edu/sdi/Reports/2010/ESpace10.pdf>
14. Camp, C. R., Lamm, F. R., Evans, R. G., & Phene, C. J. (2000). Subsurface drip irrigation: Past, present, and future, In Proc. 4th Decennial Natl. Irrig. Symp., St. Joseph, Mich. : ASAE, 363–372.
15. Romashchenko M. I. (2014). *Metodychni rekomendatsiyi z provedennya pol'ovykh doslidzhen' za kraplynnoho zroshennya* [Methodical recommendations for field research under drip irrigation]. Kyiv : IWPaLM NAAN. [in Ukrainian]
16. *Zroshennya. Mikrozhroshennya. Terminy ta vyznachennya ponyat'* [Irrigation. Microirrigation. Terms and definitions of concepts]. (2016). Natsionalnyi standart Ukrainy. Kyiv : Derzhspozhyvstandarty Ukrainy. [in Ukrainian]

**М.И. Ромашенко, А.П. Шатковский, А.С. Сардак, Ю.А. Черевичный,
Н.А. Диденко, О.А. Маринков**

Особенности формирования водного режима почвы и водопотребления кукурузы на подпочвенном капельном орошении

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований по изучению особенностей формирования водного режима почв, процессов водопотребления и урожайности кукурузы при различных схемах размещения поливных трубопроводов (ПТ) при подпочвенном капельном орошении (ПКО) в условиях Степи Украины. Зона увлажнения темно-каштановой остаточно-солонцеватой супесчаной почвы (ГП «ОХ «Брилевское») изменялась с увеличением нормы полива, при этом происходит смещение центра относительно капельницы в более глубокие горизонты почвенного профиля (до 52 см); слой почвы 0–15 см почти не увлажняется, независимо от нормы полива. При расстоянии ПТ 1,0 м смыкание зон увлажнения между ПТ происходит при норме полива 2,7 м³/100 п.м, а при расстоянии ПТ 1,4 м – не происходит даже при нормах полива 3,7 м³/100 п.м, при этом глубина увлажнения доходит до 90 см. Зона увлажнения чернозема осолодевшего супесчаного на лёссовой породе (ГП «ОХ «Великие Клины») при норме полива 2,7 м³/100 п.м наблюдалась на поверхности почвы. Максимальная глубина увлажнения при норме полива – 3,7 м³/100 п.м достигала 70 см с максимальным диаметром 79 см на глубине 25 см. Смыкания зон увлажнения между ПТ не наблюдалось. Исследованиями в ГП «ОХ «Брилевское» подтверждено, что глубина размещения ПТ (на поверхности почвы или на глубине 30 см) влияла на формирование водного режима почвы и урожайность кукурузы. Минимальное суммарное водопотребление составило 6271 м³/га при капельном орошении (КО) (ПТ 1,4 м), на 17% больше при ПКО (ПТ 1,4 м) и на 29% при ПКО (ПТ 1,0 м). Самый высокий показатель урожайности получен в варианте КО (ПТ 1,4 м) – 15,72 т/га. На ПКО (ПТ 1,0 м) получено 13,93 т/га, а на ПКО (ПТ 1,4 м) – 13,50 т/га. Расстояние между ПТ системы ПКО 1,0 м или 1,4 м не оказывало существенного влияния на урожайность кукурузы (13,93 и 13,50 т/га соответственно), но при расстоянии ПТ 1,4 м коэффициент водопотребления был на 6,8% меньше по сравнению с ПТ 1,0 м. Величина нормы орошения при ПКО (ПТ 1,0 м) была выше чем при ПКО (ПТ 1,0 м) на 13,6%. Следовательно, исходя из параметра расхода поливной воды и объема капитальных затрат, более экономически выгодной является система ПКО (ПТ 1,4 м). Исследования, проведенные в ГП «ОХ «Великие Клины», показывают, что глубина размещения ПТ (на поверхности почвы или на глубине 20 см) не влияла на урожайность кукурузы. На КО (ПТ 1,0 м) урожайность составляла 12,00 т/га, а на ПКО (ПТ 1,0 м) – 12,10 т/га, при этом коэффициент водопотребления – 533,8 м³/т, а при КО (ПТ 1,0 м) на 3,6% больше. Результаты исследований подтверждают важное значение параметров системы ПКО для формирования водного режима почв, реализации потенциала сортов и гибридов сельскохозяйственных культур на ПКО.

Ключевые слова: подпочвенное капельное орошение, кукуруза, водный режим почвы, зона увлажнения, поливные трубопроводы

M.I. Romashchenko, A.P. Shatkovskiy, A.S. Sardak, Y.A. Cherevichny,
N.A. Didenko, O.A. Marinkov

**Aspects of formation of soil water regime and water consumption of corn
under subsurface drip irrigation**

Abstract. *The results of experimental researches on studying of features of formation of a water mode of soils, water consumption processes, and corn yield under different schemes of irrigation pipelines (IP) under subsurface drip irrigation (SDI) in the Steppe of Ukraine. The wetting zone of dark-chestnut residual-saline sandy soil (SI "SF "Brylivske") changed. There is a shift of the center relative to the drip water outlet into deeper horizons of the soil profile (up to 52 cm) with the increasing norm; soil layer 0–15 cm is almost not moistened, regardless of watering rate. At a distance of IP 1,0 m closing of wetting zones, occur at irrigation rates of 2,7 m³/100 r. m, and at a distance of IP 1,4 m does not occur even at irrigation rates of 3,7 m³/100 r. m, while the depth of wetting reaches 90 cm. The wetting zone of chernozem sandy loam on the loess species (SI "SF "Velyki Klyny") with irrigation rates of 2,7 m³/100 r. m was observed on the soil surface. The maximum depth of wetting, with irrigation norms of 3,7 m³/100 r. m, reached 70 cm with a maximum diameter of 79 cm at a depth of 25 cm. Closing of wetting zones was not observed.*

Studies at SI "SF "Brylivske" have confirmed that the depth of IP placement (on the soil surface or at a depth of 30 cm) influenced the formation of the soil water regime and the corn yield. The minimum total water consumption was 6271 m³/ha under drip irrigation (DI) (IP 1,4 m), 17% more than SDI (IP 1,4 m), and 29% more than SDI (IP 1,0 m). The highest yield was obtained in the case of DI (IP 1,4 m) of 15,72 t/ha. SDI (IP 1,0 m) received 13,93 t/ha, and SDI (IP 1,4 m) received 13,50 t/ha.

The distance between the IP in 1,0 m and 1.4 m of the SDI system did not significantly affect corn yield (13.93 and 13.50 t/ha, respectively), but at a distance of IP 1.4 m, the water consumption ratio was 6.8% less compared to IP 1,0 m. The value of the irrigation rate in the variants SDI (IP 1.0 m) was higher than SDI (IP 1,4 m) by 13,6%. Therefore, in terms of irrigation water consumption and capital expenditures, the SDI (IP 1,4 m) is more economical.

Experimental studies conducted in the SI "SF "Velyki Klyny" show that the depth of placement of IP (on the soil surface or at a depth of 20 cm) did not affect the corn yield. For DI (IP 1,0 m) the yield was 12,00 t/ha and for SDI (IP 1.0 m) was 12,10 t/ha, with a water consumption ratio of 533,8 m³/t, and for DI (IP 1,0 m) by 3,6% more.

The research results confirm the importance of the parameters of SDI system for the formation of soil water regime and, accordingly, the realization of the potential of varieties and hybrids of crops for their cultivation by SDI.

Key words: subsurface drip irrigation, corn, soil water regime, wetting zone, irrigation pipeline

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-303>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/303>

УДК 618.3.621.395

НОВІ ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМ ВОДОПІДГОТОВКИ В СУЧАСНИХ УМОВАХ

Є.М. Мацелюк¹, канд. техн. наук, Д.В. Чарний², докт. техн. наук, В.Д. Левицька³,
С.В. Марисик⁴

¹Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0001-9960-6333>; e-mail: evgen1523@ukr.net;

²Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0001-6150-6433>; e-mail: dmitriych10@gmail.com;

³Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2213-1696>; e-mail: veral@ukr.net;

⁴Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
<https://orcid.org/0000-0002-0100-7787>; e-mail: sergsi.marisik@ukr.net

Анотація. Розглянуто сучасний стан формування якості води в поверхневих водоймах, які слугують джерелами питного водопостачання в басейні р. Дніпро. Проаналізовано основи діючих в Україні технологій підготовки води. Встановлено невідповідність даних технологій сучасній якості води в цих джерелах водопостачання, оскільки дана технологія не зовсім придатна для очищення води із значною органічною складовою будь-якого генезу. Виявлено, що одним із головних факторів, який формує якість води у водосховищах у теплий період, є фітопланктон, особливо в період «цвітіння» водосховищ. Показано супутні фактори, що супроводжують це явище, проаналізовано тренди розвитку та їх вплив на діючі системи водопідготовки. Розглянуто можливість застосування реагентів з ефектом окиснення органічної складової вихідної води, зокрема діоксиду хлору, застосування якого є ефективним при знезараженні хлор-резистентної мікробіоти, окисненні фенолів, а головне, в умовах очікуваного зростання концентрації мікоцистинів діоксид хлору може бути, за аналогією з озonom, доволі ефективним окисником цих токсинів та ще й з пролонгованим ефектом знезараження. Наведено можливі напрями розвитку систем водопідготовки шляхом інтенсифікації біо-фізико-хімічних процесів на базі існуючого типового ємнісного і корпусного обладнання водоочисних станцій. Встановлено перспективні в даних умовах напрями науково-технологічних розробок для обґрунтування ефективних рішень із модернізації існуючих водоочисних споруд, а саме: доцільно розглядати лише ті напрями, які забезпечують можливість очищення води з високою концентрацією фітопланктону без глобальної чи докорінної зміни технології водопідготовки. Тобто ці підходи мають максимально використовувати вже існуючі очисні споруди або шляхом їх реконструкції, або ж із використанням нових реагентів, чи поєднуючи обидва ці напрями.

Ключові слова: фітопланктон, технологія водопідготовки, біогенні речовини, реагенти, ζ -потенціал

Актуальність проблеми. Поширені в Україні технології очистки води з поверхневих джерел водопостачання розроблені в кінці XIX – на початку XX сторіччя. Їх теоретичним підґрунтям слугували доволі прогресивні, як для того часу, положення хімічної теорії коагуляції Дюкло і адсорбційної теорії коагуляції Фрейндліха, а також загальноприйнятої нині теорії ДЛФО (теорія стійкості ліофобних колоїдів Дерягіна, Ландау, Фервея, та Овербека). На основі цього теоретичного базису був визначений головний чинник технологічних процесів водопідготовки – коагулянт на основі солей алюмінію, який став найбільш розповсюдженим коагулянтом у світі з усіма своїми перевагами і недоліками.

Для знезараження природних вод дедалі поширенішим дезінфектантом стає гіпохлорит натрію. В нинішніх умовах антропогенних і кліматичних змін, що змінюють якість поверхневих вод, а саме – підвищення концентрації органічної складової забруднень води, такі коагулянти і дезінфектанти не в змозі забезпечити нормативну якість води. Виникає необхідність обґрунтування нових підходів до процесів водопідготовки, насамперед – при використанні поверхневих джерел водопостачання.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. В результаті аналізу проектних рішень, а також обстеження діючих станцій водопідготовки, виконаних ІВПіМ НААН (водоочисні

станції міст Горішні Плавні, Нікополь, Житомир, головні очисні споруди Західного, Іванівського групових водопроводів), встановлено: технологічний ланцюг – забір води з поверхневого джерела водопостачання, первинне хлорування, введення коагулянту, відстоювання (на окремих водопроводах ця ланка відсутня і відразу починається контактне фільтрування на так званих контактних прояснювачах), фільтрування і кінцеве знезараження за допомогою хлоргазу чи інших хлорвмісних реагентів є типовим для всіх водопроводів. Така система водопідготовки досить надійно працює з каламутними водами, тобто очищає воду від твердої неорганічної фази суспензії та захищає від збудників епідемій шлунково-кишкового тракту, подібних до спалахів дизентерії або холери. Але вже у випадку кольорових і слабокаламутних вод, особливо у холодну пору року з довготерміновим суцільним льодовим покривом, традиційно виникають складнощі при знебарвленні води. Особливо це відчувалось на водопровідних очисних станціях, вихідною водою для яких є води р. Дніпро і його притоків, а це питна вода для понад 70% населення України; кольоровість даних вод обумовлена фульватними сполуками. Тобто, вже при незначній органічній складовій ми починаємо стикатися з функціональною обмеженістю даної технології, особливо це відчувається у випадку відсутності відстійників. Відповідно, дана технологія не зовсім придатна до очищення води зі значною органічною складовою будь-якого генезу, а епізодичне суттєве зростання концентрацій органічної складової вимушено

приводить до використання понаднормових доз хлору і коагулянту. Майже так само непридатна така технологія і у випадку появи хлоррезистентних збудників інфекційних захворювань подібних до гепатиту або туберкульозу, у цьому разі ступінь епідемічної захищеності населення суттєво знижується. Загалом підвищені дози хлору, у поєднанні з органічною складовою вихідної води і залишковим алюмінієм, обумовлюють погіршення органолептичних показників та зростання концентрації хлорорганічних сполук (хлороформ, діхлорметан тощо) в очищеній воді. Стале споживання такої води провокує алергенні, канцерогенні та мутагенні захворювання.

Формування нової якості поверхневих вод. Нині ситуація ускладнюється тим, що під впливом кліматичних і антропогенних змін відбуваються докорінні зміни в якості і кількості води у водоймах України, одним із головних проявів чого є утворення фітопланктону, інтенсивному розвитку якого сприяють продукти сільськогосподарського і фармацевтичного виробництва, які потрапляють у водойми зі стічними водами.

Відповідно, скиди біогенних речовин і підвищення температурного фону утворили умови, при яких акваторії, особливо мілких рівнинних водосховищ, стали надзвичайно сприятливим середовищем для розвитку фітопланктону, головним чином ціанобактерій (синьо-зелених водоростей) [1–5]. При цьому спостерігається процес нарощування біомаси ціан за експоненціальним законом (рис. 1).

Враховуючи характер нарощування біомаси, є підстави стверджувати, що вона

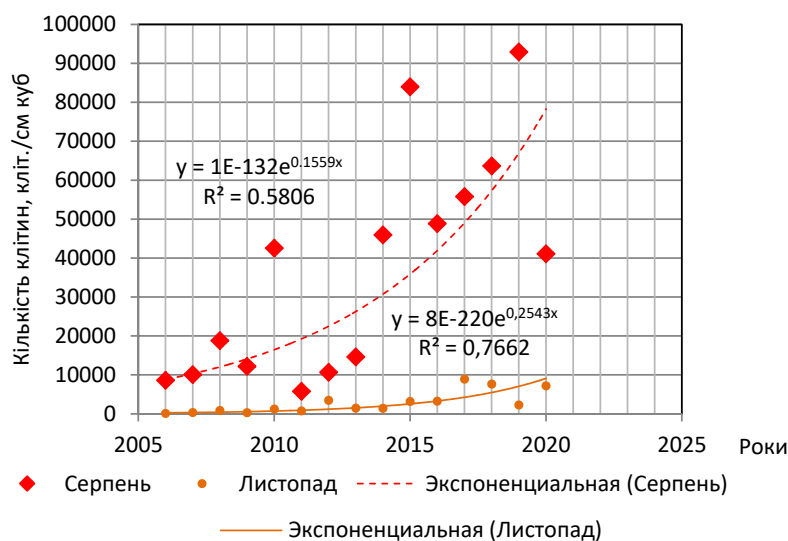


Рис. 1. Характер зміни кількості біомаси фітопланктону в період серпень, листопад 2006–2020 рр. Дніпровського водозабору м. Києва

на сьогодні вже досягає як мінімум десяти мільйонів тонн, і це лише у Кременчуцькому водосховищі.

Новим додатковим чинником, який негативно впливає на якість води, стало те, що збільшення сукупної біомаси ціан спонукає їх видове різноманіття, а це призводить до внутрішньовидової конкурентної боротьби, засобом якої є мікроцистини – токсини з гепатогенною і алергенною дією. Мікроцистини – або ціаногінозини – це токсини, що виробляються ціанобактеріями, насамперед *Microcystis aeruginosa* та іншими *Microcystis*, а також членами родів *Планкототрікс*, *Анабаена*, *Осцилаторії* і *Носток*. Ці токсини також є доволі стійкими при їх обробці за допомогою хлорвмісних реагентів.

Також простежується систематичність у періодах коливань інтенсивності розвитку біомаси фітопланктону.

Фактично ми перебуваємо на порозі ситуації, коли через 5–7 років відбудеться суттєве погіршення води в поверхневих джерелах водопостачання, а поширені у нас технології водопідготовки є недосконалими перед навалюючим фітопланктоном. Відповідно, слід провести ретельний аналіз можливих заходів, які будуть здатні покращити цю ситуацію.

Нові підходи і технологічні рішення при водопідготовці. На наш погляд доцільно розглядати лише ті напрями, які забезпечують можливість очищення води з високою концентрацією фітопланктону без глобальної чи докорінної зміни технології водопідготовки. Тобто ці підходи мають максимально використовувати вже існуючі очисні споруди шляхом їх реконструкції, або ж з використанням нових реагентів, чи поєднуючи обидва ці напрями.

Це стало можливим через такі обставини: за останні 30 років відбулося суттєве зменшення обсягів водоспоживання, приблизно на 60–70%, а площі і об'єми технологічних споруд залишилися ті самі, тобто вони і зараз розраховані на попередні витрати. Відповідно, ми маємо можливість на базі цих споруд розгорнути дещо інші технологічні ланцюги водопідготовки, які зможуть поєднати все краще, що існує як в технологіях фізико-хімічної, так і біологічної обробки води. Масове поширення біологічних технологій чи їх комбінації з фізико-хімічними технологіями стримувалось необхідним часом контакту або швидкістю фільтрації і, відповідно, значними розмірами споруд. Наразі ми фактично маємо необхідні параметри і зараз є ще час, коли можливо визначити оптимальні

напрями реконструкції діючих споруд, а необхідність реконструкції обумовлена не лише невідповідністю очисних споруд якості води у джерелах водопостачання, а і тим, що переважна частина цих споруд вже відпрацювала свій проектний термін.

Розраховувати лише на якийсь один окремо взятий реагент, який дозволить вирішити питання якості води, на наш погляд, є дуже сумнівним. Зараз значна маса живої органіки на вході викликає, в першу чергу, бажання знайти заміну хлору в операції з первинного хлорування і використати його для її первинного окиснення з одночасним недопущенням утворення хлорорганічних сполук, знебарвленням води і нейтралізацією запаху. Існує такий реагент – діоксид хлору. Так, він дійсно не утворює хлорорганічних сполук і поліпшує органолептичні показники оброблюваної води, а при середніх показниках органіки його застосування є більш економічним ніж застосування хлоргазу чи гіпохлориту натрію. Такі привабливі перспективи використання даного реагенту можливо пояснити, виходячи з механізму його дії. Діоксид хлору – неорганічна сполука хлору і кисню з формулою ClO_2 . Якщо застосувати принцип аналогії і розглядати механізм окиснення ClO_2 , приймаючи за основу його головну діючу речовину – атомарний кисень O , то аналогами за діючою речовиною будуть озон O_3 , а також чогось подібного можливо очікувати і від застосування перекису водню H_2O_2 , але ні озон, ні перекис водню не мають серед своїх властивостей – післядії ефекту знезараження.

Виходячи з діючої речовини, стає зрозумілим, чому не утворюються хлорорганічні сполуки у випадку застосування ClO_2 , а також чому замість них слід очікувати появу підвищених концентрацій різноманітних альдегідів, кетонів, ацетонів і тому подібних сполук. Це підтверджується і тим, що після застосування O_3 зазвичай використовують адсорбційну обробку води за допомогою активованого вугілля. До того ж і саму обробку озонуванням не застосовують у якості первинного окиснювача поверхневих вод. Також слід врахувати, що застосування ClO_2 при збільшених концентраціях органічної складової вихідної води буде викликати зростання концентрації хлоритів понад нормативні значення. Підвищені концентрації органічних сполук обумовляють додаткові витрати реагентів на синтез ClO_2 , а це спричинить зменшення економічної ефективності його використання. Але, з іншого боку, застосування ClO_2 є доволі ефективним при знезараженні

хлор-резистентної мікробіоти, окисненні фенолів, а головне, в умовах очікуваного зростання концентрації мікоцистинів, ClO_2 може бути за аналогією з O_3 [6–8] доволі ефективним окисником цих токсинів та ще й з пролонгованим ефектом знезараження.

Наразі ми маємо перспективний реагент, який необхідно грамотно вбудувати в діючий технологічний ланцюг в умовах надзвичайно швидкозростаючого навантаження за фітопланктоном. Тобто вже зараз зрозуміло, що пряме попереднє введення ClO_2 може призвести до дискредитації цього доволі універсального реагенту. Одночасно застосування його після суттєвого зниження концентрації фітопланктону дозволить значно поліпшити якість води і полегшить роботу наступних технологічних процесів.

Фактично ми приходимо до необхідності недопущення чи вилучення значних мас фітопланктону (ціан) перед введенням ClO_2 . Звідси впливає декілька можливих шляхів:

1. Фітопланктон має особливість – його концентрація в одному місці акваторії доволі мінлива, вона постійно змінюється як по глибині, так і по площі. Тобто при постійному моніторингу можливо відбирати воду у період зменшення кількості фітопланктону в районі водозабірних отворів. Це тим більше можливо, якщо врахувати зменшення водоспоживання і наявні об'єми РЧВ та відстійників. Тобто одним з найдешевших шляхів зменшення концентрації фітопланктону у вихідній воді, яка надходить на очисні споруди, є цілодобовий щогодинний моніторинг кількості фітопланктону. Він може провадитись за допомогою автоматичного програмно-апаратного комплексу, розташованого в районі водозабору. Вітчизняні розробки в цьому напрямку вже ведуться [9–12]. Існують і закордонні аналоги, наприклад проточний цитометр і аналізатор частинок FlowCam корпорації Fluid Imaging Technologies [13]. Відповідно забір води чи його зупинка буде визначатись як потребами споживачів, так і концентраціями фітопланктону в районі водозабірних споруд на момент відбору.

2. Логічними є напрями по фізичному недопущенню фітопланктону у технологічний ланцюг водопідготовки, чи хоча б його затримання на перших ланках. Затримка біомаси фітопланктону можлива як за рахунок різноманітних систем фільтрації в «голові» очисних споруд, так і на самих водозабірних спорудах, можливо, з використанням різноманітних захисних споруд навколо місць водозабору. Вони можуть працювати, наприклад,

за рахунок інфільтрації або інших процесів. У випадку прийняття рішення про затримання фітопланктону на перших ланках очисних споруд можливе застосування специфічних реагентів, здатних активно коагулювати саме біомаси фітопланктону. Але тут виникають специфічні вимоги до цього реагенту: крім ефективної коагуляції фітопланктону він повинен запобігати вторинному забрудненню води у відстійниках. Ці маси фітопланктону мають бути не допущені у відстійники та видалені на рівні камер утворення пластівців, або ж цей коагулянт має завадити процесам посмертального розпаду і гниття зкоагульованих мас фітопланктону. Наразі промислові коагулянти з подібними властивостями нам невідомі, існують лише окремі відомості про експериментальні лабораторні дослідження з вапнування мас фітопланктону за рахунок введення в них сполук кальцію у вигляді наночастинок, ці дослідження мають обнадійливий характер, але сам матеріал, як і всякий наноматеріал, є досить дороговартісним.

Для вилучення фітопланктону шляхом фільтрації потрібен специфічний фільтрувальний матеріал із двома суперечливими вимогами: з одного боку, він має активно адсорбувати на себе фітопланктон, а з іншого – цей матеріал має легко скидати затриманий фітопланктон, процес регенерації такого матеріалу має бути простим і невитратним. Прикладом такого процесу регенерації є зворотня промивка зернистих фільтрів. Такий фільтрувальний матеріал може бути використаний як матеріал для попередніх фільтрів, які можуть вирішувати декілька завдань і бути розміщеними:

1. В районі водозабору НС-1 на напірному колекторі у вигляді фільтрів, подібних до фільтра [14].

2. Також можливе включення первинних фільтрів як складової частини водозаборів, наприклад як своєрідного фільтруючого водозабору, розміщеного в аванкамері насосних станцій [15] або у водозабірних оголовках [16].

3. У камерах утворення пластівців із використанням цих фільтрів як для затримки фітопланктону, так і як контактних фільтрів для прискорення процесу коагуляції [17].

Попередні дослідження з визначення фільтрувального матеріалу свідчать про доволі високу ефективність використання в якості подібного фільтрувального завантаження спінених гранул пінополістиролу.

Нами були проведені дослідження у 2020 р. на водозабірній КП «Житомирводоканал» р. Тетерів, водосховище «Відсічне», а перед тим подібні дослідження проводили на базі

Дніпровського водозабору ПрАТ «АК «Київводоканал»» у 2013 році.

В результаті цих дослідів було встановлено, що фільтрувальне завантаження зі спінених гранул пінополістиролу, яким був завантажений первинний фільтр, є перспективним матеріалом. Воно суттєво знижує вміст фітопланктону навіть при великих швидкостях фільтрування у 20–50 м/год. Ефективність очистки на таких швидкостях становила 50 і більше відсотків. Завантаження досить легко регенерувалось шляхом зворотної промивки. Інтенсивність промивки перебувала в межах 10–14 л/с·м².

Наразі можемо стверджувати, що нам вдалось встановити механізм дії із затримання фітопланктону пінополістиролом. Він полягає в поєднанні фізичних властивостей матеріалу і біологічних особливостей ціан. Головними чинниками ми вважаємо різницю зарядів ζ -потенціал конгломератів ціан $-13 \pm 4,29$ mV і поверхні гранул пінополістиролу $+2,1 \pm 0,4$ mV [2], а також схильність ціан до іммобілізації на твердих і рівних поверхнях.

Нами розроблено гіпотезу, що пояснює «спорідненість» пінополістирольних гранул і конгломератів ціанобактерій (рис. 2).

Процес роботи пінополістирольного фільтра при затримці фітопланктону (найбільше ціанобактерій) наведено на схемі (рис. 3).

Процес затримки ціанобактерій у фільтрі з пінополістирольним фільтрувальним завантаженням такий:

1. Адсорбція конгломератів ціанобактерій на нижньому шарі фільтрувального завантаження за рахунок різниці ζ -потенціалів: -13 mV ціанобактерій і $+2,5$ mV гранул пінополістиролу.

2. Подальша іммобілізація ціанобактерій на поверхні гранул за рахунок «біоклею».

3. Утворення суцільної оболонки з біоплівки на поверхні гранул пінополістиролу та зміна ζ -потенціалу поверхні гранули з $+$ на $-$, одночасно початок кольматації міжпорового простору нижнього шару фільтрувального завантаження фільтра.

4. Формування крупних об'єднань ціанобактерій в міжгранульному просторі з поступовим їх винесенням до верхнього (чистого) шару фільтрувального завантаження і початок нового циклу адсорбції на поверхні гранул пінополістиролу.

5. Поступовий процес адсорбції і кольматації всього фільтрувального завантаження фільтра по всій висоті.

6. Процес виносу ціанобактерій в надфільтровий простір із чистою водою і початок відмирання і розпаду ціанобактерій в товщі фільтра та початок вторинного забруднення фільтрату.

7. Промивка фільтра, в результаті якої відновлюється позитивний ζ -потенціал поверхні гранул. В процесі зворотної промивки за рахунок механічного тертя гранул порушуються зв'язки, що обумовлюють фізичну адсорбцію, і надлишок біоплівки виноситься з промивною водою.

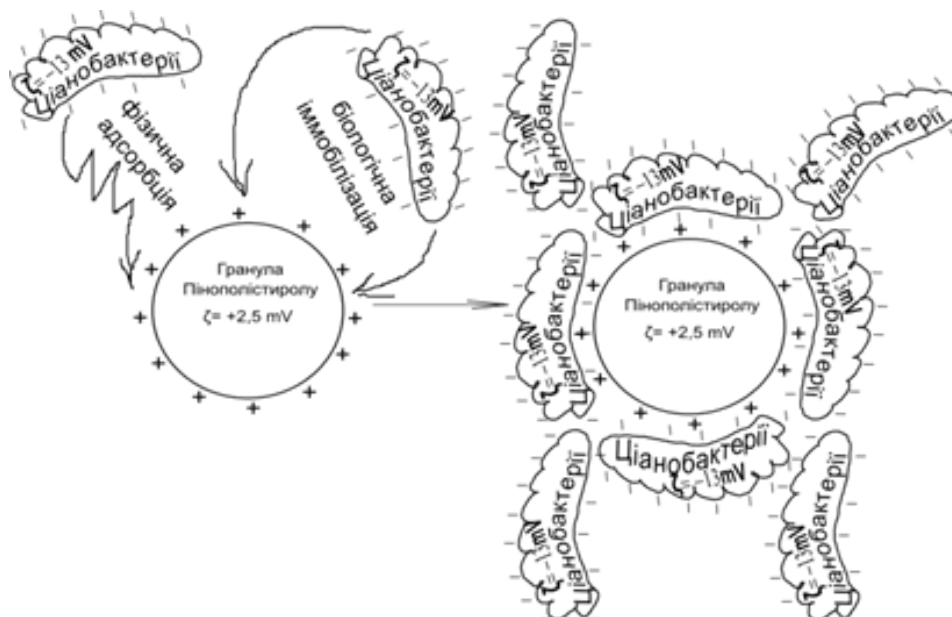


Рис. 2. Спрощена схема затримання ціанобактерій із врахуванням ζ потенціалів, фізичної адсорбції і біологічної іммобілізації з утворенням на поверхні гранул біоплівки

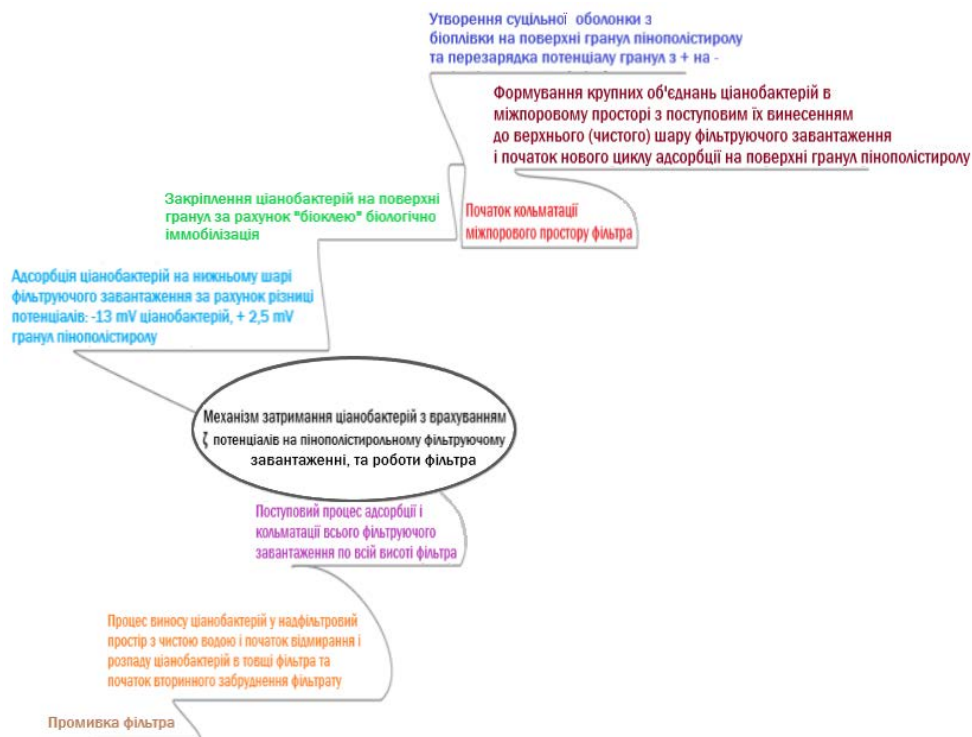


Рис. 3. Процес затримання фітопланктону за допомогою пінополістирольного фільтрувального завантаження

Перспективи подальших досліджень. Для встановлення всіх можливих технічних рішень щодо ефективного затримання фітопланктону необхідно провести низку додаткових досліджень, включно із цілорічною роботою моделей фільтрів із пінополістирольним завантаженням, як попередніх у створі водозабору, так і з моделюванням їх роботи в якості контактних фільтрів поряд із камерами утворення пластівців. Доцільно перевірити роботу інших фільтрувальних матеріалів, чи спробувати розробити новий матеріал зі змінним зарядом ζ -потенціалу $- +/ -$. Необхідною також є програма досліджень із натурного моделювання роботи інфільтраційних споруд захисту водозаборів.

Висновки. Сформульована і підтверджена гіпотеза щодо механізму дії із затримання фітопланктону пінополістиролом. Він полягає в поєднанні фізичних властивостей фільтрувального матеріалу і біологічних властивостей ціан. Головним чинником є різниця зарядів ζ -потенціалів ціан і поверхні гранул пінополістиролу. Встановлено, що пінополістирольне завантаження є ефективним при швидкості фільтрування до $V_f=50$ м/год. Отримані результати досліджень властивостей і ефективності роботи пінополістирольних фільтрів дозволили визначитись з основними напрямками вирішення проблеми очищення води від фітопланктону.

Бібліографія

1. Слободник Я., Алігізакіс Н., Освальд П. Скринінговий моніторинг річкового басейну Дніпра. Київ : Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України; Державне агентство водних ресурсів України; Водна Ініціатива Плюс Європейського Союзу для країн Східного партнерства (EUWI+). Відень : Umweltbundesamt GmbH; Париж : Office International de l'Eau (IOW), 2021. 34 с.
2. Greven A. C. Polycarbonate and polystyrene nanoparticles act as stressors to the innate immune system of fathead minnows (pimephales promelas, rafinesque 1820) Dissertation, LMU, Faculty of Veterinary Medicine. München, 2016. 112 p.
3. Вишневський В. І., Лопата Л. М. «Цвітіння» води на водозборі дніпровської водопровідної станції. *Меліорація і водне господарство*. 2016. № 104. С. 31–35.
4. Влияние антропогенного загрязнения на фитопланктон Каневского водохранилища (Украина): сравнение размерных спектров. Каменир Ю. и др. *Альгология*. 2008. Vol. 18, № 2. С. 149–159.

5. Єльнікова Т. О., Подчашинський Ю. О. Моделювання евтрофних процесів у водосховищах річки Тетерів Житомирської області на основі відеозображень проб води. *Вісник ЖДТУ*. 2015. № 3(74). С. 54–59.
6. Health and Ecological Criteria Division Drinking water health advisory for the cyanobacterial microcystin toxins. Washington, DC : U.S. Environmental Protection Agency Office of Water (4304T), 2015. 75 p.
7. Cyanobacterial toxins: microcystin-Lr in drinking-water. Geneva : World Health Organization, 2003. 14 p.
8. Chorus I., Bartram J. Toxic cyanobacteria in water: a guide to public health significance, monitoring and management. London : Für WHO durch E & FN Spon / Chapman & Hall, 1999. 416 p.
9. Безвесільна О. М., Подчашинський Ю. О. Алгоритмічна обробка двовимірної інформації про механічні величини на основі штучних нейронних мереж. *Вісник ЖДТУ*. 2010. № 2. С. 44–49.
10. Єльнікова Т. О., Коцюба І. Г. Автоматизована система контролю параметрів розвитку фітопланктону у водоймах. *Вісник ЖДТУ*. 2016. № 3(78). С. 143–149.
11. Єльнікова Т. О. Автоматизована система для вимірювання геометричних параметрів фітопланктону. *Вісник ЖДТУ*. 2009. № 1(48). С. 160–164.
12. Єльнікова Т. О. Методика розрахунку точності вимірювань геометричних параметрів фітопланктону за його відеозображеннями. *Вісник ЖДТУ*. 2008. № 4(47). С. 247–252.
13. Fluid Imaging Technologies FlowCam® for harmful algal bloom monitoring. Fluid Imaging Technologies. 2021. URL: <https://www.fluidimaging.com>
14. Фільтр напірний: пат. 147043 Україна: МПК6 B01D 29/00, C02F 1/46. № 202006892; заявл. 27.10.20; опубл. 08.04.21. Бюл. № 7. 5 с.
15. Береговий фільтрувальний водозабір: пат. 143655 Україна: МПК6 B01D 29/00, E03B 3/00. № 202000766; заявл. 10.02.20; опубл. 10.08.20. Бюл. № 15. 5 с.
16. Водозабірний оголовок: пат. 103076 Україна: МПК6 E02B 9/04, E03B3/32. № 201406915; заявл. 20.06.14; опубл. 10.12.15. Бюл. № 23. 4 с.
17. Спосіб підвищення ефективності роботи існуючих типових водопровідних очисних споруд: пат. 128460 Україна: МПК6 C02F 1/64, B01D24/00. № 201711509; заявл. 24.11.17; опубл. 25.09.18. Бюл. 18. 5 с.

References

1. Slobodnyk, Ya. Aligizakis, N., & Osvald P. (2021). Skrynihovyy monitoring richkovogo baseyny Dnipra [Screening monitoring of the Dnieper river basin.] Kyiv : Ministerstvo zakhystu dovkillya ta pryrodnykh resursiv Ukrainy; Derzhavne ahentstvo vodnykh resursiv Ukrainy. Vodna Initsiatyva Plyus Yevropeyskoho Soyuzu dlya krayin Skhidnoho partnerstva (EUWI+). Viden : Umweltbundesamt GmbH. Paryzh : Office International de l'Eau (IOW). [in Ukrainian]
2. Greven, A. C. (2016). Polycarbonate and polystyrene nanoparticles act as stressors to the innate immune system of fathead minnows (*pimephales promelas*, rafinesque 1820). Candidate's thesis. München : LMU München. [in English]
3. Vyshnevskyy, V. I., & Lopata, L. M. (2016). Tsvitinnya vody na vodozabori dniprovs'koyi vodoprovodnoyi stantsiyi [Flowering of water at the water intake of the Dnieper water supply station]. *Melioratsiya i vodne hospodarstvo*, 104, 31–35. [in Ukrainian]
4. Kamenir, Yu., Mikhaylyuk, T. I., & Popova, A. F. (2008). Vliyaniye antropogennogo zagryazneniya na fitoplankton Kanevskogo vodokhranilishcha (Ukraina). sravneniye razmernykh spektrov [The effect of anthropogenic pollution on phytoplankton of the Kanev reservoir (Ukraine). comparison of dimensional spectra] *Algologiya*, Vol. 18, 2. [in Russian]
5. Yelnikova, T. O., & Podchashynskyy, Yu. O. (2015). Modelyuvannya evtrofnykh protsesiv u vodoskhovyshchakh richky Teteriv Zhytomyrskoyi oblasti na osnovi videozobrazhen prob vody. [Modeling of eutrophic processes in the reservoirs of the river Teteriv, Zhytomyr region on the basis of video images of water samples.] *Visnyk ZHDTU*, 3(74), 54–59. [in Ukrainian]
6. Health and Ecological Criteria Division Drinking water health advisory for the cyanobacterial microcystin toxins. (2015). Washington : U.S. Environmental Protection Agency Office of Water. [in English]
7. Cyanobacterial toxins: microcystin-Lr in drinking-water. (2003). Geneva : World Health Organization. [in English]
8. Chorus, I., & Bartram, J. (1999). Toxic cyanobacteria in water: a guide to public health significance, monitoring and management. London : Für WHO durch E & FN Spon. Chapman & Hall. [in English]

9. Bezvesilna, O. M., & Podchashynskyy, Yu. O. (2010). Alhorytmichna obrobka dvovymirnoyi informatsiyi pro mekhanichni velychyny na osnovi sztuchnykh neyronnykh merezh [Algorithmic processing of two-dimensional information about mechanical quantities on the basis of artificial neural networks]. *Visnyk ZHDTU*, № 2, 44–49. [in Ukrainian]
10. Yelnikova, T. O., & Kotsyuba, I. G. (2016). Avtomatyzovana systema kontrolyu parametriv rozvytku fitoplanktonu u vodoymakh [Automated control system for phytoplankton development parameters in reservoirs]. *Visnyk ZHDTU*, 3(78), 143–149. [in Ukrainian]
11. Yelnikova, T. O. (2009). Avtomatyzovana systema dlya vymiryuvannya heometrychnykh parametriv fitoplanktonu [Automated system for measuring geometric parameters of phytoplankton]. *Visnyk ZHDTU*, 1(48), 160–164. [in Ukrainian]
12. Yelnikova, T. O. (2008). V Metodyka rozrakhunku tochnosti vymiryuvan heometrychnykh parametriv fitoplanktonu za yoho video zobrazhennyamy [Method of calculating the accuracy of measurements of geometric parameters of phytoplankton on its video images]. *Visnyk ZHDTU*, 4(47), 247–252. [in Ukrainian]
13. Fluid Imaging Technologies FlowCam® for harmful algal bloom monitoring. (2021). Fluid Imaging Technologies. Retrieved from: <https://www.fluidimaging.com>
14. Charnyy, D. V., Zabulonov, Y. L., Dolin, V. V., Matselyuk, Ye. M., & Onanko, Yu. A. (2021). Filtr napirnyy. [The pressure filter]. Patent of Ukraine 147043. [in Ukrainian]
15. Charnyy, D. V., Zabulonov, Yu. L., Dolin, V. V., Matselyuk, Ye. M., & Onanko Yu. A. (2020). Berehovyy filtrualnyy vodozabir. [Coastal filter water intake]. Patent of Ukraine 143655. [in Ukrainian]
16. Vodozabirnyy oholovok. (2015) [Water intake head]. Patent of Ukraine 103076. [in Ukrainian]
17. Khoruzhyy, P. D., Charnyy, D. V., Matselyuk, Ye. M., Haydabura, M. O., & Kharchenko, M. Yu (2018). Sposib pidvyshchennya efektyvnosti roboty isnuyuchykh typovykh vodoprovodnykh ochysnykh sporud. [A method of improving the efficiency of existing typical water treatment plants]. Patent of Ukraine 128460. [in Ukrainian]

Е.М. Мацелюк, Д.В. Чарный, В.Д. Левицкая, С.В. Марысык
Новые технологические решения для систем водоподготовки
в современных условиях

***Аннотация.** Рассмотрено современное состояние формирования качества воды в поверхностных водоемах, которые служат источниками питьевого водоснабжения в бассейне р. Днепр. Проанализированы основы действующей у нас технологии подготовки воды. Установлено несоответствие данных технологий современному качеству воды в этих источниках водоснабжения. Выявлено, что одним из главных факторов, который формирует качество воды в водохранилищах в теплый период, становится фитопланктон, особенно в период «цветения» водохранилищ. Показаны сопутствующие факторы, сопровождающие это явление, проанализированы тренды развития и их влияние на действующие системы водоподготовки. Рассмотрена возможность применения реагентов с эффектом окисления органической составляющей исходной воды, в том числе диоксида хлора. Приведены возможные направления развития систем водоподготовки путем интенсификации био-физико-химических процессов на базе существующего типового емкостного и корпусного оборудования водоочистных станций. Установлены перспективные в данных условиях направления научно-технологических разработок для обоснования эффективных решений по модернизации водоочистных сооружений. То есть эти подходы должны максимально использовать уже существующие сооружения водоочистки путем их реконструкции или же с использованием новых реагентов или соединяя оба направления.*

***Ключевые слова:** фитопланктон, технология водоподготовки, биогенные вещества, реагенты, ζ-потенциал.*

Ye.M. Matseluk, D.V. Charnyy, V.D. Levytska, S.V. Marysyk
New technological solutions for water treatment systems in modern conditions

***Abstract.** The current state of water quality formation in surface water bodies, which serve as sources of drinking water supply in the Dnieper river basin, was considered. The water treatment technologies currently used in Ukraine, were analyzed. The inconsistency of these technologies with the current water quality in these sources of water supply was established, as these technologies are not quite suitable for the purification of water with a significant organic component of any genesis. It was found that one of the main factors that influences the quality of water in water bodies in the warm period is phytoplankton, especially during their «flowering. The factors accompanying this phenomenon were shown, the development trends and their influence on the operating water treatment systems were analyzed. It was considered the*

feasibility of using reagents with the effect of oxidation of the organic component of the source water, in particular chlorine dioxide, the use of which is effective in disinfection of chlorine-resistant microbiota and phenols oxidations. Moreover, in the conditions of the expected increase in the concentration of mycrocystins, chlorine dioxide can be, by analogy with ozone, a fairly effective oxidant of these toxins with a prolonged disinfection effect.

The potential development areas of water treatment systems by intensifying bio-physico-chemical processes on the basis of the existing typical capacitive and package units of water treatment plants are given. The perspective areas of scientific and technological developments for substantiation of effective solutions on modernization of existing water treatment facilities were established in these conditions, namely it is reasonable to consider only those solutions, which provide effective purification of water with high concentration of phytoplankton without comprehensive or radical change of water treatment technology. That is, these approaches should make maximum use of existing treatment facilities, either by their reconstruction, or with the use of new reagents, or a combination of both.

Key words: *phytoplankton, water treatment technology, biogenic matters, reagents, ζ -potential.*

ЗМІСТ

ГІДРОЛОГІЯ

- Саад Омер Т.З., Ахмед С.Е., Карімі А.**
Оптимальна експлуатація каскаду багатоцільових водосховищ на прикладі водосховищ Розейрез та Сеннар.....5
- Ромащенко М.І., Коломієць С.С., Сардак А.С.**
Метаморфізація зонального гідрохімічного складу поверхневих і підземних вод України під впливом антропогенних і природних чинників.....24
- Ковальчук П.І., Демчук О.С., Ковальчук В.П., Балихіна Г.А.**
Комбінована система екстремального управління розбавленням мінералізованих вод у басейнах річок33

ВОДНІ РЕСУРСИ

- Чарний Д.В., Мацелюк Є.М., Левицька В.Д., Марисик С.В., Чернова Н.М.**
Особливості формування якості води поверхневих джерел водопостачання як чинник вибору методу водопідготовки.....45
- Зоріна О.В., Маврикін Є.О.**
Сучасні підходи до обробки та утилізації вторинних осадів господарсько-побутових стічних вод.....55
- Шевчук С.А., Зоріна О.В., Шевченко А.М., Козицький О.М., Маврикін Є.О.**
Оцінювання впливу Вирівського гранітного кар'єру на стан поверхневих і ґрунтових вод у межах села Вири.....69

АГРОРЕСУРСИ

- Діденко Н.О., Мосійчук Я.Б., Зосимчук М.Д., Харитонов М.М., Бабенко М.Г., Мазуренко Б.О., Лавренко С.О., Рахман А.М., Іслам К.Р.**
Використання біосолідів для покращення якості маргінальних земель та виробництва біоенергетичної сировини в Україні.....79
- Тараріко Ю.О., Сайдак Р.В., Оленір Р.В., Сорока Ю.В., Вітвіцький С.В.**
Потенціал біопродуктивності чорнозему типового в Лівобережному Лісостепу України за сприятливих умов зволоження.....87
- Коломієць С.С., Білоброва А.С., Віршовка В.М., Тарасенко Т.В.**
Порівняльний аналіз профільної мінливості водно-фізичних властивостей чорнозему при довготривалому застосуванні оранки та no-till технологій (на прикладі Панфільської дослідної станції).....101
- Яцюк М.В., Шевченко А.М., Боженко Р.П., Лютницький С.М.**
Вплив мулових полів Бортницької станції аерації на екологічний стан земельних і водних ресурсів прилеглих територій.....114
- Білий В.М., Книш В.В.**
Вплив препаратів біохімічного та мікробіологічного походження на продуктивність кукурудзи на зерно за краплинного зрошення.....129
- Мороз В.В., Никитюк Ю.А.**
Сучасний стан соснових насаджень Київського Полісся за впливу екологічних чинників139

ЗРОШЕННЯ – ОСУШЕННЯ

Ромашенко М.І., Сайдак Р.В., Матяш Т.В., Яцюк М.В. Ефективність зрошення залежно від вартості води.....	150
Дудченко К.В., Петренко Т.М., Флінта О.І., Дацюк М.М. Вплив режиму зрошення рису на окисно-відновний режим ґрунту.....	160
Шатковський А.П., Приведенюк Н.В., Глушенко Л.А. Ефективність агротехнологічних прийомів вирощування лікарських культур на зрошенні.....	166
Ромашенко М.І., Конаков Б.І., Поліщук В.В., Усатий С.В. Електрохімічно активована вода (ЕХАВ): історія відкриття, специфіка процесу, сучасний стан та перспективи її застосування при зрошенні.....	177
Ромашенко М.І., Шатковський А.П., Сардак А.С., Черевичний Ю.О., Діденко Н.О., Марінков О.А. Особливості формування водного режиму ґрунту та водоспоживання кукурудзи за підґрунтового краплинного зрошення.....	190

ГІДРОТЕХНІКА

Мацелюк Є.М., Чарний Д.В., Левицька В.Д., Марисик С.В. Нові технологічні рішення для систем водопідготовки в сучасних умовах	201
---	-----

CONTENTS

HYDROLOGY

- Saad Omer T.Z., Ahmed S.E., Karimi A.**
Optimal Operation of Multipurpose Reservoirs in Series:
Roseires and Sennar Case Study.....5
- Romashchenko M.I., Kolomiyets' S.S., Sardak A.S.**
Metamorphization of zonal hydrochemical composition of surface and groundwater
of Ukraine under the influence of anthropogenic and natural factors.....24
- Kovalchuk P.I., Demchuk O.S., Kovalchuk V.P., Balykhina H.A.**
Combined system of extreme control of mineralized water dilution in river basins..... 33

WATER RESOURCES

- Charnyy D.V., Matseluk Ye.M., Levytska V.D.,
Marysyk S.V., Chernova N.M.**
Peculiarities of formation of water quality of surface sources of water supply
as a factor of a choice of a method of water treatment.....45
- Zorina O.V., Mavrykin Y.O.**
Modern approaches to treatment and recovery of secondary sludge
of domestic sewage..... 55
- Shevchuk S.A., Zorina O.V., Shevchenko A.M.,
Kozytsky O.M., Mavrykin Y.O.**
Assessment of the influence of the Viriva granite quarry on the condition
of the surface and ground waters within the Vyry village69

AGRO RESOURCES

- Didenko N.O., Mosiichuk Y.B., Zosymchuk M.D., Kharytonov M.M.,
Babenko M.G., Mazurenko B.O. , Lavrenko S.O., Rahman M.A., Islam K.R.**
Recycling biosolids to improve marginal lands for bioenergy feedstock
production in Ukraine79
- Tararico Yu.O., Saidak R.V., Olepir R.V.,
Soroka Yu.V., Vitvitskiy S.V.**
Bioproductive capacity of typical chernozem in the Left-Bank Forest-Steppe
of Ukraine under favorable humid conditions.....87
- Kolomiets S.S., Bilobrova A.S., Vyr'ovka V.M., Tarasenko T.V.**
Comparative analysis of the profile variability of black soil water-physical properties
when long-term applying plowing and no-till technologies use
(the case of Panfily Research Station).....101
- Yatsiuk M.V., Shevchenko A.M., Bozhenko R.P., Lyutnitsky S.M.**
The effects of silt fields of Bortnytska aeration station on ecological state of land
and water in the adjacent areas.....114
- Bilyi V.M., Knysh V.V.**
Influence of preparations of biochemical and microbiological origin on the yield
of corn for grain on drip irrigation.....129
- Moroz V.V., Nykytyuk Yu.A.**
Current condition of pine plantations of Kyiv Polisia under the influence
of environmental factors.....139

IRRIGATION-DRAINAGE

Romashchenko M.I., Saidak R.V., Matyash T.V., Yatsiuk M.V. Irrigation efficiency depending on water cost.....	150
Dudchenko K.V., Petrenko T.M., Flinta O.I., Datsiuk M.M. Effect of the irrigation regime of rise on soil oxidation-reduction status.....	160
Shatkovskiy A.P., Pryvedeniuk N.V., Hlushchenko L.A. The effectiveness of agro-technological methods of medicinal crops growing on irrigation.....	166
Romashchenko M.I., Konakov B.I., Polishchuk V.V., Usatyi S.V. Electrochemically activated water (ECHAW): history of discovery, specificity of the process, current state and prospects of its application under irrigation conditions.....	177
Romashchenko M.I., Shatkovskiy A.P., Sardak A.S., Cherevichny Y.A., Didenko N.A., Marinkov O.A. Aspects of formation of soil water regime and water consumption of corn under subsurface drip irrigation.....	190

HYDRAULIC ENGINEERING

Matseluk Ye.M., Charnyy D.V., Levytska V.D., Marysyk S.V. New technological solutions for water treatment systems in modern conditions.....	201
---	-----

Наукове видання

Меліорація
і водне господарство

№ 2 • 2021

Журнал
Заснований у 1965 році

(випуск 114)

Виконавчі редактори – Т.І. Трошина, Н.В. Логунова, К.Б. Шатковська, О.П. Войтович

Підписано до друку 20.12.2021 року.
Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.
Папір офсет. Цифровий друк.
Ум. друк. арк. 24,88. Обл. вид. арк. 19,84.
Замов. № 1221/118. Наклад 100 прим.

Видавництво та друк: ОЛДІ-ПЛЮС
вул. Паровозна, 46а, м. Херсон, Україна, 73034
Свідоцтво ДК № 6532 від 13.12.2018 р.

Тел.: +38 (0552) 399-580, +38 (098) 559-45-45,
+38 (095) 559-45-45, +38 (093) 559-45-45
Для листування: а/с 20, м. Херсон, Україна, 73021
E-mail: office@oldiplus.ua