

**Міністерство освіти і науки України  
Київський національний університет будівництва і архітектури  
Національна академія наук України  
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору**

---

**Ministry of Education and Science of Ukraine  
Kyiv National University of Construction and Architecture  
National Academy of Sciences of Ukraine  
Institute of Telecommunications and Global Information Space**

**ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА  
ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

---

**ENVIRONMENTAL SAFETY AND  
NATURAL RESOURCES**

**Збірник наукових праць**

Випуск 1 (33), січень-березень 2020 р.

Заснований у 2008 р.  
Виходить 4 рази на рік

---

**Academic journal**

Issue 1 (33), January-March 2020

Founded in 2008  
The journal is published 4 volume a year

**КИЇВ 2020**

---

**KYIV 2020**

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головні редактори: **О.С. Волошкіна**, д-р техн. наук, проф.  
**О.М. Трофимчук**, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАНУ

### Члени редколегії:

<b>Биченок М.М.</b> , д-р техн. наук	<b>Олійник О.Я.</b> , д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАНУ
<b>Бойко І.П.</b> , д-р техн. наук, проф.	<b>Павлишин В.І.</b> , д-р геол.-мін. наук, проф.
<b>Довгий С.О.</b> , д-р фіз.-мат. наук, проф., академік НАНУ	<b>Приймак О.В.</b> , д-р техн. наук, проф.
<b>Калюх Ю.І.</b> , д-р техн. наук, проф.	<b>Рудько Г.І.</b> , д-р техн. наук, д-р геол.-мін. наук, д-р геогр. наук, проф.
<b>Качинський А.Б.</b> , д-р техн. наук, проф.	<b>Триснюк В.М.</b> , д-р техн. наук
<b>Коржнєв М.М.</b> , д-р геол.-мін. наук, проф.	<b>Яковлєв Є.О.</b> , д-р техн. наук
<b>Кочетов Г.М.</b> , д-р техн. наук, проф.	
<b>Кривомаз Т.І.</b> , д-р техн. наук, проф.	

## МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА РАДА

<b>М.-Й. Валері</b> , професор, Польща	<b>М.Г. Мустафасєв</b> , д-р аграрних наук, член-кор. РАЕ, Азербайджан
<b>Н. Касаглі</b> , професор, Італія	<b>Я. Пекутін</b> , професор, Польща
<b>Н. Маргвелашвілі</b> , PhD, Австралія	<b>Пінг Лу</b> , професор, Китай
<b>Д. Мінтер</b> , професор, Великобританія	<b>Г. Собчук</b> , професор, Польща
<b>А. Мішо</b> , дослідник, Франція	

---

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України  
(протокол № 3 від 04.03.2020 р.)

Збірник наукових праць включено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук за напрямом «технічні науки» (Наказ Міністерства освіти і науки України від 22.12.2016 № 1604)

## ОСНОВНІ ТЕМАТИЧНІ РОЗДІЛИ ЗБІРНИКА

- Екологічна безпека
- Основи природокористування
- Інформаційні ресурси та системи
- Дискусійні повідомлення

---

**АДРЕСА РЕДАКЦІЇ**  
03186, м. Київ, Чоколівський бульв., 13,  
Інститут телекомунікацій і глобального  
інформаційного простору НАН України  
Телефони: (044) 245-87-97  
(044) 524-22-62  
E-mail: e.voloshki@gmail.com

Свідоцтво про державну реєстрацію  
КВ № 14146-3117 Р від 27.05.2008 р.

Електронна версія збірника в Інтернеті  
<http://www.es-journal.in.ua> українською  
та англійською мовами



Creative Commons «Attribution» 4.0 WorldWide

## ЗМІСТ

### ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

**Chugai A.V., Safranov T.A.**

A technogenic load on the environmental components during the formation and accumulation of the waste in the North-Western Black Sea regions..... 5

**Петроченко О.В.**

Оцінка і прогнозування паводкових ризиків в річкових басейнах ..... 18

**Фомін Ю.О., Деміхов Ю.М., Верховцев В.Г., Дудар Т.В., Борисова Н.М., Кравчук З.М.**

Елементи-супутники уранового зруденіння альбітитової формації Українського щита та їх вплив на навколишнє середовище..... 42

**Сіренко А.П.**

До оцінки зсувонебезпечності з урахуванням сейсмічних впливів ..... 59

### ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

**Mammadov B.M.**

Effect of the irrigative water quality on ecomeliorative state of soils..... 69

**Погребенник В.Д., Нестер А.А.**

Оцінювання ризику від аварійних ситуацій під час зберігання гальванічних відходів..... 75

### ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ ТА СИСТЕМИ

**Кузьмін А.В., Греков Л.Д., Кузьміна Н.Н., Петров О.А., Медведенко О.М.**

Обчислювальні процедури тематичної обробки космічних знімків в інтересах моніторингу аграрних ресурсів (частина 2)..... 87

**Тютюник В.В., Соболев О.М., Калугін В.Д., Захарченко Ю.В.**

Формування динамічної моделі оперативного моніторингу рівня забруднення екосистеми внаслідок аварій на об'єктах ядерної енергетики 95

**Черній Д.І.**

Метод побудови математичної моделі шаруватих течій ..... 115

**ДО ВІДОМА АВТОРІВ..... 131**

## CONTENTS

### ENVIRONMENTAL SAFETY

<b>Chugai A.V., Safranov T.A.</b> A technogenic load on the environmental components during the formation and accumulation of the waste in the North-Western Black Sea regions.....	5
<b>Petrochenko O.V.</b> Assessment and prediction of flood risks in river basins.....	18
<b>Fomin Y.O., Demikhov Y.M., Verkhovtsev V.G., Dudar T.V., Borisova N.N., Kravchuk Z.N.</b> Pathfinder elements of uranium mineralization from albitite formation of the Ukrainian shield and their impact on the environment.....	42
<b>Sirenko A.P.</b> Assessment of a landslide hazard taking into account seismic impact .....	59

### NATURAL RESOURCES

<b>Mammadov B.M.</b> Effect of the irrigative water quality on ecomeliorative state of soils.....	69
<b>Pohrebennyk V.D., Nester A.A.</b> Assessment of the risk of emergency situations during the storage of galvanic waste .....	75

### INFORMATION RESOURCES AND SYSTEMS

<b>Kuzmin A.V., Grekov L.D., Kuzmina N.M., Petrov O.A., Medvedenko O.M.</b> Computational procedures for thematic processing of space imagery for agricultural resources monitoring (part 2).....	87
<b>Tiutiunyk V., Sobol O., Kalugin V., Zakharchenko J.</b> Formation of the dynamic model for operative monitoring of the ecosystem's pollution level through emergencies at nuclear power plants.....	95
<b>Cherniy D.I.</b> Method of building a mathematical model of layered flows .....	115
<b>INFORMATION FOR AUTHORS</b> .....	131

## ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ENVIRONMENTAL SAFETY

UDC 502:504

**Angelina V. Chugai**, PhD (geography), Ass. Prof., Dean of Nature Protection Faculty  
ORCID: [orcid.org/0000-0002-8091-8430](https://orcid.org/0000-0002-8091-8430) *e-mail*: [avchugai@ukr.net](mailto:avchugai@ukr.net)

**Tamerlan A. Safranov**, Doctor of Science, Prof., Head of Department of Environmental Science and Environmental Protection  
ORCID: [orcid.org/0000-0003-0928-5121](https://orcid.org/0000-0003-0928-5121) *e-mail*: [safranov@ukr.net](mailto:safranov@ukr.net)

Odessa State Environmental University, Odessa, Ukraine

### A TECHNOGENIC LOAD ON THE ENVIRONMENTAL COMPONENTS DURING THE FORMATION AND ACCUMULATION OF THE WASTE IN THE NORTH-WESTERN BLACK SEA REGIONS

***Abstract.** The amount of the production and consumption waste generated and accumulated in a certain territory (in the region) can be considered as one of the indicators of a technogenic load on the environmental components. The processes of formation and accumulation of various wastes pose a threat to a state of all environmental components. The formation and, especially, the accumulation of production and consumption waste inevitably contaminate the soil cover.*

*The problem of inefficient waste management is typical for the regions of Ukraine, and therefore the purpose of the work is to assess a level of a technogenic load on the environmental components by the indicators of the formation and accumulation of production waste and the consumption in the regions of the Northwest Black Sea. To evaluate and analyze a level of a technogenic load on the environment based on the principle of calculating a technogenic load module it is proposed to determine a module of a technogenic load on the geological environment, ie the most vulnerable component of the environment.*

*It is established that the greatest load in the territory of the North-Western Black Sea is in the Mykolaiv region (due to industrial waste). The amount of the generated and accumulated waste exceeds the corresponding figures in the Odesa and Kherson regions. More than 95% are class IV hazardous waste. In almost all regions of the Northwest Black Sea, there has been a tendency of increasing a load, primarily due to the increased accumulation of the waste.*

*It is suggested to determine a module of a technogenic load on the geological environment according to the waste generated and accumulated in the region.*

***Keywords:** a technogenic load module; geological environment; waste; formation; accumulation*

## Introduction

The processes of forming and accumulating the various wastes pose a threat to a state of all environmental components. At the sites of landfills (landfills), harmful substances enter the air pool, pollute fertile soils, surface and groundwater, and also pose a threat to a sanitary and epidemiological state of the surrounding settlements. Taking into account that in the regions of Ukraine the predominant method of handling solid household waste (SHW) is its removal and disposal at landfills (landfills), the absolute majority of which do not meet the environmental safety requirements, the processes of physical, chemical and biological pollution, in particular, the geological environment (GE) will be enhanced.

The GE is the upper part of the lithosphere, which is considered as a multicomponent system, which is influenced by human engineering and economic activity, and, in its turn it fully determines this activity [1]. In the Environmental Encyclopedia [2], the GE is a multicomponent dynamic complex organized natural system (rocks, soils, sediments, groundwater, natural gases), which is characterized by the presence of geophysical and geochemical fields and interacts with the elements of landscape, atmosphere, surface waters and is affected by technogenic activities. According to this definition fertile soils are included into the GE; only natural gases and non-hydrocarbon fluids are included into the GE components. The GE "interacts with the elements of the landscape, the atmosphere", but a ground part of the atmosphere is a part of the landscape.

The issue referring to the GE upper boundary is no less difficult, because many researchers include not only rocks, but also fertile soils, surface water and biota into the concept of "the geological environment". Therefore V.T. Trofimov and others [3] proposed the term "a surface part of the lithosphere" (LSP), excluding surface waters and, in certain situations, fertile soils from it instead of the term "the geological environment". In their interpretation, the upper boundary of the LSP usually extends along the sole of the humus layer of the fertile soil. If we consider the Earth's soil shell (the pedosphere) as a separating shell - a battery and a source of energy for bionites, then as a rule, fertile soils fall out of the GE (it should be recalled that fertile soils are subaerial, and bottom sediments are subaltern, but the latter are not generally referred to the GE). However if soil is considered as a geochemical barrier to the migration of pollutants, it is a part of the GE. If we consider fertile soil as mineral-organogenic rock acting as the first geochemical barrier to the migration of technogenic Ps or the environment for the exogenous processes development, it must be included in the object of ecological geology.

Therefore taking into account the fact that during forming and, especially, accumulating the production and consumption waste, a soil cover is inevitably contaminated, it is advisable to consider fertile soils as a component of the GE in this work.

The amount of production and consumption waste generated and accumulated in a certain territory (in the region) can be considered as one of the indicators of a technogenic load on the GE.

In the Odessa region, the facilities for the utilization and disposal of hazardous production wastes were created and are operating. But they are not enough. The system of hazardous waste collection is not developed in the rural areas. Also a serious problem is the problem of storage and safe handling of the unsuitable pesticides that have remained on the territory of the region since the Soviet time [4].

About 6.1 million m<sup>3</sup> of SHW are produced annually in the Odessa region. According to the Department of Ecology and Natural Resources of the Odessa Regional State Administration, there are 608 landfills occupying about 1300 hectares in the region. Most of them are in poor condition and are operating in violation of the environmental laws and the sanitary and epidemiological safety requirements. An assessment of whether the territory of the Odessa region is favorable for the placement of SHW landfills has been made by physical-geographical, engineering-geological, hydro-geological and technogenic indicators, but the obtained results do not allow to select a specific site for SHW landfill landing [5].

The main spheres where hazardous waste is actually generated in the Mykolaiv region include metallurgy, machine building, shipbuilding, food processing, leather processing, water utilities, agricultural enterprises, medical institutions. As for 2017 the Mikolaev alumina plant was the largest source of the waste generation among the enterprises in the region [6].

In the territory of the Kherson region there are 100 waste generation facilities and 8 waste treatment and disposal facilities. A critical situation has emerged in the area of SHW management. Each year more than 250,000 tonnes of SHW are produced in the region. According to the inventory of the landfill sites, 329 such sites are located in the territory of the region, and only 73 of them are certified and 77 enterprises are operated with the documentation for the right to use the land. Also there are 1921,804 tonnes of unsuitable pesticides on the territory of the region, and 1887,436 tonnes of them are ownerless [7].

Many issues have been devoted to the waste management and consumption in the regions of the North-Western Black Sea. Thus in the work [8] a general characterization of the problem of landfills for the Odessa region is presented. The authors formed a set of indicators on the location of SHW. Based on the cluster analysis, zoning of the territory of the Odessa region according to the indicators of the SHW locations was carried out. It is determined that the problem of inefficient waste management is typical for the regions of Ukraine. Also in the work [9] a classification of the individual components of a hazardous part of the SHW was proposed. The authors think that it will prevent a negative impact of this type of the waste on the environment and transform a large part of it into the state of secondary material resources. One of the main documents regulating the management of SHW in the Odessa region is a project of "The program of solid household waste management in the Odessa region for 2018-2022" [10]. Its main purpose is to ensure an appropriate network of waste disposal facilities as well as bringing existing facilities into compliance, where appropriate, and closing the facilities that are not in compliance with the standards and pose a significant risk to human or environmental health.

The Regional Program of SHW Management in the Mykolayiv region for the period up to 2020 is in operation.

In the works [11, 12] the problems of household waste utilization in the Kherson region including the countryside were investigated.

An analysis of the environmental impact of the production and consumption waste on the environment of the North-Western Black Sea regions is presented in the work [13].

The purpose of this work is to assess a level of a technogenic load on the GE by the indicators of forming and accumulating the production and consumption waste for the regions of the North-Western Black Sea.

## Research methodology

To evaluate and analyze a level of a technogenic load on the geological environment, the principle of calculating a technogenic load module, which is defined as a sum of weight units of all types of wastes (solid, liquid, gaseous) of the industrial, agricultural and municipal objects for a time interval – 1 year, applied to the area of the administrative district or region within which these objects are located and it is measured in thousand tons/km<sup>2</sup> per year [14]. The authors proposed to determine individually a technogenic load module on the GE ( $M_{GE}$ ) by the indicators of the waste generated and accumulated in the region. This approach was implemented in the estimation of a technogenic load on the air basin and water bodies of the regions of the North-Western Black Sea, for example in the works [15, 16].

## Research results

According to the Regional reports, Ecological passports of the region, as well as the materials of the State Statistics Service of Ukraine [17] we analyzed the information on the volumes of forming and accumulating the waste in the regions of the NWBS.

Figure 1 shows the dynamics of the waste generation in the Odessa region. As it can be seen the maximum generation was recorded in 2012. However there is a general tendency to reduce the amount of the generated waste. Also almost 99% of the generated waste is class IV hazardous waste.

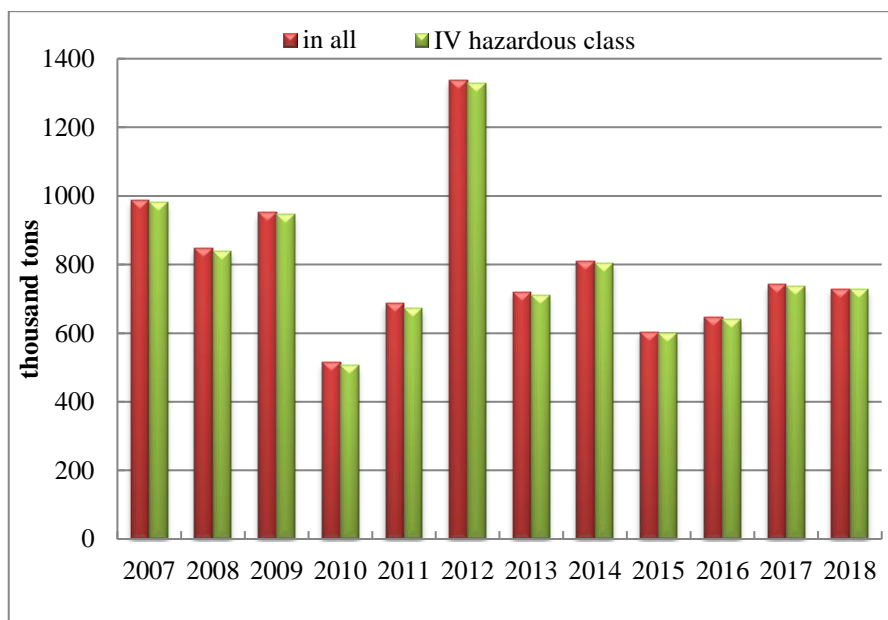


Fig. 1 – The dynamics of the waste generation in the Odessa region in 2007–2018

The information about the waste accumulated in the Odessa region was available from 2010 to 2015. In 2014–2015 the amount of the generated waste was no more than 10% of the accumulated waste. However the amount of accumulated waste each year may increase or remain constant. In 2014–2015 this value remained almost unchanged. Therefore in the future we will assume the data of 2015 as an indicative



value of the accumulated waste amount in 2016–2018, namely 9759,333 thousand tons. So the data of the accumulated waste in the region is given in fig. 2.

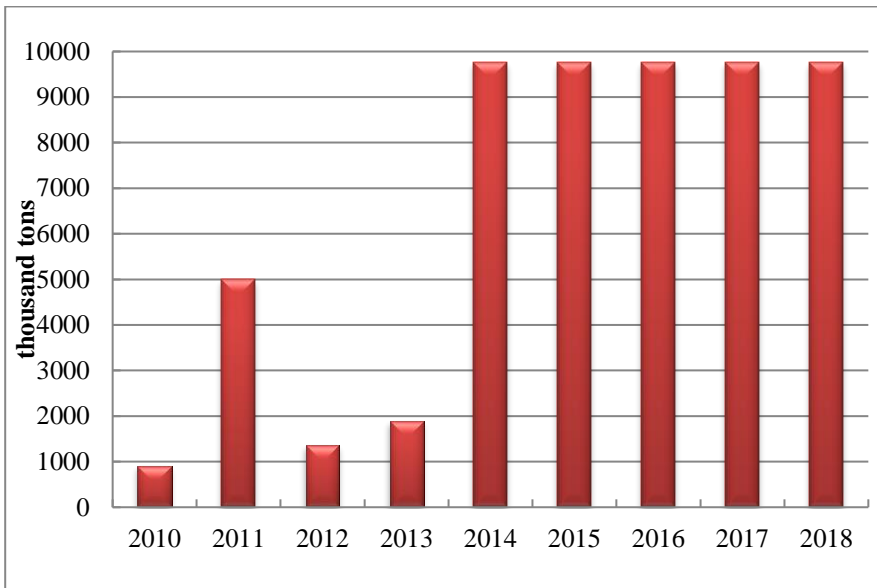


Fig. 2 – The volumes of accumulated waste in the Odessa region in 2010–2018

Taking into account the data on the area of the region the calculation of the  $M_{GE}$  indicator was performed (Fig. 3). The analysis shows that the value of the  $M_{GE}$  by the amount of the accumulated waste significantly exceeds the corresponding value by the amount of the generated waste. Since 2011 there has been a significant increase in a technogenic load on the GE by a total amount of waste in the region.

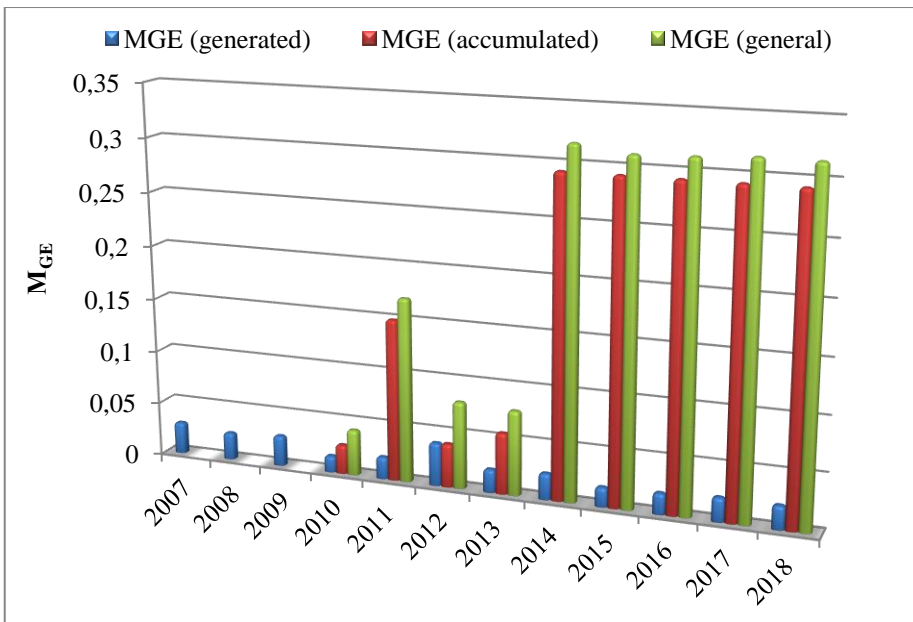


Fig. 3 – The value of the  $M_{GE}$  indicator in the of Odessa region in 2007–2018

Figure 4 shows the dynamics of the waste generation in the Mykolaiv region. It should be noted that in 2018, only a total amount of generated waste was available. Considering that in 2012–2017 the class IV waste generation was 96% on average, this figure was taken into account when calculating the estimated amount of this waste class in 2018.

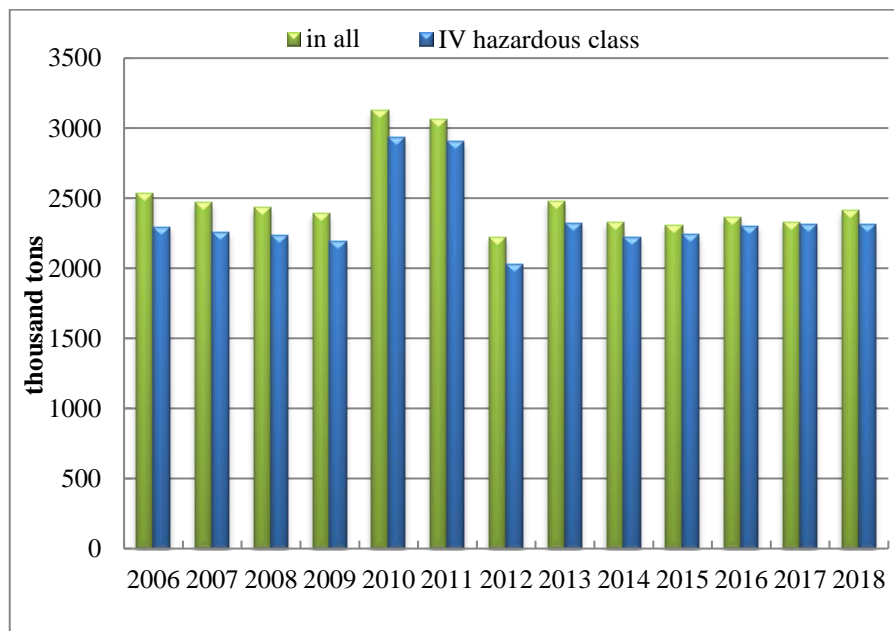


Fig. 4 – The dynamics of the waste generation in the Mykolaiv region in 2006–2018

The figure shows that the amount of annually generated waste in the Mykolaiv region does not exceed 2500 thousand tons/year. Two highs were indicated in 2010–2011, when the amount of generated waste exceeded 3000 thousand tons/year. The class IV hazardous waste is prevalent in the generated waste in the region. Its total amount ranges from 90 to 99% in recent years.

The data on the accumulated waste in the Mykolaiv region have been available since 2010 (Fig. 5). It can be seen that the amount of the accumulated waste in the region is much higher than the corresponding generated waste. There is also a steady tendency to increase the accumulated waste in the region.

Figure 6 shows the results of the calculation of the  $M_{GE}$  indicator by the amount of the generated and accumulated waste in the Mykolayiv region. The figure shows that since 2011 there has been a steady tendency to increase a technogenic load on the GE by the amount of waste, primarily due to the increase of the accumulated waste.

Similar calculations were also made for the Kherson region. Figure 7 shows the dynamics of changes in the amount of the waste generation in the Kherson region. It should be noted that the actual data were not available in some years. Therefore they were interpolated taking into account the existing dependencies. Thus a total amount of generated in 2010 waste (taking into account the actual increase in the amount in 2007–2009) and the amount of class IV hazardous waste in 2018 were determined (according to calculations in 2015–2017, this amount averaged 89% of the total waste).

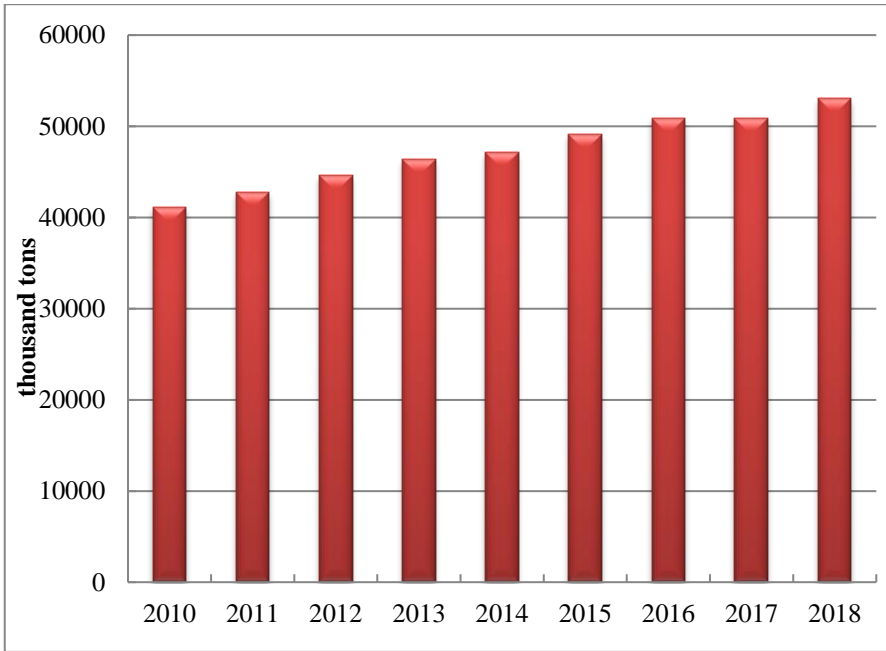


Fig. 5 – The volumes of the accumulated waste in the Mykolaiv region in 2010–2018

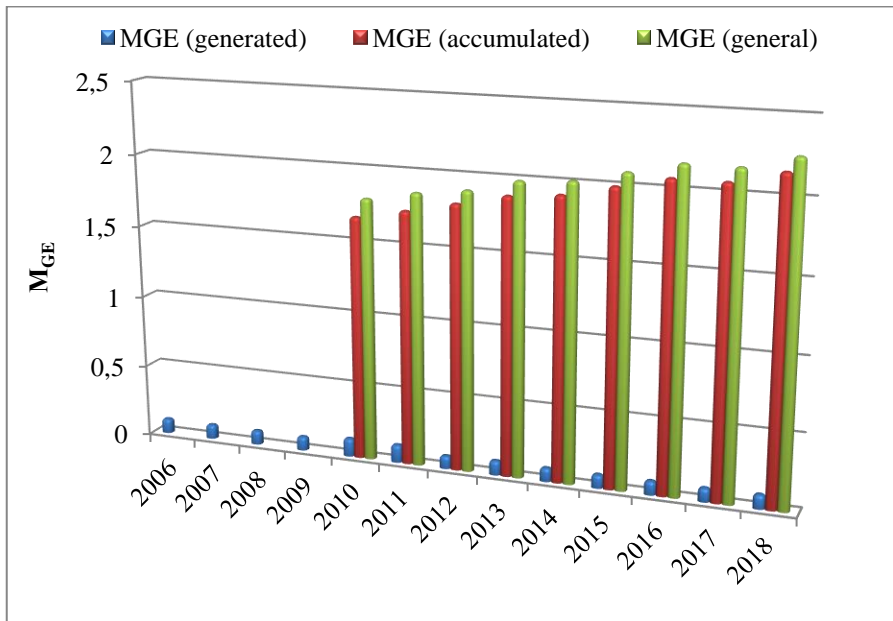


Fig. 6 – The values of the  $M_{GE}$  indicator of the Mykolaiv region in 2006–2018

The figure above shows that the maximums of the waste generation in the region were observed in 2012–2014. Till 2012 there was a gradual significant increase in a total amount of the generated waste, in 2015–2018 there was a slight decrease. In recent years this value has hardly changed. Class IV waste is the predominant amount of the generated waste in all years.

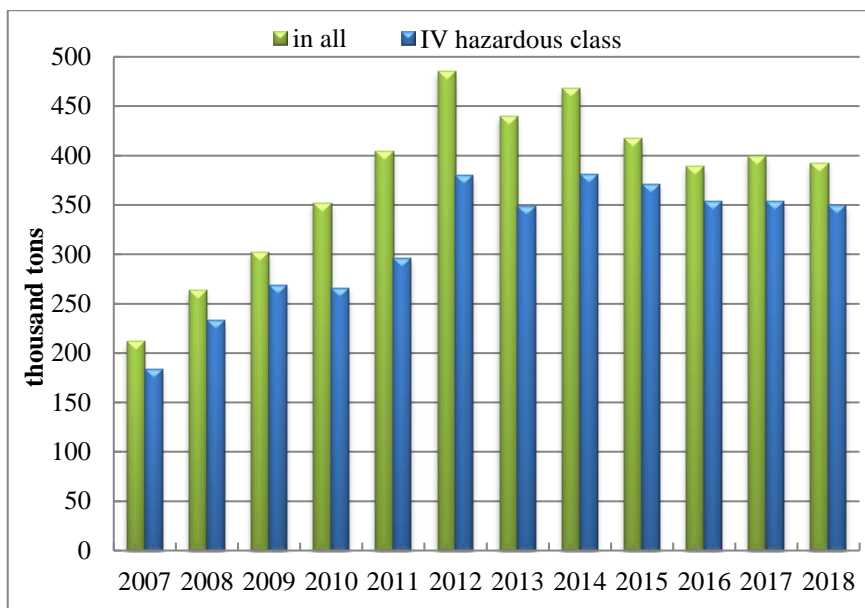


Fig. 7 – The dynamics of the waste generation in the Kherson region in 2007–2018

Information on the amount of the accumulated waste in the region (Fig. 8) has only been available since 2011, and the data for 2018 have also been interpolated considering the accumulation tendencies in recent years. As it can be seen, in 2011–2013 there was a sharp increase in the amount of the accumulated waste in the territory of the Kherson region (4 times). Since 2014 this tendency has continued, and in recent years the increase of the accumulated waste is up to 70 thousand tonnes annually. Also the amount of the accumulated waste in recent years is 3 times higher than the indicators for its generation. This is significantly lower than in other regions of the North-Western Black Sea, where the corresponding figures were different in order.

The  $M_{GE}$  indicator was calculated based on the available data for the Kherson region. The results of the calculation are shown in Fig. 9.

The analysis of the given figure shows that with the constant increase of the accumulated waste in the territory of the Kherson region a level of a technogenic load on the GE of the region increases annually.

Comparative analysis showed (Fig. 10) that the maximum amount of waste among the North-Western Black Sea regions is generated in the Mykolaiv region (in different years 60–75% of a total amount of waste). The volume of the waste generation exceeds the order of magnitude in the Odessa and Kherson regions. The vast majority of waste in the Mykolaiv region is generated at the enterprise "The Mykolayiv Alumina Plant" (in 2018, this figure was almost 1800 thousand tons) [6]. Accordingly a level of a technogenic load on the GE in the Mykolaiv region is the highest among the regions of the North-Western Black Sea. A similar situation is noted by the indicators of the accumulated waste. In this case the volumes of the accumulated waste in the Mikolaev region (80–90% as a whole in the North-Western Black Sea regions) are an order of magnitude higher than the corresponding indicators in the Odessa region and are two orders of magnitude in the Kherson region.

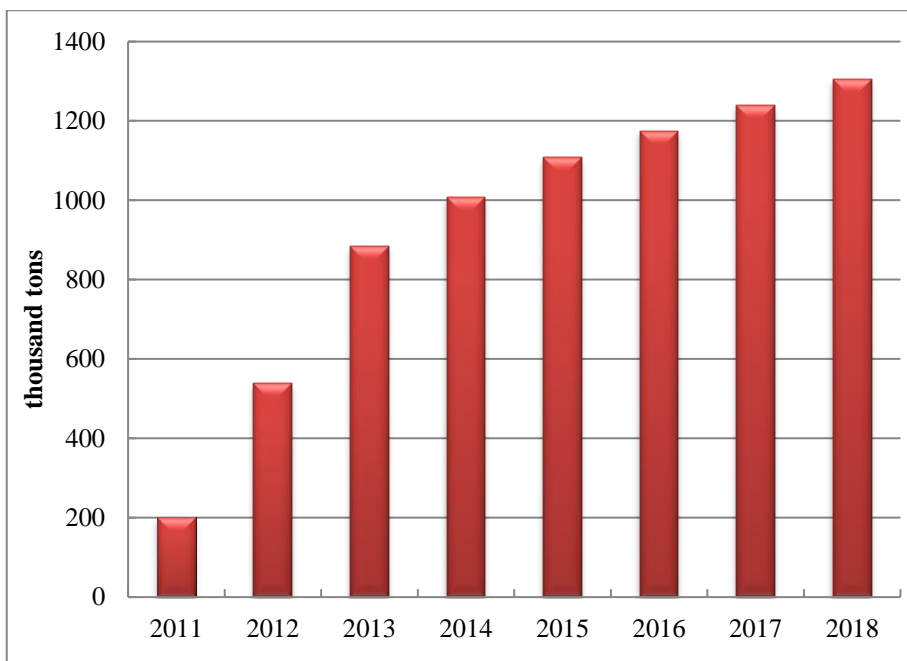


Fig. 8 – The volumes of the accumulated waste in the Kherson region in 2011–2018

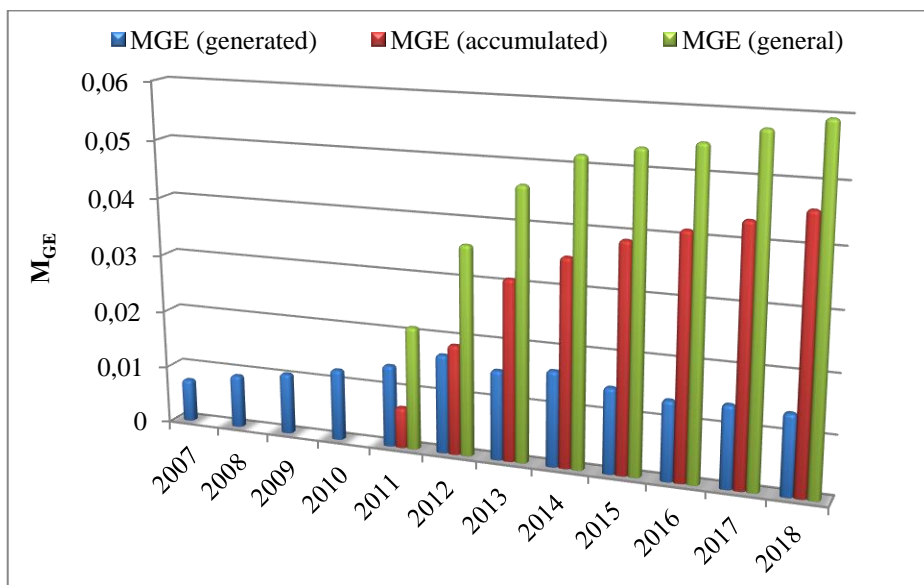


Fig. 9 – The value of the  $M_{GE}$  indicator in the Kherson region in 2007–2018

## Conclusions

The work assesses a level of a technogenic load on the GE by the indicators of forming and accumulating the production and consumption waste for the North-Western Black Sea regions. It is proposed to determine a module of a technogenic load on the GE.

The performed studies have shown that in all the regions during the study period there is an increase in both forming and accumulating the waste. It is determined that the greatest load among the North-Western Black Sea regions is in the Mykolaiv

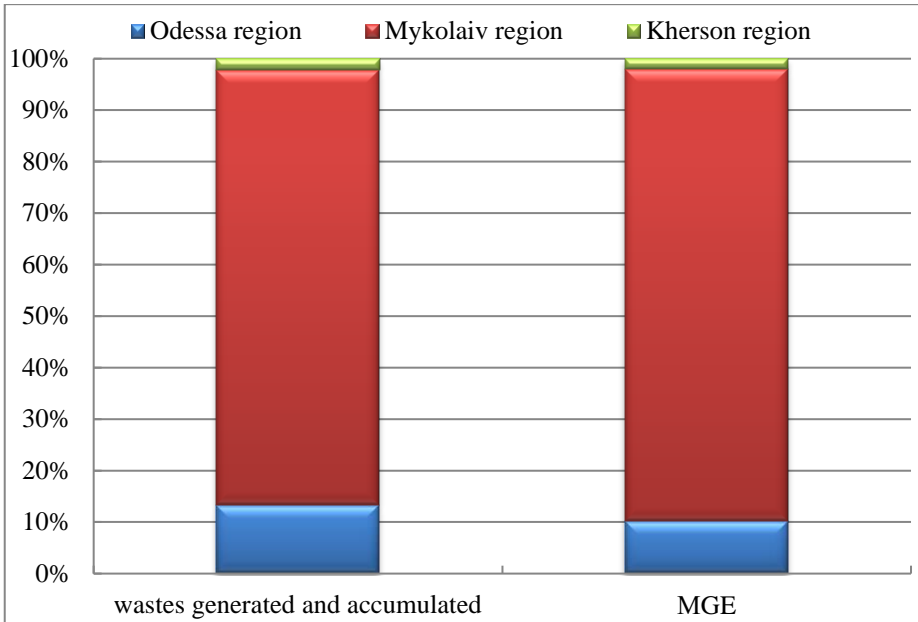


Fig. 10 – Comparative analysis of a level of a technogenic load on the GE of the North-Western Black Sea regions in 2003–2018

region (60–75% of a total amount of the waste). The indicators of waste generation and accumulation exceed those in the Odessa and Kherson regions. More than 95% are class IV hazardous waste.

## REFERENCES

1. Sergeev, E. M. (1979). *Inzhenernaya geologiya – nauka o geologicheskoy srede* [Engineering geology – the science of the geological environment]. *Inzhenernaya geologiya*, 1, 1-9. (in Russian)
2. Tolstoukhov, A. V. et al. *Ekolohichna entsyklopediia: U 3 t. (2006 – V. 1, 2007 – V. 2, 2008 – V. 3)* [Ecological encyclopedia: 3 volumes]. Kyiv: TOV «Tsentri ekolohichnoi osvity ta informatsii». (in Ukrainian)
3. Trofimov, V. T. (Ed.). (1997). *Teoriya i metodologiya ekologicheskoy geologii* [Theory and methodology of environmental geology]. Moscow: Izd-vo MGU. (in Russian)
4. Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha v Odeskii oblasti u 2018 rotsi [Regional Report on the State of the Environment in the Odessa Region in 2018]. (2019). Odessa. (in Ukrainian)
5. Safranov, T. A., Cherkez, Ye. A., & Shatalin, S. M. (2018). Otsinka spriyatlyvosti terytorii Odeskoi oblasti dlia rozmishchennia polihoniv tverdykh pobutovykh vidkhodiv [Evaluation of the extent of favourableness of the territory of the Odesa region for placement of solid household waste landfills]. *Ukrainskyi hidrometeorolohichniy zhurnal*, 21, 98-109. (in Ukrainian)

6. Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Mykolaivskii oblasti u 2018 rotsi [Regional report on the state of the environment in Mykolaiv region in 2018]. (2019). Mykolaiv. (in Ukrainian)
7. Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha u Khersonskii oblasti u 2017 rotsi [Regional report on the state of the environment in the Kherson region in 2017]. (2018). Kherson. (in Ukrainian)
8. Safranov, T. A., Prykhodko, V. Iu., & Shanina, T. P. (2016). Problema rozmishchennia vidkhodiv na zvalyshchakh ta polihonakh Odeskoi oblasti [The problem of waste disposal at landfills of Odessa region]. *Visnyk KhNU im. V.N. Karazina*, 14, 83-90. (in Ukrainian)
9. Safranov, T. A., Shanina, T. P., & Prykhodko, V. Iu. (2017). Klasyfikatsiia nebezpechnoi skladovoi tverdykh pobutovykh vidkhodiv – peredumova formuvannia systemy povodzhennia z nymy v rehionakh Ukrainy [Classification of hazardous compound of municipal solid waste as a basis of its treatment system formation in regions of Ukraine]. *Liudyna i dovykillia. Problemy neoekolohii*, 1-2(27), 130-135. (in Ukrainian)
10. Elektronnyi resurs. URL: <http://oblrada.odessa.gov.ua/wp-content/uploads/03-21-VII.pdf> (Retrieved: 12.02.2020).
11. Pryimak, V. V. (2016). Doslidzhennia problem utylizatsii ta povodzhennia z tverdymy pobutovymy vidkhodamy u Khersonskii oblasti [Research on problems of disposal and management of solid household waste in Kherson region]. *Nauka i Studia*, 10, 174-180. (in Ukrainian)
12. Pryimak, V. V. (2018). Doslidzhennia problem utylizatsii pobutovykh vidkhodiv u selakh (na prykladi s. Velyka Kardashynka Holoprystanskoho raionu) [Research on domestic waste disposal in rural areas (e.g., Velyka Cardashynka Gola Prystan District)]. *Naukovi dopovidi NUBiP Ukrainy*, 5(75). (in Ukrainian)
13. Safranov, T. A., & Chuhai, A. V. (Eds.). (2017). *Stan i yakist pryrodnoho seredovyshcha pryberezhnoi zony Pivnichno-Zakhidnoho Prychornomia: monohrafiia* [The state and quality of the natural environment of the coastal zone of the North-Western Black Sea]. Kharkiv: FOP Panov A.M. (in Ukrainian)
14. Adamenko, O. M., & Rudko, H. I. (1998). *Ekolohichna heolohiia* [Environmental geology]. Kyiv: Manuskrpt. (in Ukrainian)
15. Chugai, A., Safranov, T., & Holik, Yu. (2018). Analysis of the state of the air basin of industrial-urban agglomerations in the North-Western Black Sea. *International Journal of Engineering & Technology(UAE)*, 7(4.8), 783-789.
16. Chugai, A., & Dzhura, O. (2019). Estimation of Technogenic Loading at the Surface Water of the North-Western Black Sea Coast Region. *Environmental Problems*, 4(4), 167-173.
17. Elektronnyi resurs. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (Retrieved: 19.01.2020).

*The article was received 05.12.2019 and was accepted after revision 14.02.2020*

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сергеев Е.М. Инженерная геология – наука о геологической среде // Инженерная геология. 1979. № 1. С. 1–9.
2. Екологічна енциклопедія: У 3 т. // Толстоухов А.В. та ін. Київ: ТОВ «Центр екологічної освіти та інформації», 2006 – Т. 1, 2007 – Т. 2, 2008 – Т. 3.
3. Теория и методология экологической геологии // Под ред. Трофимова В.Т. Москва: Изд-во МГУ, 1997. 368 с.
4. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Одеській області у 2018 році. Одеса, 2019. 241 с.
5. Сафранов Т.А., Черкез Є.А., Шаталін С.М. Оцінка сприятливості території Одеської області для розміщення полігонів твердих побутових відходів // Український гідрометеорологічний журнал. 2018. № 21. С. 98–109.

6. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Миколаївській області у 2018 році. Миколаїв, 2019. 175 с.
7. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища у Херсонській області у 2017 році. Херсон, 2018. 238 с.
8. Сафранов Т.А., Приходько В.Ю., Шаніна Т.П. Проблема розміщення відходів на звалищах та полігонах Одеської області // Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна. 2016. Вип. 14. С. 83–90.
9. Сафранов Т.А., Шаніна Т.П., Приходько В.Ю. Класифікація небезпечної складової твердих побутових відходів – передумова формування системи поводження з ними в регіонах України // Людина і довкілля. Проблеми неоекології. 2017. № 1 – 2 (27). С. 130–135.
10. Електронний ресурс. URL: <http://oblrada.odessa.gov.ua/wp-content/uploads/03-21-VII.pdf> (дата звернення: 12.02.2020).
11. Приймак В.В. Дослідження проблем утилізації та поводження з твердими побутовими відходами у Херсонській області // Nauka i Studia. 2016. Т.10. С. 174–180.
12. Приймак В.В. Дослідження проблем утилізації побутових відходів у селах (на прикладі с. Велика Кардашинка Голопристанського району) // Наукові доповіді НУБіП України. 2018. № 5 (75).
13. Стан і якість природного середовища прибережної зони Північно-Західного Причорномор'я: монографія // За ред. Сафранова Т.А., Чугай А.В. Харків: ФОП Панов А.М., 2017. 298 с.
14. Адаменко О.М., Рудько Г.І. Екологічна геологія. Київ: Манускрипт, 1998. 348 с.
15. Chugai A., Safranov T., Holik Yu. Analysis of the state of the air basin of industrial-urban agglomerations in the North-Western Black Sea // International Journal of Engineering & Technology(UAE). 2018. Vol. 7, No. 4.8. P. 783–789.
16. Chugai A., Dzhura O. Estimation of Technogenic Loading at the Surface Water of the North-Western Black Sea Coast Region // Environmental Problems. 2019. Vol. 4. Num. 4. P. 167–173.
17. Електронний ресурс. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 19.01.2020).

*Стаття надійшла до редакції 05.12.2019 і прийнята до друку після рецензування 14.02.2020*

**А.В. Чугай, Т.А. Сафранов**

## **ТЕХНОГЕННЕ НАВАНТАЖЕННЯ НА СКЛАДОВІ ДОВКІЛЛЯ ПРИ УТВОРЕННІ І НАКОПИЧЕННІ ВІДХОДІВ У РЕГІОНАХ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОГО ПРИЧОРНОМОР'Я**

**Анотація.** Одним із показників техногенного навантаження на складові довкілля можна розглядати кількість відходів виробництва і споживання, що утворюється і накопичується на певній території (в регіоні). Процеси утворення і накопичення різноманітних відходів несуть загрозу для стану всіх складових довкілля. При утворенні і, особливо, при накопиченні відходів виробництва і споживання неминуче відбувається забруднення ґрунтового покриву.

Проблема неефективного управління та поводження з відходами є типовою для регіонів України, а тому метою роботи є оцінка рівня техногенного навантаження на складові довкілля за показниками утворення і накопичення відходів виробництва і споживання для регіонів Північно-Західного Причорномор'я. Для оцінки і аналізу рівня техногенного навантаження на довкілля на основі принципу розрахунку модуля техногенного навантаження запропоновано визначати модуль техногенного навантаження на геологічне середовище, тобто найбільш уразливої складової довкілля.

Встановлено, що найбільшого навантаження на території Північно-Західного Причорномор'я зазнає Миколаївська область (за рахунок промислових відходів). Кількість генерованих і накопичених відходів перевищують відповідні показники



в Одеській і Херсонській областях. Більше 95% складають відходи IV класу небезпеки. Майже у всіх регіонах Північно-Західного Причорномор'я відзначено тенденцію щодо збільшення навантаження, в першу чергу, через збільшення показників накопичення відходів.

Запропоновано визначати модуль техногенного навантаження на геологічне середовище за показниками відходів, що утворено і що накопичено в регіоні.

**Ключові слова:** модуль техногенного навантаження; геологічне середовище; відходи; утворення; накопичення

**Чугай Ангеліна Володимирівна**

кандидат географічних наук, доцент, декан природоохоронного факультету Одеського державного екологічного університету

**Адреса робоча:** 65016 Україна, м. Одеса, вул. Львівська, 15

**e-mail:** avchugai@ukr.net

ORCID: orcid.org/0000-0002-8091-8430

**Сафранов Тамерлан Абісалович**

доктор геолого-мінералогічних наук, професор, завідувач кафедри екології та охорони довкілля Одеського державного екологічного університету

**Адреса робоча:** 65016 Україна, м. Одеса, вул. Львівська, 15

**e-mail:** safranov@ukr.net

ORCID: orcid.org/0000-0003-0928-5121

UDK 627.51 : 001.8

**Oleksiy V. Petrochenko**, PhD, Assistant\_Rector  
<https://orcid.org/0000-0002-0551-935X> **e-mail:** a\_petr89@i.ua

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

## ASSESSMENT AND PREDICTION OF FLOOD RISKS IN RIVER BASINS

**Abstract.** *The problem of floods is considered as an essential component of the modern global problem of water on the planet. Given the structural complexity of the flood problem and the urgent need to address it in Ukraine, the need and feasibility of creating a perfect methodology for integrated flood risk management in river basins has been stated. It is noted that an important component of the methodology of integrated flood risk management in river basins is flood assessment and forecasting. The article is devoted to the development of scientific and methodological foundations for assessing and forecasting flood risks in river basins. Floods are classified according to their intensity. Two main types of flood protection in river basins are distinguished – situational and preventive. A criterion is given by which it is advisable to choose the type of flood protection in river basins. Depending on the type of flood protection chosen, flood protection measures are divided into situational and preventive. A fundamental approach to the management of flood protection of a situational type is provided, according to which short-term forecasting of the flood and the subsequent implementation of response measures during the approach, passage and completion of the flood are provided. The basic principles of flood control of a preventive type are described, according to which long-term forecasting of floods and the implementation of response measures through the construction and operation of flood control structures is provided. It was noted that there were no perfect methods for long-term flood forecasting, in connection with which an attempt was made to develop a fundamentally new flood forecasting methodology, which is based on the use of statistical data on past flood situations. It is proposed to perform long-term flood forecasting according to hydrological indicators of floods and indicators of their consequences. The long-term flood forecasting technique is based on the approximation of the flow rate of the water flow and the total flood losses in the form of descending hyperbolic functions depending on the flood intensity. The main result of long-term flood forecasting is the amount of total flood damage projected for the next 99 years that is found by integrating the flood loss function. Predicted flood losses form the basis of the dependencies for determining the main indicators of the effectiveness of preventive flood control measures – the average annual prevented damage and damage prevented during the estimated life of protective structures.*

**Keywords:** *system analysis; flood; flood classification; flood zone; flood consequences; flood protection; projected losses; prevented losses*

---

© O. V. Petrochenko, 2020

О.В. Петrenchенко

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

## ОЦІНКА І ПРОГНОЗУВАННЯ ПАВОДКОВИХ РИЗИКІВ В РІЧКОВИХ БАСЕЙНАХ

***Анотація.** Розглянуто проблему паводків як суттєву складову сучасної глобальної проблеми води на планеті. З огляду на структурну складність проблеми паводків та актуальну потребу її рішення в Україні зазначена необхідність і доцільність створення досконалої методології інтегрованого управління паводковими ризиками в річкових басейнах. Зазначається, що важливою складовою методології інтегрованого управління паводковими ризиками в річкових басейнах є оцінка паводків та їх прогнозування. Стаття присвячена розробці науково-методичних основ оцінки і прогнозування паводкових ризиків в річкових басейнах. Виконано класифікацію паводків за показником їх забезпеченості. Виділено два основних типи протипаводкового захисту в річкових басейнах – ситуаційний і превентивний. Наведено критерій, за яким доцільно обирати тип протипаводкового захисту в річкових басейнах. Залежно від обраного типу протипаводкового захисту заходи захисту від паводків поділено на ситуаційні і превентивні. Наведено принципівий підхід до управління протипаводковим захистом ситуаційного типу, за яким передбачено короткострокове прогнозування паводку та наступне здійснення заходів реагування в період його наближення, проходження та завершення. Викладено принципіві основи управління протипаводковим захистом превентивного типу, за яким передбачено довгострокове прогнозування паводків та здійснення заходів реагування шляхом будівництва та експлуатації протипаводкових споруд. Наголошено про відсутність досконалих методів довгострокового прогнозування паводків, в зв'язку з чим зроблено спробу розробити принципово нову методику прогнозування паводків, яка ґрунтується на використанні статистичних даних паводкових ситуацій минулих років. Довгострокове прогнозування паводків запропоновано здійснювати за гідрологічними показниками паводків і показниками наслідків їх проходження. Основу методики довгострокового прогнозування паводків становить апроксимація спадними гіперболічними функціями витрати паводкового потоку і загальних збитків залежно від забезпеченості паводків. Основним результатом довгострокового прогнозування паводків є прогнозована на майбутні 99 років сума загальних збитків від паводків, яку знаходять шляхом інтегрування гіперболічної функції збитків від паводків. Прогнозовані збитки від паводків покладено в основу розрахункових залежностей визначення основних показників ефективності превентивних протипаводкових заходів – середньорічних відвернених збитків і збитків, відвернених протягом розрахункового строку експлуатації захисних протипаводкових споруд.*

***Ключові слова:** системний аналіз; паводок; класифікація паводків; зона затоплення; наслідки паводків; захист від паводків; прогнозовані збитки; відвернені збитки*

### Вступ

На сучасному етапі розвитку земної цивілізації проблема води визначилась як одна з глобальних проблем людства. Проблема води – це не одна, а дві протилежні за характером впливу на життєдіяльність людини проблеми:

проблема дефіциту води необхідної якості у посушливих регіонах планети і проблема надлишку води у вигляді весняних повеней та дощових паводків.

Проблема дефіциту води має місце в країнах і регіонах недостатньо забезпечених власними водними ресурсами. Недостатня забезпеченість водою ускладнює, а в деяких країнах унеможлиблює рішення національних продовольчих задач. Забезпеченість країн власними водними ресурсами визначають показником  $w$  обсягу місцевого річкового стоку в тис. м<sup>3</sup>, що припадає в один рік на одну людину. За визначенням Європейської економічної комісії ООН, країна, в якій місцевий річковий стік становить менше 1,7 тис. м<sup>3</sup>/рік на 1 людину, вважається водонезабезпеченою. Згідно з базою даних міжнародної економічної статистики *StatInfo.biz* Україна має показник  $w = 1,1$  тис. м<sup>3</sup>/рік на одну людину. За показником забезпеченості власними водними ресурсами Україна займає 54-те місце серед 68 найбільших країн світу і 25-те місце серед 30 європейських країн [1].

Незважаючи на загальний дефіцит води в Україні, в її північно-західних областях існує проблема надлишку води або проблема повеней і паводків. Повінь – це фаза водного режиму річки, яка спостерігається щорічно, настає в один і той же сезон і характеризується значним підвищенням рівня води в річці внаслідок весняного танення снігу. Паводок – фаза водного режиму річки, яка характеризується відносно короткочасним підняттям рівня води в річці під час зливових дощів, аварій на гідротехнічних спорудах, інтенсивного танення снігів при відлизі. Паводок, на відміну від повені, має більш універсальне визначення, оскільки він може мати місце в різні періоди року, а повінь можна вважати паводком, який проходить щовесни. Тому в подальшому для зручності викладення результатів досліджень проблема повеней і паводків розглядається як проблема паводків.

Існування проблеми паводків в Україні, в умовах недостатньої забезпеченості власними водними ресурсами, пояснюється тим, що 70% річкового стоку країни припадає на її північно-західні області, де проживає 40% населення, а 30% річкового стоку припадає на південно-східні області, де проживає 60% населення і знаходиться 70% агропромислового комплексу [2]. У зв'язку з цим розподіл забезпеченості регіонів України власними водними ресурсами має яскраво виражений контрастний характер. В південно-східних областях (Херсонська, Миколаївська, Запорізька, Донецька) показник забезпеченості власними водними ресурсами становить  $w = 0,3...0,45$  тис. м<sup>3</sup>/рік на 1 людину, що створює гострий дефіцит води в цих областях. Проте в західних областях (Івано-Франківська і Закарпатська) цей показник досягає найбільших в Україні значень:  $w = 3,0...7,0$  тис. м<sup>3</sup>/рік на 1 людину. Достатньо великий річковий стік гірських річок Українських Карпат та край нерівномірний розподіл річкового стоку протягом року створюють проблему надлишку води або проблему паводків в Карпатському регіоні, де паводки мають найбільш руйнівний характер і можуть повторюватись 3-8 разів на рік [3].

Проблема паводків ускладнює умови проживання населення в заплавах і долинах річок. Рішення цієї проблеми є надзвичайно актуальним, оскільки прирічкові угіддя на усіх етапах розвитку цивілізації завжди приваблювали людей. Заплати і луки використовувались для тваринництва. Річкові долини використовувались для рільництва та городництва. Долинні тераси використовувались для розміщення поселень, доріг та комунікацій. Річкові

водні ресурси використовувались для судноплавства, питного, господарського та промислового водопостачання.

Проблемі паводків присвячено багато наукових праць, в яких основним напрямом досліджень було вивчення гідрологічних характеристик паводків за минулі роки, а також наслідків їх проходження в руслах, заплавах та долинах річок. За результатами попередніх досліджень створено широку базу статистичних даних проходження паводків різної інтенсивності в річкових басейнах країн світу і в Україні [4–7]. Проте для ефективного рішення проблеми паводків виникає потреба систематизації результатів попередніх досліджень небезпечних явищ, викликаних паводками, та створення досконалої методології інтегрованого управління паводковими ризиками в річкових басейнах. Однією з найбільш важливих складових методології інтегрованого управління паводковими ризиками в річкових басейнах є оцінка інтенсивності паводків та їх прогнозування.

**Мета дослідження** – виконати аналіз паводкових ситуацій в Україні за попередні роки та розробити науково-методичні засади оцінки та прогнозування паводків за гідрологічними показниками і наслідками їх проходження в річкових басейнах.

В основу досліджень покладено **методологію системного аналізу**.

## Результати дослідження

### 1 Аналіз паводкових ситуацій в Україні за попередні роки

Майже на 27% території країни, а це 165 тис. км<sup>2</sup>, де проживає майже третина населення, є прояви шкідливої дії паводків. Практично не існує жодної території України, де періодично не підвищувалась водність річки під час дощів та танення снігу та не відчувалася шкідлива дія паводків [8, 9]. Найбільше від паводків потерпає населення гірських та передгірських районів Карпат. Крім того, більше половини освоєних площ гірських схилів у Закарпатській, Івано-Франківській, Львівській та Чернівецькій областях піддаються впливу зсувних процесів і селів, які формуються вже як наслідок літніх паводків. У підсумку населення й економіка країни зазнають значних збитків. Паводки руйнують водозахисні споруди, житлові будинки, мости, дороги, промислові об'єкти, завдають збитки сільському та водному господарству, лісовому фонду. Паводки замулюють низинні заплавні землі, ініціюють ерозійні процеси. Після проходження паводків різко зростає градієнт підземного потоку, що призводить до суфозії ґрунту, зсувів та утворення селевих потоків. Шкідлива дія паводків створює серйозну соціально-економічну загрозу в Україні і перш за все в Карпатському регіоні. Це підтверджується статистикою паводків, починаючи з кінця XIX століття [5–7, 9–17]:

- 2–3 квітня 1897 р. пройшов катастрофічний паводок на р. Прут [12];
- 8–9 липня 1911 р. внаслідок сильних злив рівень води на річці Прут нижче впадання в річку Черемош сягав найвищих позначок, які не були перевершені до цього часу, а рівні води в передгірній частині р. Серет були перевищені лише в період паводку 23–30 липня 2008 р. Максимальна витрата паводкового потоку біля м. Чернівці становила 5250 м<sup>3</sup>/с, а швидкість течії становила 5–6 м/с. Орієнтовна витрата води р. Серет тоді сягала близько 1000 м<sup>3</sup>/с, що приблизно в 100 разів перевищує меженний стік [9–11];

- 30–31 серпня 1927 р. у басейні річок Дністра і Прута за два дні випали опади кількістю понад 300 мм. В низинах паводком було затоплено понад 10 міст та багато сіл [6, 9];

- 12 липня 1929 р. спостерігався паводок на р. Серет, який відноситься до великих. На гідрологічному посту у м. Сторожинець максимальна витрата води становила 796 м<sup>3</sup>/с при середньорічній близько 6 м<sup>3</sup>/с, ширина зони затоплення берегів сягала 236 м [12];

- 1–2 вересня 1941 р. в басейні річок Дністра, Пруту і Серету пройшов надзвичайно великий паводок з ймовірністю 1 раз на 250–300 років. Рівні води в Дністрі на 1–3 м перевищили максимальні рівні води попередніх років [6, 9, 12];

- 7–15 червня 1969 р. випали тривалі й інтенсивні опади, які викликали катастрофічний паводок в р. Серет та сформували найвищі за останні 100 років рівні води в руслі річки [6, 13];

- 8 липня 1999 р. трапився паводок в гірській частині річки Серет на ділянці між населеними пунктами Долішній Шепіт і Берегомет Вишницького району. Внаслідок раптової зливи в горах рівні води в річці піднялись на 3–4 м. Прорвало греблю, утворився вал води. Зруйновано 8 мостів, 10 км доріг, пошкоджено 15 садіб, затоплено 70 га городів. У низині виникла штучна водойма. Загибло 2 особи. Збитки становили близько 1,3 млн грн [16];

- 3–5 березня 2001 р. на території Закарпатської області випало дві норми місячних опадів. Рівні води в деяких річках на 1,5–2 м перевищили рівні води паводку 1998 р. Об'єм опадів, які сформували цей паводок, становив 2 млрд м<sup>3</sup> води. Паводок спричинив величезні руйнування та призвів до загибелі 9 чоловік [9];

- 23–30 липня 2008 р. відбувся паводок, який за територією охоплення був регіональним, а за наслідками – катастрофічний. 28 липня на території Львівської, Закарпатської, Тернопільської, Чернівецької та Івано-Франківської областей було підтоплено 40 601 житловий будинок і 33 882 га сільськогосподарських угідь, пошкоджено 360 автотранспортних мостів і 561 пішохідний міст, розмито 681 км автомобільних доріг, постраждало 150 тис. осіб, загинуло 38 осіб [9, 17].



Рис. 1 – Паводок в басейні Дністра на Прикарпатті у липні 2008 р.

Середньорічні збитки від паводків у 1995–1998 рр. склали 899,3 млн грн, у 1999–2007 рр. – понад 1,5 млрд грн [26], а у 2008 р. – близько 6 млрд грн [9].

Причини виникнення паводків можна поділити на дві групи: природні та антропогенні [9, 14, 15, 17]. Природними чинниками виникнення паводків є атмосферні опади, танення снігів. До антропогенних чинників слід віднести: руйнування природних стоків та порушення природного стану гірських схилів внаслідок будівництва лінійно-протяжних інженерних комунікацій, що перетинають водні джерела, незаконного видобутку піску і гравію в руслах річок тощо. Порушення природного стану гірських схилів відбувається внаслідок вирубки лісів на схилах, розорювання схилів.

Проблема захисту від паводків набуває особливого значення. Території, що знаходяться в зонах періодичного затоплення паводками і повеннями, потребують надійного захисту [4–8]. Проблема протипаводкового захисту невіддільна від загальних задач збереження та відтворення водних ресурсів, покращення якості вод та забезпечення їх екологічної безпеки при користуванні. Шляхи та способи вирішення цієї проблеми відображено у Водному кодексі України, у Директиві 2007/60/ЄР Європейського Парламенту від 23 жовтня 2007 р. «Оцінка і управління паводковими ризиками» [18], яка встановлює рамки сумісних дій держав в басейнах транскордонних річок в галузі водної політики (Рамкова Директива по воді WFD), а також в інших документах.

## 2 Критеріальні показники оцінки паводкових ризиків

Паводковий ризик – це ризик затоплення територій і шкідливого впливу паводку на умови проживання та діяльності людей в річковому басейні. Параметри паводкового ризику доцільно згрупувати за трьома узагальнюючими критеріальними (оціночними) показниками: інтенсивність паводку; зона затоплення; наслідки затоплення.

Серед критеріальних показників паводкового ризику визначальним показником є інтенсивність паводку, оскільки від нього функціонально залежать два інших критеріальних показники паводкового ризику – зона затоплення і наслідки затоплення (втрата і збиток від паводку).

Інтенсивність паводку можна визначити різними способами, наприклад шляхом порівняння максимальної витрати води  $Q_{max}$  в розрахунковому створі русла річки в паводковий період і витрати води  $Q_{меж}$  в меженний період. За першим способом інтенсивність паводку  $\eta_a$  визначають через абсолютну величину перевищення витрати  $Q_{max}$  відносно меженної витрати  $Q_{меж}$ :

$$\eta_a = Q_{max} - Q_{меж} . \quad (1)$$

Більш повну характеристику шкідливої дії паводку дає показник інтенсивності  $\eta_n$ , визначений за другим способом, у вигляді відношення витрати паводкового потоку води  $Q_{max}$  до витрати  $Q_{меж}$ :

$$\eta_n = Q_{max} / Q_{меж} . \quad (2)$$

У гідрології інтенсивність паводку прийнято визначати величиною його забезпеченості [19]. Для цього в кожному  $m$ -му році спостережень за минулий

період враховують тільки максимальну за рік витрату води  $Q_m$  в створі річки, яку розміщують в ряд (3) в порядку послідовного зменшення  $Q_m$ :

$$Q_1 \geq Q_2 \geq Q_3 \geq \dots \geq Q_m \geq \dots \geq Q_{n-1} \geq Q_n, \quad (3)$$

де  $m$  – порядковий номер року в ряду;  $n$  – кількість років спостережень.

Забезпеченість паводку  $p_m$  в  $m$ -му році визначають як ймовірність (у відсотках) перевищення витрати  $Q$  води в річці значення  $Q_m$  ( $Q > Q_m$ ) за формулою [19]:

$$p_m = \frac{m}{n+1} \cdot 100\% . \quad (4)$$

За потреби класифікувати паводки за їх інтенсивністю поставимо задачу визначення кількості паводків певної забезпеченості  $p$ , що припадає на 100 років.

Припустимо, що маємо ряд емпіричних даних витрати води в створі річки у кожному році минулого періоду протягом 100 років:

$$Q_1 \geq Q_2 \geq Q_3 \geq \dots \geq Q_t \geq \dots \geq Q_{99} \geq Q_{100} . \quad (5)$$

Забезпеченість паводку  $p_t$  в кожному  $t$ -му році періоду часу у 100 років визначиться за формулою:

$$p_t = \frac{t}{100+1} \cdot 100\% \cong \frac{t}{100} \cdot 100\% = t \cdot 1\% . \quad (6)$$

У відповідності до ряду (5) результати розрахунку  $p_t$  за формулою (6) представимо рядом (7):

$$p_1 \leq p_2 \leq p_3 \leq \dots \leq p_t \leq \dots \leq p_{99} \leq p_{100} . \quad (7)$$

Отже, забезпеченість кожного наступного паводку ряду (7), порівняно з попереднім паводком, збільшується на 1%. На періоді часу у 100 років в граничній точці ( $t = 100$ ,  $p_{100} = 100\%$ ) маємо 100 паводків, забезпеченість яких не перевищує 100%, а в граничній точці  $t = 1$ ,  $p_1 = 1\%$ ) маємо 1 паводок, забезпеченість якого не перевищує 1%.

Шляхом виділення на періоду часу у 100 років проміжних точок ряду (7) запропоновано класифікувати паводки за їх інтенсивністю (величиною забезпеченості) згідно з таблицею 1.

Оцінку паводків зазвичай виконують не за величиною їх забезпеченості  $p_t$ , розрахованою за формулою (6) при  $n = 100$ , а за величиною забезпеченості  $p_m$ , розрахованою за формулою (4) при  $n < 100$ . Оскільки визначені за формулами (4) і (6) величини забезпеченості паводків  $p_m$  і  $p_t$  є імовірнісними, вони при достатній кількості років спостережень  $n$  не будуть суттєво відрізнятись.



Таблиця 1 – Класифікація паводків за величиною їх забезпеченості

Забезпеченість паводку $p$ , %	Кількість паводків протягом 100 років, $K_{100}$	Імовірний період повторення $z_p = 100 / K_{100}$ , роки	Клас паводку	Характерна назва паводку
100	100	$100/100 = 1$	1	Малий (щорічний)
25	25	$100/25 = 4$	2	Середній
5	5	$100/5 = 20$	3	Великий
2	2	$100/2 = 50$	4	Катастрофічний
1	1	$100/1 = 100$	5	Видатний

Другим критеріальним показником паводкових ризиків є зона затоплення, яку визначають за такими параметрами: контур зони затоплення; площа затопленої території; максимальна та середня глибина затоплення в заплавах і долинах річки.

Третім критеріальним показником паводкових ризиків є наслідки затоплення, або наслідки шкідливого впливу паводків на життєдіяльність людей в річкових басейнах. Наслідки затоплення визначають за величиною втрати від паводку, а також за розміром збитку від паводку.

Втрату від паводку в річковому басейні визначають за трьома її складовими: соціальна втрата – втрата життя та здоров'я людей, а також погіршення умов проживання населення внаслідок проходження паводку; екологічна втрата – втрата первинних якісних та кількісних властивостей навколишнього середовища і природних ресурсів; економічна втрата – втрата споживчих та функціональних властивостей об'єктів матеріально-виробничої сфери.

Під збитком від паводку розуміють оцінену у грошових одиницях втрату від паводку. Отже, відповідно до втрати від паводку, визначеної у фізичних величинах за соціальною, екологічною і економічною складовими, розраховують у грошових одиницях збиток від паводку за складовими: соціальний збиток, екологічний збиток і економічний збиток.

### 3 Управління паводковими ризиками

Запропоновано розрізняти два типи протипаводкового захисту: ситуаційний і превентивний, в зв'язку з чим протипаводкові заходи слід поділяти на ситуаційні і превентивні [20].

Ситуаційні протипаводкові заходи призначені для захисту території від певного фіксованого паводку, внаслідок якого на цій території виникає надзвичайна ситуація. Управління ситуаційними заходами передбачає короткострокове прогнозування паводків за гідрологічними показниками і можливим збитком з подальшим виконанням переважно службами надзвичайних ситуацій попереджувальних, аварійно-рятувальних та ремонтно-відновлювальних заходів. До складу ситуаційних протипаводкових заходів входить: оповіщення населення; вивезення людей, тварин, коштовностей і готової продукції з території, до якої наближається паводок; термінове кріплення берегів річок і наросування дамб; додаткове кріплення доріг, мостів, електромереж і засобів зв'язку; рятувальні, медичні та санітарно-епідеміологічні

роботи; постачання населення продовольством, одягом і засобами, необхідними для виживання в екстремальних ситуаціях; роботи з відновлення споруд, локалізації та зупинки зсувів.

Превентивні протипаводкові заходи призначені для захисту територій в басейнах річок від багатьох паводків, які можуть відбуватись в майбутньому протягом досить тривалого періоду часу, який зазвичай відповідає строку служби захисних споруд. Превентивні протипаводкові заходи виконують шляхом довгострокового прогнозування паводків, проектування, будівництва та експлуатації інженерних споруд та систем захисту від паводків в річкових басейнах.

Відповідно до ділення протипаводкових заходів на ситуаційні і превентивні, управління паводковими ризиками також здійснюють за двома принципово відмінними альтернативними напрямками (варіантами): управління ситуаційними заходами і управління превентивними заходами. Загальна суміщена схема управління протипаводковими заходами наведена на рис. 2. У лівій частині схеми відображено управління ситуаційними протипаводковими заходами (рис. 1.2а), а у правій – превентивними протипаводковими заходами (рис. 1.2б).

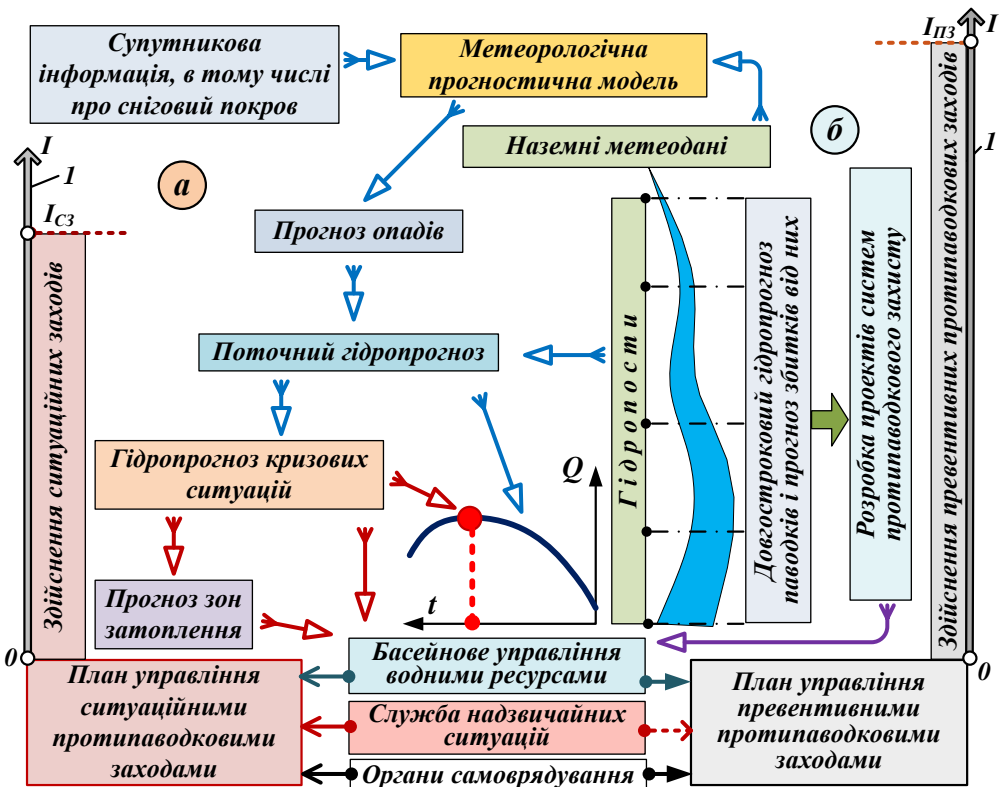


Рис. 2 – Схеми управління паводковими ризиками:  
а – управління ситуаційними протипаводковими заходами; б – управління превентивними протипаводковими заходами; I – вісь індексу ефективності протипаводкових заходів

Прийняття управлінських рішень щодо застосування певного типу протипаводкового захисту (ситуаційного чи превентивного) запропоновано здійснювати за критерієм (цільовою функцією) досягнення найбільшої величини індексу  $I$  ефективності вкладення інвестицій у захисні заходи:

$$I = \frac{BЗ_1}{B_1 + HBЗ_1} \rightarrow \max, \quad (8)$$

де  $BЗ_1$  і  $HBЗ_1$  – середньорічна сума відвернених і не відвернених протипаводковими заходами збитків від паводків, тис. грн/рік;  $B_1$  – середня сума витрат на виконання протипаводкових заходів протягом одного року, тис. грн/рік.

Вибір типу протипаводкового захисту здійснюють шляхом порівняння визначених за цільовою функцією (8) індексу  $I_{C3}$  ефективності вкладення інвестицій в ситуаційні протипаводкові заходи і індексу  $I_{ПЗ}$  ефективності вкладення інвестицій в превентивні протипаводкові заходи. Якщо для певної території в басейні паводконебезпечної річки індекс  $I_{C3}$  буде вище індексу  $I_{ПЗ}$  ( $I_{C3} > I_{ПЗ}$ ), то обирають варіант застосування ситуаційних заходів. Якщо ж навпаки ( $I_{ПЗ} > I_{C3}$ ), то для даної території слід обирати превентивні заходи. В басейнах річок Карпатського регіону найбільш ефективними є превентивні протипаводкові заходи. На територіях, де здійснено превентивний протипаводковий захист, необхідність здійснення ситуаційних заходів мінімальна, або вона зовсім відсутня.

#### 4 Короткострокове прогнозування паводків

Ефективність здійснення ситуаційних протипаводкових заходів в значній мірі залежить від своєчасного реагування на паводок, що наближується. Інформацію про наближення паводку та його імовірну інтенсивність отримують шляхом короткострокового прогнозування із застосуванням різних методів. З гідрологічної точки зору короткострокове прогнозування паводків – це один з видів гідрологічних прогнозів, за яким попередження наближення паводку можна отримати не більше, ніж за 12–15 діб до його настання. Методи короткострокового прогнозування базуються на використанні закономірностей руху води в руслах річок і закономірностей припливу (стоку) води на досліджуваних ділянках цих русел [21]. Основу короткострокового прогнозування складають розрахунки переміщення і трансформації водного потоку під час його проходження окремими ділянками русел. За результатами короткострокових прогнозів видається інформація про очікувані максимальні витрати і рівні води у вигляді гідрографів – залежності у часі витрати води.

Розрізняють ручні і автоматизовані методи контролю рівнів паводкових вод, які використовують програмне і апаратне забезпечення [9].

Ручні методи передбачають вимірювання з участю гідролога рівня води в певному створі русла річки за допомогою лінійок з подальшою передачею інформації у систему її обробки.

Автоматизовані методи контролю поділяють на прямі та дистанційні.

Прямі автоматизовані методи контролю рівня води здійснюють з використанням автоматизованих датчиків рівня води та автоматизованих вимірювальних станцій (рис. 3).



Рис. 3 – Автоматизовані вимірювальні станції інформаційно-вимірювальної системи «Тиса», призначеної для короткострокового прогнозу паводків в басейні р. Тиса на Закарпатті [22]: *а* – на р. Біла Тиса у с. Луги; *б* – на р. Ріка у смт Міжгір'я; 1 – водомірна рейка вертикальна; 2 – водомірна рейка похила

У Басейновому управлінні водних ресурсів річки Тиса впроваджена автоматизована інформаційно-вимірювальна система (АІВС) «Тиса» [22], яка призначена для:

- оперативного прогнозування гідрографів паводків на ріках басейну за допомогою спеціального математичного, інформаційного і програмного забезпечення;
- підготовки достовірної прогнозної інформації про параметри паводку і передачі її в автоматичному режимі відповідним службам оповіщення і протипаводковим підрозділам;
- видачі рекомендацій для прийняття рішень щодо безаварійного пропуску паводків.

Зараз знаходиться на стадії розробки і впровадження інформаційно-вимірювальна система «Прикарпаття». Основне призначення системи – прогнозування розвитку паводків в басейнах річок Дністер, Прут і Серет на території семи областей: Чернівецької, Івано-Франківської, Львівської, Вінницької, Тернопільської, Хмельницької та Одеської. Система здійснює прогнозування розвитку паводків, автоматизоване спостереження за опадами, рівнями води в річках, передачу інформації в режимі реального часу в центри обробки інформації для своєчасного оповіщення населення та прийняття заходів реагування [9].

До дистанційних методів вимірювання належать методи вимірювання рівнів води із застосуванням засобів авіації (літаки, гелікоптери), а також космічних (супутникових) систем.

В процесі короткострокового прогнозування паводків результати контролю рівнів води ручними чи автоматичними методами потребують певної математичної обробки. Для цього використовують:

- інноваційний алгоритм поділення зображення на класи «суходіл»/«вода», який базується на концепції нечітких множин та використанні міри когерентності [23];
- нейромережевий метод картографування паводків на основі супутникових зображень [24];

– метод оперативного прогнозування паводків за даними наземних і радіолокаційних вимірювань опадів, за яким забезпечується можливість обробити інформацію про опади на великій площі [9].

### 5 Довгострокове прогнозування паводків

Довгострокове прогнозування паводків зазвичай виконують для передбачення масштабів дії паводків у майбутньому та оцінки ефективності проектів систем превентивного протипаводкового захисту в річкових басейнах.

Методики довгострокового прогнозування паводків базуються на визначенні максимальних витрат води в руслах і кількості паводків певної забезпеченості, а також можливих збитків від паводків в басейнах річок на періоді часу, що відповідає строку експлуатації протипаводкових систем (30–50 років). Слід відзначити недосконалість відомих методик довгострокового прогнозування. Так, наприклад, за методикою нечіткого прогнозування очікуваних збитків від паводків на основі екстраполяцій кінцевим результатом прогнозування є математично формалізовані нечіткі множини, які через недостатню детермінацію потребують використання експертних оцінок [9, 25].

Пропонується методика довгострокового прогнозування паводків, в основу якої покладено незмінність тенденції (тренду) розвитку паводкових ситуацій в річкових басейнах протягом певного періоду, що охоплює як минулі, так і майбутні роки. Використання даної методики вимагає наявності належного архіву спостережень під час проходження паводків минулих років та його постійного ведення у майбутньому службами гідрології та надзвичайних ситуацій.

Довгострокове прогнозування паводків виконують поетапно, використовуючи інформацію про результати спостережень паводків, які після її обробки зводять у таблицю 2.

Таблиця 2 – Зведення результатів спостережень проходження паводків за минулий період

Критеріальні показники	Параметри		Роки спостережень					№ рядка	
	Назва	Од. виміру	1	...	<i>m</i>	...	<i>n</i>		
Інтенсивність паводку	Витрата води	м <sup>3</sup> /с	$Q_1$	...	$Q_m$	...	$Q_n$	1	
	Забезпеченість паводку	%	$p_1$	...	$p_m$	...	$p_n$	2	
Зона затоплення	Контур зони затоплення	*згідно зі схемою	*	...	*	...	*	3	
	Площа затопленої території	тис. м <sup>2</sup>	$S_1$	...	$S_m$	...	$S_n$	4	
	Глибина затоплення	максимальна	м	$h_1^{max}$	...	$h_m^{max}$	...	$h_n^{max}$	5
		середня	м	$h_1^{cp}$	...	$h_m^{cp}$	...	$h_n^{cp}$	6
Наслідки затоплення	Втрата від паводку	соціальна	**згідно	**	...	**	...	**	7
		екологічна	з актом	**	...	**	...	**	8
		економічна	обстеження	**	...	**	...	**	9
		загальна	наслідків паводку	**	...	**	...	**	10
	Збиток від паводку	соціальний	тис. грн/рік	$Z_{11}^{Cц}$	...	$Z_{1m}^{Cц}$	...	$Z_{1n}^{Cц}$	11
		екологічний		$Z_{11}^{Eкл}$	...	$Z_{1m}^{Eкл}$	...	$Z_{1n}^{Eкл}$	12
		економічний		$Z_{11}^{Eкн}$	...	$Z_{1m}^{Eкн}$	...	$Z_{1n}^{Eкн}$	13
		загальний		$Z_{11}$	...	$Z_{1m}$	...	$Z_{1n}$	14

Етап 1. «Визначення розрахункового (критеріального) створу річки».

Розрахунковим вважають створ річки, в якому динаміка зміни гідрологічних показників найбільш точно відображає динаміку зміни параметрів зони затоплення 3 (рис. 4) і наслідків проходження паводку. Розрахунковий створ можна вважати ще й критеріальним, оскільки витрата  $Q_m$  паводкового потоку в ньому є гідрологічним критерієм оцінки паводку, від якого залежать інші критеріальні показники паводку: зона затоплення і наслідки затоплення в басейні річки у  $m$ -му році. Розрахунковий створ обирають в одному з найближче розташованих до зони затоплення створів, обладнаних гідрологічним постом. Розрахунковим може бути створ річки як на початку (поз. 7 на рис. 4), так і в кінці (поз. 8 на рис. 4) зони затоплення 3. При цьому периметр контуру зони затоплення є варійованим і залежить від забезпеченості паводку. Мінімальна зона затоплення з контуром 4 утворюється внаслідок проходження щорічного весняного паводку забезпеченості  $p_{max} = 100\%$ . Максимальна зона затоплення з контуром 5 утворюється внаслідок проходження найбільш інтенсивного паводку забезпеченості  $p_{min}$  (рис. 4). Вибір розрахункового створу річки здійснюють залежно від характеру припливу паводкових вод до зони затоплення. Якщо приплив паводкових вод до зони затоплення 3 відбувається тільки через русло річки 1, яка не має притоки 2, розрахунковим вважають створ 7. Якщо приплив паводкових вод до зони затоплення відбувається як через русло річки 1, так і через русло притоки 2, розрахунковим вважають створ 8 (рис. 4). У будь-якому разі з двох створів (7 або 8) за розрахунковий обирають створ, у якому витрата води більша.

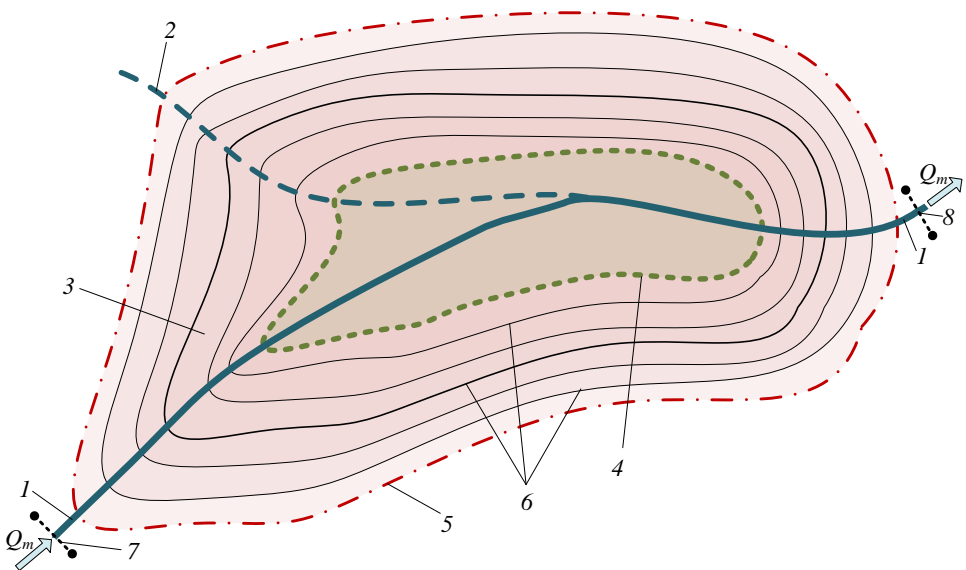


Рис. 4 – Схема затопленої території, залежно від інтенсивності паводку:

- 1 – річка; 2 – притока річки; 3 – зона затоплення з варійованим контуром залежним від забезпеченості паводку; 4 – контур зони затоплення щорічним весняним паводком забезпеченості  $p_{max} = 100\%$ ; 5 – контур зони затоплення найбільш інтенсивним паводком забезпеченості  $p_{min}$ ; 6 – контур зони затоплення, залежний від забезпеченості паводку  $p$  ( $p_{max} > p > p_{min}$ ); 7 – розрахунковий створ русла річки, якщо її притоки впадають в річку поза зоною затоплення; 8 – розрахунковий створ русла річки, якщо притоки впадають в річку в зоні затоплення

Етап 2. «Аналіз та обробка результатів гідрологічних досліджень паводків за минулий період».

Визначають інтенсивність паводків за  $n$  років спостережень минулого періоду. Для цього ряд (3) результатів вимірювань витрати води  $Q_m$  у розрахунковому створі річки заносять до рядка 1 таблиці 2. Результати розрахунків за формулою (4) забезпеченості паводків заносять до рядка 2 таблиці 2. За експериментальними точками  $(Q_m, p_m)$  рядків 1 і 2 таблиці 2 будують емпіричну криву 2 залежності  $Q(p)$  (рис. 5).

Зваживши на недостатню кількість емпіричних точок 1 (рис. 5) та можливі похибки їх визначення, результати гідрологічних вимірювань згладжують, замінюючи емпіричну криву 2 теоретичною кривою 3. Теоретична крива 3 є графіком спадної функції  $Q = f_1(p)$ , яку можна представити гіперболою такого виду:

$$Q = \frac{k_1}{p} + k_2 \quad (9)$$

Для обробки емпіричних точок  $(Q_m, p_m)$  за методом найменших квадратів доцільно позначити:  $1/p = x$ ;  $1/p_m = x_m$ . Це дає можливість замінити гіперболічну функцію (9) лінійною функцією (10):

$$Q = f_1(x) = k_1 x + k_2 \quad (10)$$

Для визначення невідомих коефіцієнтів  $k_1$  і  $k_2$  функції (10) складають функцію неузгодженості  $\Phi(k_1, k_2)$  та знаходять її мінімальне значення:

$$\Phi(k_1, k_2) = \sum_{m=1}^n (Q_m - (k_1 x_m + k_2))^2 \rightarrow \min \quad (11)$$

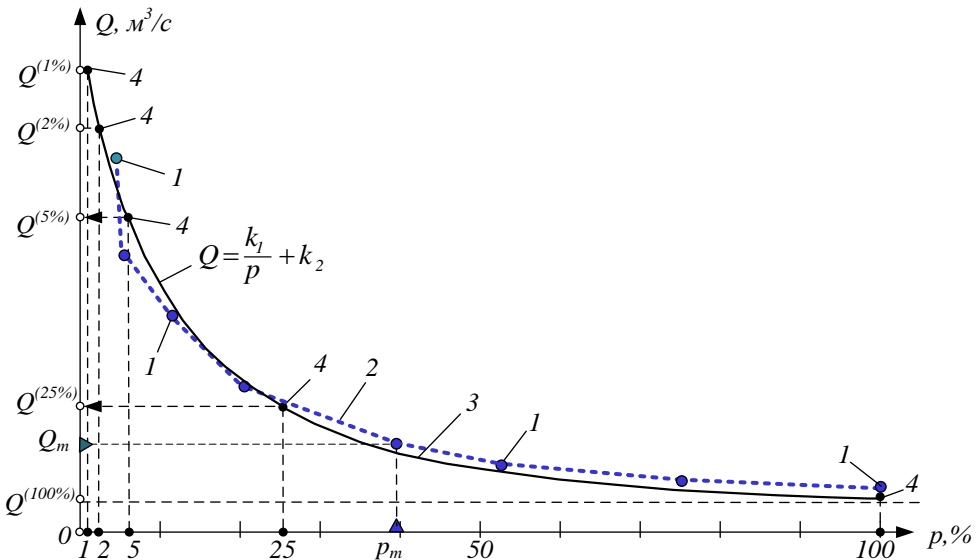


Рис. 5 – Результати гідрологічних досліджень в розрахунковому створі русла річки:  
 1 – емпіричні точки  $(Q_m, p_m)$ ; 2 – емпірична крива  $Q(p)$ ; 3 – теоретична крива  $Q = f_1(p)$ ;  
 4 – точки на теоретичній кривій, що відповідають п'ятьом встановленим класам паводків

Після математичних перетворень невідомі коефіцієнти  $k_1$  і  $k_2$  лінійної функції (10), а отже і гіперболічної функції (9), знаходять з системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1 = \frac{n \sum_{m=1}^n x_m Q_m - \sum_{m=1}^n x_m \cdot \sum_{m=1}^n Q_m}{n \sum_{m=1}^n x_m^2 - \left( \sum_{m=1}^n x_m \right)^2}; \\ k_2 = \frac{\sum_{m=1}^n Q_m - k_1 \sum_{m=1}^n x_m}{n} \end{array} \right. \quad (12)$$

Встановивши значення  $k_1$  і  $k_2$  з (12) по розрахункових точках, основними з яких є точки 4, що відповідають п'ятьом виділеним класам паводків, будують теоретичну криву 3 функції (9).

Етап 3. «Аналіз та обробка емпіричних даних наслідків проходження паводків за минулий період».

Використовуючи дані спостережень проходження паводків в річковому басейні, визначають параметри зони затоплення у минулих роках: контур зони затоплення; площу затопленої території; максимальну і середню глибину затоплення. Ці параметри заносять до рядків 3–6 таблиці 2.

Потім для зони затоплення у кожному році спостережень визначають наслідки – втрату і збиток від паводків. Втрату від паводку визначають у фізичних показниках згідно з актами обстеження наслідків проходження паводку за складовими: соціальна, екологічна, економічна і загальна втрата.

До соціальних аспектів втрати від паводку відносять: втрату життя та здоров'я населення; втрату, пов'язану з порушенням постачання населення продовольчими та промисловими товарами внаслідок ускладнення транспортних перевезень; втрату комфортних умов проживання населення; втрату можливості потрапити на роботу; втрату можливості здійснення особистих планів людей тощо.

До екологічних аспектів втрати від паводку відносять втрату первинних якісних та кількісних властивостей: навколишнього середовища (гідросфера, літосфера, рослини, тварини); природних ресурсів (земельних, водних, лісових та інших); природно-охоронних зон (рекреаційних, заповідних).

До економічних втрат від паводку відносять втрати підприємств та господарств: основних фондів; обігових фондів; готової промислової продукції; сільськогосподарської продукції; худоби тощо.

Загальну втрату від паводків минулого періоду за її складовими фіксують у рядках 7–10 таблиці 2.

Довгострокове прогнозування здійснюють за розміром загальних збитків від паводків, що можуть відбутись у майбутньому. Загальний збиток від кожного паводку  $m$ -го року минулого періоду визначають за його складовими:

$$Z_{1m} = Z_{1m}^{cu} + Z_{1m}^{екл} + Z_{1m}^{екн}, \quad (13)$$



де  $Z_{1m}$  – збиток від паводку загальний, тис. грн/рік;  $Z_{1m}^{сч}$ ,  $Z_{1m}^{екл}$  і  $Z_{1m}^{екн}$  – збиток від паводку соціальний, екологічний і економічний, тис. грн/рік.

Соціальний, екологічний, економічний і загальний збиток від паводку визначають у грошових одиницях в індексах цін на момент виконання процедури довгострокового прогнозування паводків. Для розрахунку загального збитку від паводку  $Z_{1m}$  використовують два методичних підходи, які обирають залежно від попередньо визначеної у  $m$ -му році інформації про паводок.

Якщо у  $m$ -му році був встановлений загальний збиток від паводку в цінах  $m$ -го року, то загальний збиток за всіма його складовими визначають шляхом дисконтування за формулою:

$$Z_{1m} \leftrightarrow Z_{1m}^{\tau} = Z_{1m}^m (1+\varepsilon)^{(\tau-m)}, \quad (14)$$

де  $\tau$  – індекс року виконання довгострокового прогнозування або розробки проекту превентивного протипаводкового захисту;  $Z_{1m}$  ( $Z_{1m}^{\tau}$ ) – загальний збиток від паводку, оцінений на момент часу довгострокового прогнозування, тис. грн/рік;  $Z_{1m}^m$  – загальний збиток від паводку, який був оцінений у минулому  $m$ -му році, тис. грн/рік;  $\varepsilon$  – коефіцієнт дисконтування;  $(\tau-m)$  – проміжок часу від минулого  $m$ -го до розрахункового  $\tau$ -го року, рік.

Якщо у  $m$ -му році не було встановлено величину загального збитку від паводку, або ця величина була визначена орієнтовно з певними похибками, проте фізичні показники наслідків (втрати від паводку) були зафіксовані з достатньою точністю, то складові загального збитку від паводків доцільно розраховувати за величиною втрат від паводку, користуючись методиками [26, 27].

Величини збитків від паводків минулих років заносять до рядків 11–14 таблиці 2. За даними рядків 2 і 14 таблиці 2, отримують ряд (15) емпіричних точок  $(Z_{1m}, p_m)$ :

$$(Z_{11}, p_1), (Z_{12}, p_2), \dots, (Z_{1m}, p_m), \dots, (Z_{1(n-1)}, p_{n-1}), (Z_{1n}, p_n). \quad (15)$$

За емпіричними точками ряду (15) будують емпіричну криву 2 залежності  $Z_1(p)$  (рис. 6).

Використовуючи емпіричні точки ряду (15), за методом найменших квадратів визначають теоретичну залежність загальних збитків  $Z_1$  від забезпеченості паводків у вигляді функції  $Z_1 = f_2(p)$ , яку також, як і функцію витрат води  $Q = f_1(p)$ , вважають спадною гіперболічною функцією:

$$Z_1 = \frac{k_3}{p} + k_4. \quad (16)$$

Невідомі коефіцієнти  $k_3$  і  $k_4$  функції (16) знаходять за методом найменших квадратів за тією ж процедурою, за якою були визначені коефіцієнти  $k_1$  і  $k_2$  функції (9).

Прогнозування загальних збитків від паводків  $Z_1$  у вигляді гіперболічної функції (16) дає змогу, використовуючи статистичні дані відносно невеликої кількості паводків минулого періоду, визначати збитки від будь-яких можливих паводків майбутнього періоду за величиною їх забезпеченості.

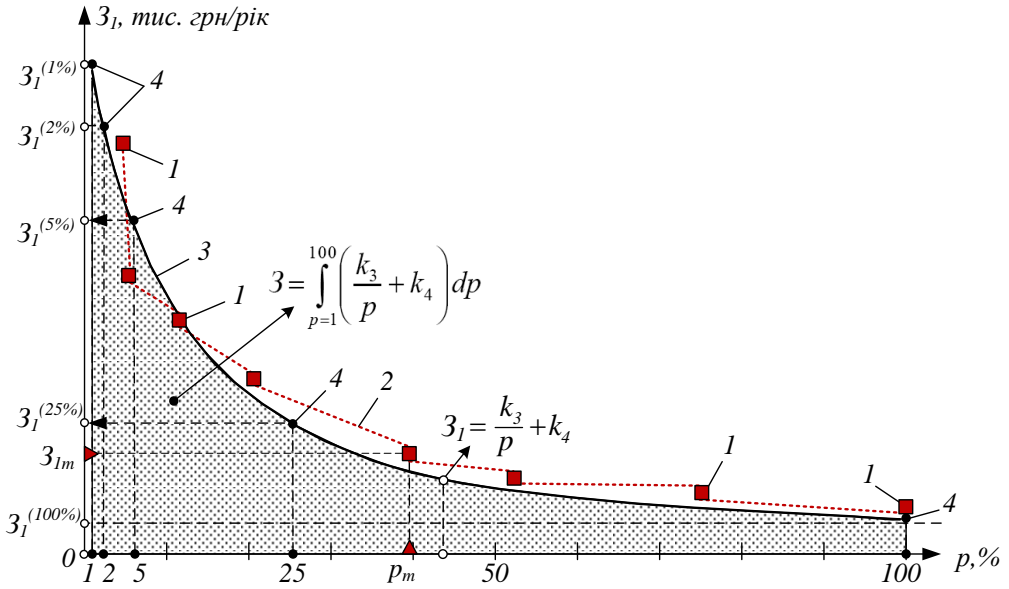


Рис. 6 – Результати досліджень збитків від паводків в зоні затоплення:  
 1 – емпіричні точки ( $Z_{1m}, p_m$ ); 2 – емпірична крива  $Z_1(p)$ ; 3 – теоретична крива  $Z_1 = f_2(p)$ ;  
 4 – точки на теоретичній кривій, що відповідають п'ятьом встановленим класам паводків

Етап 4. «Визначення середньорічних збитків від паводків в зоні затоплення».

Обраний період часу довгострокового прогнозування ( $t = 1 \dots 100$  років) відповідає діапазону зміни величини забезпеченості паводків ( $p = 1 \dots 100\%$ ). Це дає змогу визначити загальний прогнозований збиток в зоні затоплення шляхом інтегрування функції  $Z_1$  по аргументу  $p$ :

$$Z_T = \int_{p=1}^{100} \left( \frac{k_3}{p} + k_4 \right) dp = (k_3 \ln p + k_4 p) \Big|_1^{100} = k_3 \ln 100 + k_4 99, \quad (17)$$

де  $Z_T$  – загальна величина збитків протягом розрахункового періоду  $T$  від можливих паводків різних класів інтенсивності – від особливо видатного ( $p = 1\%$ ) до малого ( $p = 100\%$ ), тис. грн.

Наукова обґрунтованість методичного підходу визначення прогнозованої величини збитків від паводків шляхом інтегрування за формулою (17) підтверджується дотриманням в процесі інтегрування основного принципу дослідження паводків, прийнятого в гідрології [19], а саме, врахуванням протягом одного року тільки одного найбільш інтенсивного паводку.

Нижньою межею інтегрування обрано забезпеченість паводку  $p = 1$ , тому відповідно до цього в розрахунках збитків від паводків перший рік ( $t = 1$ ) з загального періоду часу довгострокового прогнозування ( $T = 100$ ) вилучають. Отже, середньорічний збиток від паводку протягом періоду часу довгострокового прогнозування визначають за формулою:

$$[Z_I] = \frac{Z_T}{T-1} = \frac{k_3 \ln 100}{99} + k_4, \quad (18)$$

де  $[Z_I]$  – середньорічний збиток від паводку в зоні затоплення, тис. грн/рік.

Етап 5. «Оцінка ефективності заходів превентивного протипаводкового захисту».

Забезпеченість паводків, що спостерігались в Україні у минулих роках, зазвичай знаходилась в межах  $1\% \leq p \leq 100\%$ . Тому для досягнення надійного превентивного протипаводкового захисту зон затоплення проекти захисних споруд розроблюють на паводок розрахункової забезпеченості  $p_p = 1\%$ .

Позитивний ефект здійснення заходів превентивного протипаводкового захисту оцінюють розміром в зоні затоплення відвернених (протипаводковими заходами) збитків:  $BZ_I$ ,  $BZ_T$ ,  $[BZ_I]$  і  $BZ_C$ .

$BZ_I$  – річний відвернений збиток, який за величиною дорівнює збитку  $Z_I$  і тому може бути розрахований за формулою (16).

$BZ_T$  – збитки, що будуть відвернені протягом розрахункового періоду  $T$  довгострокового прогнозування. Відвернені збитки  $BZ_T$  за величиною дорівнюють збиткам  $Z_T$  і можуть бути розраховані шляхом інтегрування за формулою (17).

$[BZ_I]$  – середньорічний відвернений збиток, який за величиною дорівнює збитку  $[Z_I]$  і може бути розрахований за формулою (18).

$BZ_C$  – відвернені збитки, що очікуються протягом розрахункового строку експлуатації захисних протипаводкових споруд. Відвернені збитки  $BZ_C$  розраховують за формулою:

$$BZ_C = [BZ_I] T_C = \left( \frac{BZ_T}{T-1} \right) T_C = \left( \frac{k_3 \ln 100}{99} + k_4 \right) T_C, \quad (19)$$

де  $T_C$  – розрахунковий строк експлуатації захисних протипаводкових споруд, рік.

Економічний ефект здійснення превентивних протипаводкових заходів визначають за формулою:

$$E = BZ_C - (K_C + b_e T_C), \quad (20)$$

де  $K_C$  – капіталовкладення у будівництво протипаводкових споруд, тис. грн;  $b_e$  – річні витрати, пов'язані з утриманням та експлуатацією споруд, тис. грн/рік.

Річний економічний ефект превентивних протипаводкових заходів визначають за формулою:

$$EI = E/T_C = [BZ_I] - (K_C/T_C + b_e). \quad (21)$$

Індекс ефективності  $I_{II3}$  вкладення інвестицій у превентивні протипаводкові заходи в кінці розрахункового строку  $T_C$  експлуатації захисних протипаводкових споруд визначають за формулою:

$$I_{\text{ПЗ}} = \frac{B3_C}{K_C + b_e T_C} \quad (22)$$

Для визначення строку окупності інвестицій у превентивні протипаводкові заходи індекс ефективності  $I_t$  вкладення інвестицій визначають функцією по аргументу  $t$  ( $1 \leq t \leq T_C$ ):

$$I_t = \frac{[B3_l]t}{K_C + b_e t} \quad (23)$$

Окупність інвестицій у протипаводкові заходи досягається за умови:  $I_t = 1$ ;  $t = t_{\text{ок}}$ . Маємо рівняння:

$$1 = \frac{[B3_l]t_{\text{ок}}}{K_C + b_e t_{\text{ок}}} \quad (24)$$

З рівняння (24) отримують формулу розрахунку строку  $t_{\text{ок}}$  окупності інвестицій:

$$t_{\text{ок}} = \frac{K_C}{\frac{k_3 \ln 100}{99} + k_4 - b_e} = \frac{K_C}{0,0465k_3 + k_4 - b_e} \quad (25)$$

## Висновки

1. В Україні, незважаючи на загальний дефіцит водних ресурсів, існує проблема паводків, яка в Карпатському регіоні має особливо небезпечний характер, що підтверджується статистикою паводкових ситуацій за минулий період, починаючи з кінця XIX століття.

2. Проблема паводків в Україні зумовлена двома головними чинниками – нерівномірністю розподілу річкового стоку по території країни і нерівномірністю випадання опадів протягом року.

3. Залежно від інтенсивності паводків, визначеної за величиною їх забезпеченості, запропоновано розрізняти п'ять класів паводків: малі; середні; великі; катастрофічні і видатні.

4. Виділено два основних типи протипаводкового захисту – ситуаційний і превентивний, в зв'язку з чим протипаводкові заходи поділено на ситуаційні і превентивні.

5. Управління протипаводковим захистом ситуаційного типу передбачає короткострокове (менше 12–15 днів) прогнозування паводку і наступне реагування на нього шляхом послідовного виконання: попереджувальних заходів в період наближення паводку; аварійно-рятувальних заходів в період проходження паводку; аварійно-відновлювальних заходів після проходження паводку.

6. Управління протипаводковим захистом превентивного типу передбачає довгострокове з завчасністю до 100 років прогнозування паводків та наступне

здійснення протипаводкових заходів шляхом будівництва і експлуатації протипаводкових споруд в басейнах паводконебезпечних річок.

7. Оцінку паводкових ризиків запропоновано здійснювати за гідрологічними показниками припливу паводкових вод і їх витоків із зони затоплення, а також за показниками соціальних, екологічних і економічних наслідків в зоні затоплення.

8. Основним показником наслідків проходження паводку встановлено загальний збиток, який запропоновано визначати у вигляді суми соціального, екологічного і економічного збитків, розрахованих за відповідними методиками у грошових одиницях.

9. Прийняття управлінських рішень щодо здійснення в басейні паводконебезпечної річки ситуаційного чи превентивного типу протипаводкового захисту запропоновано здійснювати за величиною індексу ефективності інвестицій, який представлено у вигляді відношення суми відвернених збитків до суми інвестиційних витрат на здійснення протипаводкових заходів.

10. Наголошено про відсутність досконалих методів довгострокового прогнозування паводків, в зв'язку з чим розроблено та запропоновано для науково-практичного використання методу, в основу якої покладено незмінність тенденції (тренду) розвитку паводкових ситуацій в річкових басейнах протягом періоду часу, що охоплює як минулі, так і майбутні роки.

11. Довгострокове прогнозування паводкових ризиків за гідрологічними показниками запропоновано здійснювати шляхом апроксимації результатів гідрологічних спостережень за минулі роки спадною гіперболічною функцією максимальних у кожному році витрат паводкових потоків по аргументу забезпеченості паводків на інтервалі від 1% до 100%.

12. Довгострокове прогнозування паводкових ризиків за показниками наслідків від паводків запропоновано здійснювати шляхом аналізу статистичних даних соціальних, екологічних і економічних наслідків від паводків за минулі роки та апроксимації загального збитку від паводків спадною гіперболічною функцією по аргументу забезпеченості паводків на інтервалі від 1% до 100%.

13. Основним розрахунковим показником довгострокового прогнозування паводкових ризиків визначено прогнозовану суму загальних збитків від паводків на майбутні 99 років, яку запропоновано визначати шляхом інтегрування гіперболічної функції загального збитку від паводків.

14. Показниками захисного протипаводкового ефекту превентивних заходів визначено: суму загальних відвернених збитків протягом майбутніх 99 років; середньорічний відвернений збиток; суму загальних відвернених збитків протягом розрахункового строку експлуатації захисних споруд.

15. Основним показником ефективності протипаводкового захисту превентивного типу обрано індекс ефективності інвестицій, який запропоновано визначати діленням відвернених збитків, що очікуються в кінці розрахункового строку експлуатації захисних споруд, на суму вкладених у протипаводковий захист інвестицій, строк окупності яких визначають періодом часу експлуатації споруд, за який загальна сума відвернених збитків буде дорівнювати сумі вкладених інвестицій.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. StatInfo.biz – Международная экономическая статистика [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://statinfo.biz/Data.aspx?act=6467&lang=1>.
2. Петроченко А. В. Проблема дефицита воды и паводков в Украине / А. В. Петроченко // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия / ФГБНУ «РосНИИПМ» – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2018 – Вып. 3(71). – С. 133–140.
3. Сусідко М.М. Районування території України за ступенем гідрологічної небезпеки / М.М. Сусідко, О.І. Лук'янець // Наук. праці УкрНДГМІ. – 2004. – Вип. 253. – С. 196–202.
4. Алексеев Н.А. Стихийные явления в природе: проявление, эффективность защиты / Н.А. Алексеев. – М.: Мысль, 1988. – 254 с.
5. Нежиховский Р.А. Наводнения на реках и озерах / Р.А. Нежиховский. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 184 с.
6. Швец Г.И. Выдающиеся гидрологические явления на юго-западе СССР / Г.И. Швец. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 512 с.
7. Козьменко С.Н. Экономика катастроф (инвестиционные аспекты) / С.Н. Козьменко. – Киев: Наукова думка. – 1997. – 2004 с.
8. Протипаводковий захист. Інформаційно-аналітична довідка щодо проблем комплексного протипаводкового захисту територій регіонів України від катастрофічних паводків та мінімізації збитків від шкідливої дії вод [Електронний ресурс] : Протипаводковий захист / Державне агентство водних ресурсів України. Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://www.scwm.gov.ua/index.php>.
9. Заміховський Л.М. Аналіз методів і систем контролю та прогнозування рівня паводкових вод / Л.М. Заміховський, О.І. Клапоушак // Нафтогазова енергетика. – 2011. – №2(15). – С. 99–105.
10. Перехрест С.М. Шкідливі стихійні явища в Українських Карпатах та засоби боротьби з ними / С.М. Перехрест, С.Г. Кочубей, О.М. Печковська. – Київ: Наукова думка, 1971. – 200 с.
11. Савчук Д. П. Особливості повеней, паводків та захисту від них у Карпатському регіоні / Д.П. Савчук // Водне господарство України. – 2010. – № 5. – С. 46–49.
12. Карпенко Ю.О. Топоніміка Буковини / Ю.О. Карпенко. – Київ: Наукова думка, 1973. – 238 с.
13. Беднарчик Л.І. Аналіз змін паводкового режиму р. Серет в межах Чернівецької області протягом 1953-2005 років // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2007. – Т.13. – С. 87–94.
14. Дячук В.А. Паводки в Закарпатті та причини їх виникнення / В.А. Дячук, М.М. Сусідко // Укр. географ. журн. – 1999. – №1. – С. 47–50.
15. Условия формирования и прохождения катастрофических паводков на реках Карпат в июне 1969 года (Технический отчет) / Под ред. П.М. Лютика, Б.М. Штейнгольца. – Киев: ГУ ГМС при СМ СССР, 1970. – 54 с.
16. Стихійні метеорологічні явища на території України за останнє двадцятиріччя (1986-2005 рр.) / Колектив авторів. За ред. В.М. Ліпінського, В.І. Осадчого, В.М. Бабіченко. – Київ: Ніка-Центр, 2006. – 312 с.
17. Коваленко П.І. Наукові засади комплексного протипаводкового захисту Прикарпатського регіону / П.І. Коваленко, М.І. Ромащенко, Ю.О. Михайлов, Д.П. Савчук // Водне господарство України. – 2008. – №5. – С. 10–23.
18. Директива № 2007/60 / ЄС Європейського парламенту і Ради ЄС про оцінку і управління ризиками, пов'язаними з повенями (Страсбург, 23 жовтня 2007 року).
19. Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л.: Госметеиздат, 1984. – 447 с.
20. Петроченко В.И. Научно-методическое обоснование систем превентивной противопаводковой защиты территорий в бассейнах рек / В.И. Петроченко,

- А.В. Петроченко // Вестник Брестского государственного технического университета – 2018. – №2(110): Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика – С. 44–48.
21. Прогнозирование наводнений [Электронный ресурс]: Прогнозирование наводнений / Академия ГПС МЧС России. Официальный сайт – <http://www.agpps-mipb.ru/index.php/2011-01-08-07-37-51/426-prognosirovanie-navodnenij.html>.
22. Басейнове управління водних ресурсів річки Тиса [Електронний ресурс] : Державне агентство водних ресурсів України. Офіційний сайт. Режим доступу: [http://www.vodhosp.uzhgorod.ua/aivs\\_tisa.html](http://www.vodhosp.uzhgorod.ua/aivs_tisa.html).
23. Dellepiane S. Coastline extraction from SAR images and a method for the evaluation of the coastline precision // De Laurentiis R., Giordano F. – Pattern Recognition Letters. – 2004. – № 25. – P. 1461–1470.
24. Скакун С. В. Нейромережевий метод картографування повеней на основі супутникових зображень / С.В. Скакун // Наукові праці ДонНТУ. – 2001. – Вип. 10 (153). – С. 52–58. – Серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка".
25. Стефанишин Д.В. Використання методу екстраполяції при прогнозуванні рівнів води в річці, де відбувається трансформація русла, з врахуванням ризику / Д.В. Стефанишин, Ю.Д. Стефанишина // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП. – 2005. – Вип. 30 – С. 107–116.
26. Методика оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру. Затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 15 лютого 2002 р. № 175.
27. Петроченко В.І. Еколого-економічна ефективність протипаводкових заходів / В.І. Петроченко, В.А. Сташук. – К.: ДІУЕВР. – 2009. – 62 с.

Стаття надійшла до редакції 11.12.2019 і прийнята до друку після рецензування 14.02.2020

## REFERENCES

1. StatInfo.biz – Mezhdunarodnaya ekonomicheskaya statistika. (n.d.). Retrieved from <http://statinfo.biz/Data.aspx?act=6467&lang=1>. (in Russian)
2. Petrochenko, A.V. (2018). Problema defitsita vody i pavodkov v Ukraine [The problem of water and flood shortages in Ukraine]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshayemogo zemledeliya*, 3(71), 133-140. (in Russian)
3. Susidko, M.M., & Lukianets, O.I. (2004). Raionuvannia terytorii Ukrainy za stupenem hidrohichnoi nebezpeky [Zoning of the territory of Ukraine by the degree of hydrological danger]. *Naukovi pratsi UkrNDHMI*, 253, 196-202. (in Ukrainian)
4. Alekseyev, N.A. (1988). *Stikhiynnye yavleniya v prirode: proyavleniye, effektivnost' zashchity* [Natural phenomena in nature: manifestation, protection effectiveness]. Moskva: Mysl'. (in Russian)
5. Nezhikhovskiy, R.A. (1988). *Navodneniya na rekakh i ozerakh* [Floods on rivers and lakes]. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russian)
6. Shvets, G.I. (1972). *Vydayushchiyesya gidrologicheskiye yavleniya na yugo-zapade SSSR* [Outstanding hydrological phenomena in the south-west of the USSR]. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russian)
7. Koz'menko, S.N. (1997). *Ekonomika katastrof (investitsionnyye aspekty)* [Disaster Economics (Investment aspects)]. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
8. Protypavodkovyi zakhyst. Informatsiino-analitychna dovidka shchodo problem kompleksnoho protypavodkovoho zakhystu terytorii rehioniv Ukrainy vid katastrofichnykh pavodkiv ta minimizatsii zbytkiv vid shkidlyvoi dii vod. (n.d.). Derzhavne ahentstvo vodnykh resursiv Ukrainy. Retrieved from <http://www.scwm.gov.ua/index.php>. (in Ukrainian)

9. Zamikhovs'kyi, L.M., & Klapoushchak, O.I. (2011). Analiz metodiv i system kontrolyu ta prohnozuvannya rivnya pavodkovykh vod [Analysis of methods and systems for flood water level control and forecasting]. *Naftohazova enerhetyka*, 2(15), 99-105. (in Ukrainian)
10. Perekhrest, S.M., Kochubey, S.H., & Pyechkovs'ka, O.M. (1971). *Shkidlyvi stykhiyni yavyscha v Ukrayins'kykh Karpatakh ta zasoby borot'by z nymy* [Natural disasters in the Ukrainian Carpathians and how to combat them]. Kyiv : Naukova dumka. (in Ukrainian)
11. Savchuk, D.P. (2010). Osoblyvosti povenei, pavodkiv ta zakhystu vid nykh u Karpatskomu rehioni [Features of floods, floods and protection against them in the Carpathian region]. *Vodne hospodarstvo Ukrainy*, 5, 46-49. (in Ukrainian)
12. Karpenko, Yu.O. (1973). *Toponimika Bukovyny* [Toponymics of Bukovina]. Kyiv: Naukova dumka. (in Ukrainian)
13. Bednarchyk, L.I. (2007). Analiz zmin pavodkovoho rezhymu r. Seret v mezhakh Chernivetskoj oblasti protiahom 1953-2005 rokiv [Analysis of changes in the flood regime of the river Seret in the Chernivtsi region during 1953-2005]. *Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroekolojiia*, 13, 87-94. (in Ukrainian)
14. Diachuk, V.A., & Susidko, M.M. (1999). Pavodky v Zakarpatti ta prychny yikh vynyknennia [Floods in Transcarpathia and their causes]. *Ukrainian Geographical Journal*, 1, 47-50. (in Ukrainian)
15. Lyutik, P.M., & Shteyngol'ts, B.M. (Eds.). (1970). *Usloviya formirovaniya i prokhozheniya katastroficheskikh pavodkov na rekakh Karpat v iyune 1969 goda (Tekhnicheskij otchet)* [Conditions for the formation and passage of catastrophic floods on the Carpathian rivers in June 1969 (Technical Report)]. Kyiv: GU GMS pri SM SSSR. (in Russian)
16. Lipins'kyi, V.M., Osadchyy, V.I., & Babichenko, V.M. (2006). *Stykhiini meteorologichni yavyscha na terytorii Ukrainy za ostannie dvadtsyrychchia (1986-2005 rr.)* [Natural meteorological phenomena in Ukraine over the last twenty years (1986-2005)]. Kyiv: Nika-Tsentr. (in Ukrainian)
17. Kovalenko, P.I., Romashchenko, M.I., Mykhailov, Yu.O., & Savchuk, D.P. (2008). Naukovi zasady kompleksnoho protypavodkovoho zakhystu Prykarpatskoho rehionu [Scientific principles of integrated flood protection of the Carpathian region]. *Vodne hospodarstvo Ukrainy*, 5, 10-23. (in Ukrainian)
18. Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks.
19. Rukovodstvo po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik [Guidance on the determination of calculated hydrological characteristics] (1984). Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russian)
20. Petrochenko, V.I., & Petrochenko, A.V. (2018). Nauchno-metodicheskoye obosnovaniye sistem preventivnoy protivopavodkovoy zashchity territoriy v basseynakh rek [Scientific and methodological substantiation of preventive flood protection systems in river basins]. Brest. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta: Vodokhozyaystvennoye stroitel'stvo i teploenergetika*, 2(110), 44-48. (in Russian)
21. Prognozirovaniye navodneniy. (n.d.). Akademiya GPS MCHS Rossii. Retrieved from <http://www.agpps-mipb.ru/index.php/2011-01-08-07-37-51/426-prognosirovanie-navodnenij.html>. (in Russian)
22. Basynove upravlinnia vodnykh resursiv richky Tysa. (n.d.). Derzhavne ahentstvo vodnykh resursiv Ukrainy. Retrieved from [http://www.vodhosp.uzhgorod.ua/aivs\\_tisa.html](http://www.vodhosp.uzhgorod.ua/aivs_tisa.html). (in Ukrainian)
23. Dellepiane, S., Laurentiis, R., & Giordano, F. (2004). Coastline extraction from SAR images and a method for the evaluation of the coastline precision. *Pattern Recognition Letters*, 25, 1461-1470.
24. Skakun, S.V. (2001). Neiromerezhevyi metod kartohrafuvannia povenei na osnovi sputnykovykh zobrazhen [Neural network flood mapping method based on satellite imagery]. *Naukovi pratsi Donets'koho NTU. Seriya "Informatyka, kibernetyka ta obchysluvalna tekhnika"*, 10(153), 52-58. (in Ukrainian)



25. Stefanyshyn, D.V., & Stefanyshyna, Yu.D. (2005). Vykorystannia metodu ekstrapoliatsii pry prohnozuvanni rivniv vody v richtsi, de vidbuvaietsia transformatsiia rusla, z vrakhuvanniam ryzyku [Use of extrapolation method for prediction of water levels in river where river bed is transformed, taking into account risk]. *Hidromelioratsiia ta hidrotekhnichne budivnytstvo: Zbirnyk naukovykh prats'*, 30, 107-116. (in Ukrainian)
26. Metodyka otsinky zbytkiv vid naslidkiv nadzvychainykh sytuatsii tekhnohenoho i pryrodnoho kharakteru [Methods of estimation of losses from consequences of emergencies of anthropogenic and natural character]. *Zatverdzhena postanovoioiu Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 15 liutoho 2002 r. № 175*. (in Ukrainian)
27. Petrochenko, V.I., & Stashuk, V.A. (2009). *Ekoloho-ekonomichna efektyvnist protypavodkovykh zakhodiv [Ecological and economic efficiency of flood control measures]*. Kyiv: DIUEVR. (in Ukrainian)

*The article was received 11.12.2019 and was accepted after revision 14.02.2020*

**Петроченко Олексій Вячеславович**

кандидат технічних наук, помічник ректора Київського національного університету будівництва і архітектури

**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітрофлотський, 31

**e-mail:** a\_petr89@i.ua

ORCID: ORG/0000-0002-0551-935X

УДК 553.49:550.42

**Yuri O. Fomin**<sup>1</sup>, PhD (Geology and Mineralogy), Associated Professor, Senior Researcher  
ORCID ID 0000-0002-3043-8359 *e-mail*: yaf1941@gmail.com

**Yuri M. Demikhov**<sup>1</sup>, PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher  
ORCID ID 0000-0002-3576-6570 *e-mail*: y\_demikhov@ukr.net

**Valentyn G. Verkhovtsev**<sup>1</sup>, D.S. (Geology), Senior Researcher  
ORCID ID 0000-0002-1015-6725 *e-mail*: Verkhovtsev@ukr.net

**Tamara V. Dudar**<sup>2</sup>, PhD (Geology and Mineralogy), Associated Professor, Senior Researcher  
ORCID ID 0000-0003-3114-9732 *e-mail*: tamadudar@ukr.net

**Natalya N. Borisova**<sup>1</sup>, Leading Engineer  
ORCID ID 0000-0002-7169-1430 *e-mail*: IGNS\_Borysova@nas.gov.ua

**Zinaida N. Kravchuk**<sup>1</sup>, Leading Engineer  
ORCID ID 0000-0002-6093-488X *e-mail*: IGNS\_Kravchuk@nas.gov.ua

<sup>1</sup>State Institution «Institute of Environmental Geochemistry of NAS of Ukraine», Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>National Aviation University, Kyiv, Ukraine

## PATHFINDER ELEMENTS OF URANIUM MINERALIZATION FROM ALBITITE FORMATION OF THE UKRAINIAN SHIELD AND THEIR IMPACT ON THE ENVIRONMENT

***Abstract.** The uranium ore albitites were studied emphasizing the regularities of concentration and dissemination of various elements in the process of formation and destruction of deposits for this formation. The elements typification was made with the following groups identified: radioactive, siderophilic, chalcophilic, rare elements, rare earth elements, and elements-mineralizes. Their impact on the environment was considered. Almost all known uranium deposits of the albitite formation of the Ingulskiy megablock of the Ukrainian Shield have always been considered as mono-elemental, exclusively uranium associations. However, gold, bismuth mineralization, as well as associated with monazite thorium, are found in commercial quantities within albitites deposits. These components could have been of a related commercial value. Enhancing amount of vanadium, strontium, lead and some other elements are also often met. In the process of uranium mining all mentioned elements, including uranium, are followed into refuse heaps and tailings. Taking into account geological and geochemical conditions, the region of albitites deposits development is seemed to be favorable for formation of near surface uranium and pathfinder elements concentrations. The uranium mining tailings enriched in uranium and heavy metals are being stored within the sanitary zones of operating mines and considered as to be favorable for oxidation and decomposition under the conditions of hypergenesis. The mentioned processes can last for an indefinite time taking into account mineral composition of loose deposits, climate changes, and fluctuations in the level of groundwater in the region. And, if natural secondary concentrations of uranium and its pathfinder elements can be considered as mineral resources, then dissemination of these elements in waters, soils and biological objects is likely to be attributed to very harmful processes. At the same*

time, the removal of heavy metals by atmospheric waters is absolutely predictable, with their subsequent migration into the groundwater system, gradual penetration into soils and biological objects, which undoubtedly carries a potential threat to the environment.

**Key words:** Ukrainian Shield; uranium mining; albitite formation; uranium and its pathfinder elements; heavy metals; hazard category; environmental impact

Ю.О. Фомін<sup>1</sup>, Ю.М. Деміхов<sup>1</sup>, В.Г. Верховцев<sup>1</sup>, Т.В. Дудар<sup>2</sup>, Н.М. Борисова<sup>1</sup>, З.М. Кравчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», м. Київ, Україна

<sup>2</sup>Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

## ЕЛЕМЕНТИ-СУПУТНИКИ УРАНОВОГО ЗРУДЕННЯ АЛЬБІТИТОВОЇ ФОРМАЦІЇ УКРАЇНСЬКОГО ЩИТА ТА ЇХ ВПЛИВ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

**Анотація.** Вивчено урановорудні альбітити з висвітленням закономірностей концентрації і розсіювання різних елементів в процесі формування і руйнації родовищ цієї формації, проведено типізацію цих елементів з виділенням наступних груп: радіоактивні, сидерофільні, халькофільні, рідкісні, рідкоземельні та елементи-мінералізатори, а також розглянуто їх вплив на забруднення довкілля. Практично всі відомі поклади урану альбітитової формації Інгульського мегаблоку Українського щита завжди розглядались як моноелементні, виключно уранові об'єкти. Проте в зонах альбітитів нерідко концентруються в близьких до промислових кількостях: золото, вісмутова мінералізація, а також пов'язаний з монацитом торій. Вказані компоненти могли б мати супутнє промислове значення. Із інших систематично підвищених домішок можна назвати ванадій, стронцій, свинець та інші. Всі перераховані елементи, включно уран, йдуть у відвали та хвостосховища. З урахуванням геолого-геохімічних характеристик альбітитових родовищ, регіон здається перспективним для формування молодих поверхневих концентрацій урану і елементів-супутників. Відходи промислової розробки уранових родовищ альбітитової формації, які були (і будуть) складовані, являють собою подрібнений мінеральний концентрат, збагачений ураном та важкими металами, який в умовах гіпергенних процесів сприятливий для окислювання і розкладання. Враховуючи особливості складу пухких відкладень, кліматичні зміни і коливання рівня ґрунтових вод регіону, можливе розтягнення вказаних процесів на невизначений час. І якщо природні вторинні концентрації урану і його супутників можуть розглядатись як корисні копалини, то розсіювання цих же металів у водах, ґрунтах і біологічних об'єктах скоріш за все слід віднести до дуже шкідливих процесів. При цьому абсолютно прогнозованим є винос атмосферними водами важких металів, з їх подальшою міграцією у систему підземних вод, поступовим проникненням у ґрунти і біологічні об'єкти, що, без сумніву, несе потенційну загрозу забруднення навколишнього середовища.

**Ключові слова:** Український щит; уранове зрудення; альбітитова формація; елементи-супутники урану; важкі метали; клас небезпечності; вплив на навколишнє середовище

## Вступ

Практично всі відомі поклади альбітитової формації Інгульського мегаблоку Українського щита (УЩ) завжди розглядались (і продовжують розглядатись) як моноелементні, тобто виключно уранові об'єкти [1–3]. Проте, як це видно з таблиці 2, до майже виключно уранового можна віднести хіба що Мічурінське родовище. Решта вивчених об'єктів, крім урану, містять в собі підвищені, аж до промислових, концентрації інших металів. Наведений у таблицях 1 і 2 матеріал дає достатнє уявлення відносно геохімічних особливостей родовищ цієї формації.

Важливо підкреслити, що накопичення елементів виникало у складі різних речовинних комплексів (і асоціацій) мінералоутворюючої системи вміщуючих порід (едикту) – колорудних натрієво-карбонатних метасоматитів (альбітитів) – уранових руд. Причому, аж ніяк не обов'язково у промислових рудах, саме які ідуть на переробку, на відміну від решти мінеральної маси, утворюючої відвали відпрацьованих (зруйнованих людиною) ділянок родовищ. Іншою не менш важливою специфікою досліджених родовищ є їх природне руйнування внаслідок процесів вивітрювання (для УЩ – це каолінітовий тип) і ерозії.

Поведінка урану і інших елементів, як в умовах довгої діяльності природних екзогенних факторів, так і в промислових відвалах, визначається різними факторами [4, 5]. Звичайно, перш за все, це ступінь стійкості вміщуючих їх мінералів до вивітрювання і геохімічні особливості, частково міграційна здатність самих елементів у природних (підземних і поверхневих) водах в сукупності із здатністю їх до осаджування на різних геохімічних бар'єрах. Подальша участь ореолів (і потоків) розсіювання тих чи інших елементів (і їх асоціацій) в залежності від геодинаміки району може бути різною. Хоча значною мірою вона залежить і від відношення до неї людини: джерелом чого стануть такі вторинні концентрації – істотної додаткової кількості легко видобувних урану та інших металів або шкідливих хімічних речовин, забруднюючих навколишнє середовище [3].

## Об'єкти дослідження

В основному всі виявлені родовища уранових альбітитів (принаймні більшість з них) зосереджені в межах трьох тектоно-метасоматичних зон, які відрізняються просторовим положенням відносно внутрішньоблокових гранітно-купольних структур, розташованих в центральній частині Інгульської мегаструктури і складених гранітоїдними масивами новоукраїнського і кіровоградського комплексів, а також (на північ) Корсунь-Новомиргородським плутоном складної будови. Названі нижче родовища, як представники цих зон, досліджувалися безпосередньо нами, саме матеріал по них покладено в основу розробки.

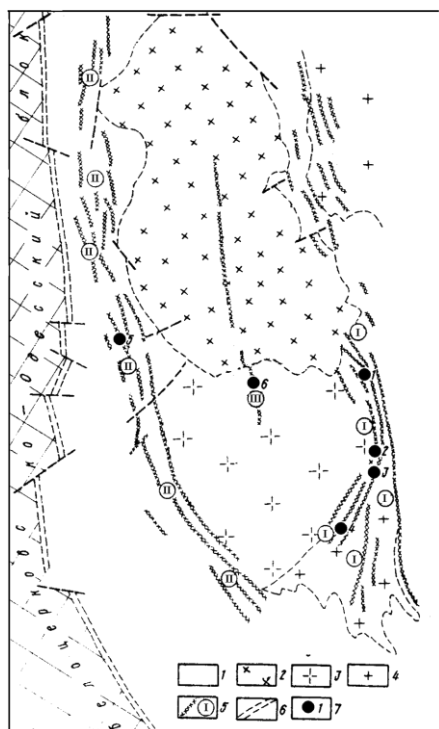


Рис. 1 – Схема розташування тектоно-метасоматичних зон і родовищ урану альбітитової ураново-рудної формації відносно гранітно-купольних структур Інгульського мегаблоку УЩ. Геологічна основа за О.М. Комаровим, Л.О. Черкашиним [6].

1. Граніто-мігматито-гнейсова товща.
2. Коростенський плутон: граніти рапаківі, анортозити.
3. Новоукраїнський масив: граніти.
4. Кіровоградський комплекс: суттєво біотитові граніти.
5. Тектоно-метасоматичні зони:

- I. Кіровоградська.
- II. Звенігородсько-Ганівська.
- III. Новокосянтинівська.

6. Глибинний розлом, що розділяє Інгульський і Білоцерківсько-Одеський блоки Українського щита.
7. Родовища урану: Северинівське (1); Мічуринське (2); Північно-Коноплянське (3); Юріївське (4); Ватутинське (5); Новокосянтинівське (6).

## Виклад матеріалу дослідження

Розглянемо альбітити, що вміщують уранове зруденіння, з точки зору прикладної геохімії, а саме з висвітленням закономірностей концентрації і розсіювання різних елементів в процесі формування і руйнації родовищ цієї формації [7, 8]. Поряд з головним корисним металом (ураном), розглянуті елементи, які, згідно з наявними даними, можуть в складі тих чи інших мінеральних асоціацій у рамках вивчених об'єктів концентруватися у підвищених, аж до промислових значень, кількостях. Інакше кажучи, елементи, віднесені у ході експлуатації родовищ до промислових відходів, але здатні також у результаті діяльності гіпергенних факторів формувати значні за своїми масштабами вторинні ореоли розсіювання. Тому дуже важливою уявляється інформація про екологічну небезпечність вивчених елементів, а саме їх відношення до того чи іншого класу небезпечності згідно з ГДК (гранично допустимі концентрації). Згідно з наказом Міністерства з надзвичайних ситуацій України № 627 від 22.03.2012 «Про затвердження Вимог до роботодавців щодо захисту працівників від шкідливого впливу хімічних речовин», за класом небезпечності більшість з елементів відноситься до 1–2 класів, тобто надзвичайно небезпечних та високо небезпечних речовин. Зокрема, до першого класу небезпечності відносяться берилій, а також один з головних супутників урану – ванадій; до другого класу – стронцій, кобальт, вісмут. Взагалі, всі перераховані у таблиці 1 елементи можуть нести (хоча і в різній мірі) екологічну загрозу.

Для зручності подальшого опису вивчених елементів проведено їх типізацію з виділенням наступних груп: 1) радіоактивні елементи;

2) сидерофільні елементи; 3) халькофільні елементи; 4) рідкісні та рідкоземельні елементи; 5) елементи мінералізаторів.

**1. Радіоактивні елементи.** Перш за все це уран і торій. Судячи з таблиці 2, вивчені родовища досить чітко розділяються на дві групи, а саме на уранові і торій-уранові. До першої групи відноситься, як вже відмічено вище, Мічуринське родовище з найнижчим вмістом торію, кількість якого тут не перевищує перші г/т, що дозволило Ю.П. Єгорову [2] віднести уранові руди родовища до безторієвих. Але на флангах Мічуринського родовища (Північно-Коноплянська дільниця) він помітно підвищується, особливо в забалансових рудах, безрудних альбітитах і вміщуючих породах (в середньому 24,6–25,1 до 64 г/т), залишаючись низьким (в середньому 9,5 не вище 19 г/т), в альбітитах рудних. Також підвищеним є вміст торію в межах Северинівського родовища – до 71,0 г/т.

Таблиця 1 – Деякі геохімічні параметри урану і елементів-супутників в уранових родовищах альбітитої формації Українського щита

Елемент	концентрація в альбітитах, варіації (г/т)	кларк [3], (г/т)	мінімальний промисловий вміст у рудах (г/т)	середній вміст в океані (мг/л)	середній вміст у річках (мг/л)	вміст в живих організмах (г/т)	клас небезпечності згідно з ГДК
U	0,4-11128	2,5	300	0,003	0,001	0,013-0,038	1
Th	0,5-200	13	100	0,00001	0,00002	0,003-0,2	1
Ra	0,00028	-		$1 \cdot 10^{-10}$			
V	5-1000	90	100-1000	0,003	0,0001	0,14-2,0	1-2
Ni	4-1000	58	2000	0,002	0,005	0,4-25	2-3
Co	5-100	18	150-370	0,0005		0,03-5,0	2
Cr	5-3000	83		0,00002	0,001	0,075-1,0	2-3
Pb	5-5500, до 1%	16	1%	0,00003	0,001	0,5-8,4	1-2
Zn	0-500, до 1%	83	2%	0,01		6-1500	3
Cu	3-70	47	3000	0,003		2,4-50	2-3
Bi	15, до 0,8-1,3%	0,009	0,2-0,3%	0,0002		0,004-0,3	2
Mo	0,4-50	1,1	100	0,01	0,00084	0,2-2,5	2
Ba	5-500, до 3200	650		0,02		0,2-30	3
Sr	1-1000, до 1626	340		8,0	0,1	14-500	2
Be	1-50	3,8	30-400	0,0000006	0,0006	0,0003-0,1	1
Zr	4-600	170		0,00005	0,0026	0,1-20	3

До торій-уранових впевнено можна віднести Юріївське, Ватутінське і Новокосятинівське родовища з вмістом торію на рівні мінімально промислового, або навіть вище – 100 і більше г/т. Найвищі концентрації торію (до 200 г/т) зафіксовані на Новокосятинівському родовищі.

Таблиця 2 – Геохімічна характеристика уранових родовищ Інгульського мегаблоку Українського щита

Хімічні елементи	Родовища урану альбітизованої формації					
	Северинівське	Мічуринське	Коноплянське	Юріївське	Ватутинське	Новокосянтинівське
	Вміст елементів у г/т					
U	1-11128	5-1670	1-2041	1-3506	3-5140	0,4-4470
Th	5,0-71,0	0,5-4,3	1,0-64,0	1,0-122,8	6,0-101,0	5,2-200,0
V	40-1000	12-54	50-300	5-200	40-800	21-73
Ni	30-1000	4,0-12,0	6-100	10-200	30-1000	8,0-11,0
Cr	200-2000	6-38	30-500	5-150	200-3000	18-21
Pb	8-2000	5-810	1-1116	6-1247	18-2995	20-1130
Zn	0-500	-	0-100	0-200	0-200	34-54
Mo	1-50	-	0,5-1	0,5-40	0,5-50	0,4-0,9
Sr	1-1000	36-161	3-300	25-1626	1-300	210-730
Be	3-50	1-46	0-20	-	0-30	3,0-4,5
Zr	5-600	22-291	5-481	4-300	18-490	190-433

У вміщуючих породах, до яких віднесені породи едукту, як незмінні, так і мікроклінізовані і діафторовані, кількість урану варіює від перших г/т до 40–53 г/т; такий вміст часто вже на порядок і більше перевищує фоновий для порід метатеригенної формації УЩ [9]. В альбітизованих породах і безрудних альбітигах зовнішніх часток рудних зон вміст урану в середньому по об'єктах зростає в 1,3–4,3 рази.

В якості бортового вмісту прийнята концентрація урану в 300 г/т (0,03%). Найбільш високим його вмістом (в середньому по об'єктах 0,08–0,24%, в окремих зразках до 0,5–1,11%) характеризуються альбітиги з накладеними продуктивними мінеральними асоціаціями, включаючи ферібіотит, анкерит, гематит і мінерали урану.

Контрастність руд (співвідношення середнього вмісту урану у рудах і вміщуючих породах) за нашими даними змінюється від 77–84 (родовища Юріївське і Мічуринське) до 115–130 (Північно-Коноплянське і Ватутинське), досягає 302–376 (Новокосянтинівське і Северинівське). Згідно з розрахунками Ю.П. Єгорова [2], за ступенем концентрації урану ( $K.K.U = 72$ ) руди Мічуринського родовища відносяться до числа рядових. Можна передбачити, таким чином, що альбітиги з непромисловим вмістом урану (20–300 г/т) опиняться у відвалах із великою ймовірністю негативних екологічних наслідків.

Крім двох головних радіоактивних елементів, аналітика також фіксує присутність тут радія. Оцінити порядок вмісту радія в альбітигових рудах можна на прикладі Мічуринського родовища. В основу цієї оцінки покладено опробування, яке проведено КП «Кіровгеологія» у гірничих виробках, де, за даними Ю.П. Єгорова [2], середній вміст Ra в рудах складає  $2,8 \cdot 10^{-4}$  г/т.

Більш важливою здається поведінка радію у природних водах, особливо, на наш подив, виявлена кореляція урану та радію з дейтерієм, що дуже відрізняється. Якщо для урану він незначний і негативний ( $r_{U-D} = -0,14$ ), то для радію він позитивний і значущий з дуже високим значенням коефіцієнта кореляції ( $r_{Ra-D} = +0,77$ ). Безумовно, взаємозв'язок між дейтерієм і радієм (дочірнім продуктом урану) в природних водах уранових родовищ взагалі і

родовищ альбітитової формації зокрема вимагає ретельної перевірки, після якої цілком може розглядатися як локальна пошукова ознака уранового зруденіння. Отримані результати, навіть за певної обмеженості матеріалу, підтверджують відоме положення [10] про роздільну геохімічну долю U та Ra в урановорудних районах. У водних ореолах розсіювання Ra навколо уранових родовищ знаходиться ближче до руд, тоді як U мігрує істотно далі.

**2. Сидерофільні елементи.** Крім заліза, до цієї групи віднесені ванадій, нікель, кобальт, хром.

Найбільш розповсюджене залізо, яке знаходиться у двох- і трьохвалентній формі. Важливим генетичним параметром при цьому у рудній системі є так званий окисно-відновлювальний індекс, саме відношення  $Fe_2O_3:FeO$  [11]. У вивчених родовищах це відношення досягає максимальних значень на рівні руд (2,64–3,34), знижуючись до 0,15–1,40 у вміщуючих породах. Локалізація уранового зруденіння визначається потенціальною можливістю окислення заліза залізовміщуючих мінералів у складі альбітитів, а інтенсивність рудоутворення знаходиться у прямому зв'язку зі ступенем окислення заліза. Тим підтверджується генетичний зв'язок покладів урану з окисно-відновними геохімічними бар'єрами. З урахуванням приуроченості альбітитових родовищ до крутопадаючих глибинних зон проблема оцінки їх перспектив пов'язана з виявленням рівнів максимального накопичення в них урану (максимальної продуктивності), а також рівнів ерозійного зрізу (ступеня збереженості зон).

Ванадій має особливу роль, бо цілком може розглядатись в якості постійного супутника урану, пов'язаного з ним спільністю походження, тобто генетично. Закономірностей в розподілі ванадію при порівнянні вивчених родовищ не виявлено. Для Ватутінського родовища встановлено збільшення вмісту елемента в системі: рудовміщуючі породи – альбітити – руди і одночасно найбільш високі середні концентрації в некондиційних і промислових рудах. Породи і руди Мічурінського і Новокостянтинівського родовищ, судячи з середніх значень у вибірках, відрізняються найбільш низькою ванадієносністю з деяким її збільшенням від вміщуючих порід до альбітитів і в подальшому до непромислових руд, при зниженні у рудних альбітитах. Схожа закономірність характерна і для Северинівського родовища, при тому, що кількість ванадію у всіх складових цього переходу тут істотно вища. На Північно-Коноплянській ділянці Мічурінського рудного поля в середньому найбільш висока концентрація ванадію встановлена в промислових рудах.

Рядовим для рудовміщуючих порід і руд альбітитових родовищ урану є вміст ванадію (г/т) від 40–60 до 100–300, рідше відмічаються концентрації 400–500 і вище. При цьому аномально висока (до 800–1000) ванадієносність на рівні промислових значень встановлена в безрудних і слаборудних альбітитах, тобто в альбітитах із забалансовим вмістом урану, які ідуть у відвали з усіма негативними екологічними та економічними наслідками. Наведені кількості (особливо по Ватутінському родовищу) близькі до кількісних оцінок ванадієносності комплексних U-V-Sc руд Жовторіченського родовища, а також зон натрієвого метасоматозу, розвинутих по породах криворізької серії в районі цього родовища і Ганівського кар'єру, де вони також можуть мати промислове значення.



Нікель і кобальт. За вмістом нікелю вивчені родовища розподіляються на дві групи: вміщуючі нікель в завищених кількостях і практично позбавлені його.

До першої групи відносяться Северинівське і Ватутінське родовища, у межах яких концентрація нікелю у рудовміщуючих породах, альбітитах і уранових рудах в середньому в 3–5,5 разів перевищує кларк. На обох родовищах дещо більш високим вмістом елементу характеризуються породи едукту, альбітизовані їх різновиди і безрудні альбітити. Тенденція деякого зниження нікеленосності в продуктивних альбітитах (слаборудних і рудних) більш чітко проявлена на Ватутінському родовищі, слабкіше на Северинівському. На обох об'єктах в окремих зразках у складі рудовміщуючої товщі, а також безрудних метасоматитів концентрація нікелю досягає 1000 г/т, наближуючись до мінімальної промислової для нікелієвих руд.

Вміст кобальту в породах і рудній масі родовищ першої групи відносно завищений (5–50, до 100 г/т). На Северинівському родовищі він в середньому близький до кларкового: у вміщуючих породах – 19,4; в альбітитах – 19,0; у слаборудних альбітитах – 18,0; у рудах перевищує кларк – 26,5 (всюди в г/т). На Ватутінському родовищі кількість його (також г/т) нижче кларку, причому збільшується від едукту до руд: 8,6 – 5,7 – 11,3 відповідно.

В родовищах, що належать до другої групи, вміст нікелю суттєво нижче кларку: в середньому від 30–40 (Північно-Коноплянська дільниця і, можливо, Юріївське родовище) до 4,0–12,0 г/т (Новокостянтинівське і Мічуринське родовища). Вміст кобальту в них близько до порогу чутливості спектрального аналізу чи навіть нижче його. Виключенням є гнейсова товща Юріївського рудного поля, де кількість кобальту практично у всіх зразках значна (2–50, в середньому 12,1 г/т).

Хром. В основі хромононості урановорудних альбітитів, можливо, лежить первинна концентрація хрому у вміщуючих породах. Найменшим (нижче кларка) вмістом елементу характеризуються Мічуринське і Новокостянтинівське родовища, де у всіх типах порід і руд він знаходиться на рівні чутливості спектрального аналізу. В межах Юріївського рудного поля і Північно-Коноплянської ділянки кількість хрому в середньому близька до кларкового.

Найбільш висока концентрація хрому (вище кларка) встановлена для Ватутінського і Северинівського родовищ. На обох об'єктах достатньо чітко виявлена тенденція її зниження від вміщуючих порід (в середньому 1125–1347, всюди в г/т) до альбітизованих порід і безрудних альбітитів (905–1063) і далі до альбітитів з непромисловим вмістом урану (733–1031) і промислових руд (524–773). Зразки з аномально високими значеннями (1000–3000 г/т) зустрічаються у всіх зонах рудоутворюючих систем, але в більшій мірі у вміщуючих породах. Таким чином, промислові відвали на різних об'єктах будуть характеризуватись вмістом хрому від  $n \cdot 10$  до  $n \cdot 1000$  г/т, тобто, в деяких випадках, більше ніж на порядок перевищувати кларк.

**3. Халькофільні елементи.** З числа елементів з високою спорідненістю із сіркою вивчені свинець, цинк, мідь, вісмут, молібден.

Розподіл свинцю в альбітитових родовищах вкрай нерівномірний. Ця нерівномірність починається з рудовміщуючих порід. Процес альбітизації і наступного уранового рудоутворення супроводжувався систематичним

(синхронно з ураном) збільшенням відносно рівноважної концентрацій радіогенного свинцю.

Про розподіл свинцю в породах і рудах можна судити по найбільш вивченому Мічурінському родовищу [2], де первинний свинець у рудах практично відсутній: при середньому вмісту Pb 200 г/т доля ізотопу Pb<sup>204</sup> дорівнює 0,6%. Співвідношення радіогенних ізотопів свинцю в рудах (горизонт -33 м) складає (%): Pb<sup>206</sup> 83,7; Pb<sup>207</sup> 10,7; Pb<sup>208</sup> 5,0. В безрудних альбітитах кількість свинцю одна із самих низьких (16 г/т).

Північно-Коноплянська ділянка, яка фактично представляє південне продовження Мічурінського родовища, навпаки, характеризується чи не самим високим вмістом елементу як у вміщуючих породах, особливо в діафоритах (до 240 г/т), так і в рудах (до 100–1116 г/т). Рудопрояр Обгінне (північний фланг Мічурінського поля [1]) також виділяється високою концентрацією Pb, яка в багатих уранових рудах досягає 2%, тобто є промислово значимою; у вміщуючих породах вона на порядок вища фонові (0,02%).

В цілому по наявності Pb (первинного свинцю) у вміщуючих породах вивчені об'єкти можна віднести до двох груп. В першу групу увійдуть Північно-Коноплянське, Ватутінське і Северинівське родовища, де вміст елементу при нерівномірності його розповсюдження нерідко досягає значень 100 г/т і більше. Родовища першої групи відрізняються також і завищеним вмістом геохімічного супутника свинцю – Zn (в середньому 100–121, до 300–500 г/т). До другої групи відносяться власне Мічурінське, Юріївське і Новокосянтинівське родовища. Судячи з наявних даних, кількість Pb (г/т) тут систематично вище кларкового, але не більше 50–60. Треба відмітити також стабільно завищений відносно кларку (в 1,5–3,8 раза) вміст свинцю в новоукраїнських гранітах Новокосянтинівського родовища: в середньому 37,2. Разом з тим, в рудах і рудовміщуючих породах Новокосянтинівського родовища зафіксована найменша кількість Zn (в середньому 34–54 г/т).

В альбітитах всіх родовищ концентрація свинцю систематично збільшується пропорційно ураноносності, досягаючи максимуму в уранових рудах: в середньому від 195 г/т на Мічурінському родовищі до 957 на Ватутінському. Відхилення від цієї тенденції мають місце практично всюди. Так, наприклад, судячи з наших даних, на Північно-Коноплянській ділянці найбільшою кількістю свинцю (120–3389, в середньому 800 г/т) характеризуються слабкорудні альбітити, призначені для відвалів. В окремих зразках альбітитів з непромисловим ураном на вивчених об'єктах встановлено 810–5500 г/т Pb. На Северинівському родовищі концентрація Pb в безрудних альбітитах місцями (горизонт 620 м) досягає 1%, тобто промислових значень для свинцевих руд (+1% Zn і до 10 г/т Ag). Для порівняння: максимум свинцю в промислових рудах урану складає 575–2350 г/т. Відносно цинку тенденція, судячи з Северинівського і Ватутінського родовищ, протилежна свинцю – кількісне зниження його від вміщуючих порід до руд майже вдвічі.

Ще один халькофільний елемент – Cu, з котрим Pb і Zn часто асоціюють і який (як і ці два) відноситься до елементів дуже токсичних, розподілений в уранових рудах і вміщуючих породах вивчених об'єктів відносно рівномірно. Вміст Cu в середньому по вибірках складає 6–32 г/т. Максимальна концентрація міді встановлена для Новокосянтинівського і Північно-Коноплянського родовищ. Так, в породах останнього звичайними є концентрації Cu 50–70 г/т.

Наведена інформація досить переконливо демонструє високу вірогідність накопичення в промислових відходах свинцю, а також цинку і міді.

Відносно вісмуту: значима кількість цього елемента встановлена на північних флангах Мічурінського родовища (рудопрояр Обгінний), а також в межах золоторудної частини Юрїївського рудного поля. Рудопрояр Обгінний [2] представлений багатою Ві-U мінералізацією, локалізованою в межах Кіровоградського розлому і не пов'язаною безпосередньо з альбітитами. Вміст вісмуту в рудах цього прояву промислово значущий – 0,8–1,3%, у вмшчующих породах – 0,0015%, тобто на 2 порядки вище кларкового.

Молибден. Розподіл молибдену у вивчених об'єктах дуже нерівномірний. Найбільш низький його вміст ( $< 1$  г/т, інакше кажучи, на грані чутливості методу) встановлений на Новокостянтинівському і Північно-Коноплянському родовищах; для Мічурінського родовища дані по молибдену відсутні. Порооди і руди Ватутінського і, в меншій мірі, Юрїївського родовищ відрізняються підвищеним середнім вмістом елемента. Але в більшості проаналізованих зразків Ватутінського (і Юрїївського) родовищ вміст молибдену також не перевищує перші г/т, лише епізодично підвищуючись до 10–50 г/т. На Ватутінському родовищі, зокрема, це зразки деяких мікроклінових і олігоклазових гранітів типу Березовських і, іноді, мікрогранодіоритів Головного розлому.

Северинівське родовище є своєрідним винятком, тут підвищена концентрація молибдену (10–30 г/т) є звичайною, а в одиничних зразках вона досягає 60–100 г/т, тобто наближається до мінімальних промислових значень. Детальніше: у складі діафоритової і альбітитової з піритом асоціацій Северинівського родовища молибден в значних кількостях присутній завжди, хоча вміст його (г/т) варіює в широких межах: від 3–10 до 20–60. В ділянках розвитку епігенетичного кварцового парагенезису без очевидних сульфідів кількість молибдену також підвищена (18,4 г/т). Зокрема на ділянці з розвитком кварц-анкеритового з піритом, галенітом, сфалеритом і халькопіритом парагенезису на Северинівському родовищі (горизонт 620 м) зафіксована найбільш висока концентрація Мо (до 50–100 г/т), а також Аg (до 10 г/т), Рb (до 1%), Zn (до 1%). Саме для цього родовища (а також для Ватутінського) намічається тенденція зниження концентрації Мо від вмшчующих порід і безрудних альбітитів до зруденілих альбітитів і особливо промислових руд. При експлуатації таких об'єктів, таким чином, найбільш молибденоносні породи ідуть (підуть) у відвали.

**4. Рідкісні та рідкоземельні елементи (РЗЕ).** У складі цієї групи елементів розглянуті цирконій, берилій і лантанойди.

Розподіл цирконію у більшості альбітитових родовищ підпорядковується загальним закономірностям. На Северинівському, Північно-Коноплянському і Мічурінському родовищах концентрація елемента (г/т) суттєво зростає від вмшчующих порід зовнішніх зон, включаючи альбітизовані їх різновиди і безрудні альбітити (22–135), до слабрудних (130–184) і, особливо, рудних (218–294) альбітитів внутрішніх зон.

Така ж тенденція виявлена на Новокостянтинівському родовищі, з тією різницею, що саме на цьому родовищі в середньому фіксується найбільш висока концентрація цирконію (г/т) у вмшчующих новоукраїнських гранітах (190), а також альбітитах (205–212), непромислових (268–372) і промислових (433) рудах.

В межах Ватутінського родовища кількість Zr в середньому однаково підвищена як в породах гнейсо-мігматито-гранітного едукту (155 г/т), так і в альбітитах, причому більш за все в безрудних (252 г/т). Важливо відзначити, крім того, наявність тут високих концентрацій цього елемента, пов'язаних з так званим Малаконовим розломом (також не вміщуючим уранову мінералізацію). По вмісту цирконію у вміщуючих породах з Ватутінським родовищем можна порівняти Юріївське рудне поле, де цим елементом збагачені гнейси.

Вибіркові хімічні аналізи, в цілому, підтверджують виявлені тенденції, а саме: відносно витримана в підвищених значеннях кількість  $ZrO_2$  у всіх складових Ватутінського родовища і послідовне збільшення його концентрацій аж до 0,103% в уранових рудах, що відповідає мінімальному промислового вмісту для руд цирконію. Максимум  $ZrO_2$  встановлено в дайках фенітизованих діабазів – 0,108–0,145 г/т.

Розподіл берилію в рудній масі вивчених об'єктів, судячи з даних спектрального аналізу, нерівномірний. Для Северинівського родовища його кількість змінюється від 6,2–8,6 у вміщуючих породах до 8,0–11,6 г/т в альбітитових рудах (в середньому по вибірках), при загальному діапазоні 3–50 г/т і систематичній присутності. Для Мічурінського родовища цей діапазон складає від 1–2 у вміщуючих породах до 5–46 г/т в альбітитових рудах; за іншими даними – в альбітитових рудах в середньому по 100 пробах – 0,004% (40 г/т). Тобто на Мічурінському родовищі (як і на Северинівському) Be відноситься до елементів, характерних для U-рудного процесу [1]. На рудопроводі Обгінне (північний фланг Мічурінського поля) в Bi-U утвореннях, не пов'язаних з альбітитами, вміст Be аномально високий – 0,01% (100 г/т), тобто досягає стійких промислових значень, але у вміщуючих породах він у 2-3 рази нижче фонового [2]. Північно-Коноплянське родовище (південний фланг Мічурінського поля): при нерівномірному розподілу берилію (від кількості нижче порогу чутливості методу до 10–20 г/т в одиничних зразках) в середньому самий високий вміст встановлено у вміщуючих породах – 9,6 г/т; в альбітитах, незалежно від їх ураноносності, концентрація Be визначена як 4,2–5,2 г/т. На Ватутінському родовищі вміст берилію при несистематичній присутності дорівнює 6–30 г/т в альбітитах і альбітитових рудах. Новокостянтинівське родовище (за даними І.Б. Гаврусевича, О.В. Пушкарева, 1985) характеризується найнижчим вмістом берилію в альбітитах, включаючи рудні – в середньому по вибірках 3,0–4,5 г/т.

В цілому, на всіх вивчених родовищах вміст берилію в уранових рудах перевищує фоновий в гранітах і близький до промислових концентрацій у власне берилієвих рудах. Для порівняння: кількість берилію в гранітоїдах Корсунь-Новомиргородського масиву різних фаз становлення в середньому складає 2,5–3,0 г/т [6]; мінімальний же вміст BeO у грейзенових і альбітитових родовищах – 0,003–0,04% (30–400 г/т) [3].

Оцінку розподілу рідкісноземельних елементів (РЗЕ) наведено за опублікованими даними [12–15]. Стосовно вміщуючих порід: у гнейсах інгуло-інгулецької серії та гранітоїдах кіровоградського комплексу кількість РЗЕ (г/т) складає у середньому по вибірках 153–289; у гранітоїдах новоукраїнського комплексу вона дещо вища 194–686 (максимальна у жильних аплітах). При цьому новоукраїнські граніти за сумою РЗЕ генетично порівняні з кіровоградськими гранітоїдами. Взагалі, для вміщуючих порід матаморфогенної тріади (гнейси – мігматити – граніти) Інгульського

мегаблоку характерне домінування легких лантаноїдів при дефіциті важких їх складових та підвищення від гнейсів до кіровоградських гранітів ступеня їх диференціації, а також до гранітоїдів обох комплексів збільшення Се складової. Цю особливість успадкували і ураноносні альбітита. У альбітитах вміст РЗЕ або близький до їх вмісту в породах едукту (Северинівське, Ватутінське родовища, 160–360 г/т), або аномально підвищений (Мічуринське родовище, 1100 г/т).

Аналіз розподілу РЗЕ приводить багатьох дослідників до висновку про успадкування породами, що виникли в результаті седиментогенезу, рис, властивих продуктам толеїтового магматизму, тобто найбільш поширеного типу мангійних виплавок [6]. Як відомо [13], геохімічним індикатором при цьому називають відношення  $Eu/Sm$ . Зазначений геохімічний показник якнайкраще підходить до гнейсів і так само до продуктів їх гранітизації (мігматитів і гранітів) Інгульського мегаблоку: для тих і інших відношення  $Eu/Sm$  складає в середньому 0,33. Тобто роль метабазитів архейського фундаменту, що розмивався, в момент накопичення ранньопротерозойського флішу в цьому регіоні була значною.

Важливо відмітити також на границі архею і раннього протерозою фіксацію за допомогою лантаноїдів так званого «кисневого стрибка». Індикатором кисневого середовища є вміст Се, який завдяки своїй змінній валентності підтверджує наявність такого стрибка для криворізької серії [13, 16] при переході від доломіт-метаконгломератових горизонтів до перекриваючого їх сланцьово-метапісковикового горизонту, який належить глеєватсько-гданцівському рівню. У межах зазначеного переходу вміст Се різко зростає від 9–13 г/т в перших до 44–79 г/т у других. У інгуло-інгулецькій серії, що являється віковим аналогом криворізької серії, «кисневий стрибок», як ми вважаємо, також проявлений на рівні горизонту графітових гнейсів.

**5. Елементи мінералізаторів.** До цієї групи віднесені сірка, барій, стронцій, рубідій.

Розподіл сірки у рудовміщуючих породах і альбітитових рудах вивчено нами для Северинівського родовища. Вміст елемента (S загальної) в окремих зразках родовища варіює в широких межах (від 0,005–0,006 до 0,127–0,466%). В середньому воно дещо нижче кларкового (чи близьке до нього) в мікроклінітах, діафоритах, альбітизованих породах і рудних альбітитах і суттєво (в 2–3 рази) вище кларку у вміщуючих породах (особливо гнейсах), а також безрудних і слаборудних альбітитах. Найбільш високою концентрацією сірки (0,032–0,466%) характеризуються дайкові діабази. Таким чином, при експлуатації альбітитових родовищ сірка в основному також накопичується в промислових відходах. Процес окислення піриту киснем в природному середовищі при достатній кількості води призводить до утворення сірчаної кислоти. Тому присутність у відвалах сульфідів може призводити до вилуговування з них сірчаною кислотою важких металів, з усіма негативними екологічними наслідками.

Проведені на Северинівському родовищі дослідження дозволяють достатньо впевнено виділити дві форми сірки: сульфідну і сульфатну. Сульфідна сірка переважає у всіх типах порід і руд, а в породах субстрату, включаючи доальбітитові метасоматичні продукти і діафорити, фактично є єдиною. Сульфатна сірка утворює стійку домішку в альбітитах, в тому числі рудних їх різновидах. У породах, що вміщують уранове зруденіння, кількість

сульфідної сірки змінюється від 0,02 до 0,32% (максимум в діафоритах і діабазях) при наявності  $\text{SO}_3$  на рівні слідів, до 0,01% в одиничних зразках (таблиця 2). В альбітизованих породах і альбітитах концентрація сульфідної сірки дещо зростає до 0,61–0,82%, одночасно з'являється доволі стійка домішка  $\text{SO}_3$  (до 0,09%).

Стронцій, барій, рубідій. В загальних рисах у вивчених родовищах спостерігається збільшення кількості стронцію від вміщуючих порід і альбітизованих їх різновидів, включаючи безрудні альбітити до слабрудних альбітитів і промислових руд.

Для породної маси, включаючи альбітити з некондиційною урановою мінералізацією, звичайним є вміст Sr від  $n \cdot 10$  до 100, рідше 200–300 г/т. Кондиційним урановим рудам всіх об'єктів властиві підвищений середній вміст Sr (87,3–730 г/т). Найбільш високою концентрацією стронцію, судячи з матеріалів І.Б. Гаврусевича і О.В. Пушкарева (1985), характеризуються рудні альбітити Новокосянтинівського родовища. В окремих зразках альбітитів (як рудних, так і нерудних) Северинівського родовища концентрація Sr досягає 500–1000 г/т, наближуючись до мінімальних промислово значущих обсягів. Особливо треба сказати про вміщуючу (гнейсову) товщу Юріївського рудного (Au, U) поля. Тут підвищений вміст Sr (400–700, в одному зразку 1626 г/т) пов'язаний з присутністю у складі гнейсів зональних клінопіроксен-амфібол-карбонатних (з апатитом) скарноїдів.

Концентрація стронцію в породах і рудах ураноносних альбітитів і монофракціях польових шпатів двох об'єктів дає основу для висновку, що суттєва частина цього елемента у вміщуючих породах пов'язана саме з польовими шпатами – олігоклазом і мікрокліном. В плагіоклазах  $\text{Sr}^{2+}$  ізоморфно заміщує  $\text{Ca}^{2+}$ , в мікроклінах передбачається гетеровалентний ізоморфізм Sr і K, можливо, за типом  $(\text{K}^{1+} \text{Si}^{4+}) - (\text{Sr}^{2+} \text{Al}^{3+})$  [15].

Найбільш інформативними для ідентифікації польових шпатів вивчених родовищ є вміст рубідію і стронцію, а також рубідієво-стронцієве відношення. Рубідій, як геохімічний аналог калію, характеризується переважним накопиченням в мікрокліні, де встановлено стійко найбільш високий його вміст (278,8–350,6 г/т). В плагіоклазі концентрація рубідію значно знижується (246,3–274,5 г/т). В метасоматичному альбіті кількість його падає аж до значення нижче порогу чутливості аналізу ( $< 2$ –13,9 г/т). Стронцій, як відомо, пов'язаний з анортитовим (кальцієвим) міналом. Тому максимальна його концентрація притаманна плагіоклазу (395,5–470,3 г/т). У мікрокліні вміст стронцію нерівномірний, але часто залишається підвищеним (32,6–348,3 г/т), особливо у зразках мігматитів і гранітів з підвищеною кількістю анортиту. Альбіт також характеризується нерівномірним розподілом елемента (36,1–186,7 г/т). І тут найбільша його кількість пов'язана з анортитовим міналом, якого в альбіті навіть більше. Можна передбачити, що первинно увесь стронцій знаходився у плагіоклазі, але в результаті метасоматичного натрієво-карбонатного процесу увійшов у структуру карбонатів, при цьому незначна його частина лишилась в структурі альбіту. Відношення Rb/Sr дозволяє упевнено розрізнити ці три типи польових шпатів: для олігоклазу воно складає 0,52–0,69 (середнє по трьох зразках 0,59); для мікрокліну – 0,8–10,75 (по 9 зразках 1,54); для альбіту – 0,005–0,09 (по 10 зразках 0,04).

Кількість барію в лужних польових шпатах при нерівномірному розподілу обумовлена, скоріш за все, проявленням метасоматозу; більш висока вона в

мікрокліні (120–3200, в середньому 1028,8 г/т) у порівнянні з альбітитом (120–1200, при середньому 498,8 г/т). Підвищені концентрації барію в наших зразках близькі до значень у лужних польових шпатах із гранітоїдів центральної частини щита (зокрема, кіровоградського типу), які належать до амфіболітової фації [17].

## Висновки

1. Експлуатаційники та більшість дослідників самим фактом експлуатації тільки на уран відносять кіровоградські альбітити до монометальних, чисто уранових, родовищ. Проте, судячи з вивчених об'єктів, в зонах альбітитів нерідко концентруються в промислових (чи близьких до таких) кількостях і інші метали. До них відносяться: золото, а саме, виявлене у самородному вигляді на Північно-Коноплянській ділянці, вісмутова мінералізація рудопрояву Обгінне на флангах Мічурінського родовища, а також пов'язаний з монацитом торій Новокосянтинівського і Юріївського родовищ. Вказані компоненти могли б мати супутнє промислове значення. Із інших систематично підвищених домішок можна назвати ванадій, стронцій, свинець та інші. Серед таких елементів є тісно пов'язані спільністю генезису з ураном (ванадій) і не маючі відношення до лужного урановорудного процесу (торій).

2. З урахуванням геолого-геохімічних характеристик альбітитових родовищ, а також ландшафтно-геохімічних особливостей Інгульського мегаблоку (взаємоперехід лісостепової і степової зон), регіон здається перспективним для формування молодих поверхневих концентрацій урану і елементів-супутників (Ni, Co, Zn, V, Cu, Mo, Pb). Особливо відзначимо південне обрамлення району альбітитів з чітко направленим стоком гідросистеми від джерел живлення (з великою кількістю ураноносних порід) до місць розвантаження. Ця система визначає також ділянки, де сприятливо поєднуються місця розвантаження збагачених ураном підземних вод, ступінь аридності клімату з лужною реакцією ґрунтових вод, а також наявність у складі покривних фацій пород-осаджувачів і водоупорних відкладень, їх перекриваючих. Серед них треба відмітити бучацькі відклади, що вміщують рослинну органіку, у сполученні з регіональним водоупором – глинами київської світи; причому система цих відкладень розташована вище рівня регіональних дрен.

3. Відходи промислової розробки уранових родовищ альбітитової формації, які були (і будуть) складовані і по суті являють собою подрібнений мінеральний концентрат, збагачений ураном та важкими металами в умовах гіпергенних процесів, сприятливих для окислювання і розкладання, без сумніву, несуть потенційну загрозу забруднення навколишнього середовища. При цьому абсолютно прогнозованим є винос атмосферними водами металів, які у більшості випадків шкідливо впливають на екологію з подальшою їх міграцією у систему підземних вод, поступовим проникненням у ґрунти і біологічні об'єкти. Враховуючи особливості складу пухких відкладень, кліматичні зміни і коливання рівня ґрунтових вод регіону, можливе розтягнення вказаних процесів на невизначений час. І якщо природні вторинні концентрації урану і його супутників можуть розглядатись як корисні копалини, то розсіювання цих же металів у водах, ґрунтах і біологічних об'єктах скоріш за все слід віднести до дуже шкідливих утворень.

4. Вважаємо за необхідне подальше проведення більш детальних і систематичних досліджень району уранових альбітитових родовищ на сучасному рівні. Бо: по-перше, багато питань, які відносяться саме до геохімії урану в зоні гіпергенезу альбітитів, залишаються недостатньо вивченими; по-друге, існує багато прогалин у вивченні взаємозв'язку урану і його елементів-домішок; по-третє, наскільки нам відомо, ніхто до цього часу не проводив всього комплексу робіт з вивчення геолого-екологічних причинно-наслідкових зв'язків за даною проблемою. Такі роботи повинні включати в себе металометричну, гідрогеохімічну, біохімічну складові. Але, як мінімум, необхідне проведення обстежень відвалів, хвостосховищ на предмет виявлення ознак сучасних гіпергенних мінералоутворюючих процесів та заходів зменшення негативного впливу цих процесів на довкілля.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Генетические типы и закономерности размещения урановых месторождений Украины. Отв. редакторы Я.Н. Белевцев, В.Б. Коваль. Киев: Наук. думка, 1995. – 396 с.
2. Верховцев В.Г. та ін. (2014). Перспективи розвитку уранової сировинної бази ядерної енергетики України / В. Г. Верховцев [та ін.]. – Київ : Наук. думка, 2014. – 355 с.
3. Dudar T.V., Zakytnyi Ye.Ye., and Bugera M.A. (2015). Uranium Mining and Associated Environmental Challenges for Ukraine. – Science-Based Technologies, № 1(25), 2015. – P. 68–73.
4. Michel Cuney et al. (2012) Uranium deposits associated with Na-metasomatism from central Ukraine: A review of some of the major deposits and genetic constraints. – Ore Geology Reviews. 44. – P. 82–106.
5. Суцук К.Г., Верховцев В.Г. (2019). Металогенія урану в фанерозі платформної частини України // Геохімія техногенезу (36. наук. праць ІГНС НАН України). – К. Вип. 2 (30). – С. 56–69. (in Ukrainian).
6. Закономерности образования и размещения урановых месторождений Украины. Отв. редактор Я.Н. Белевцев. Киев: 1968. – 763 с.
7. Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г. Справочник по геохимии. Москва: Недра, 1990. – 480 с.
8. Токарев А.Н., Купель Е.Н., Попова Т.П. и др. Радиогидрогеологический метод поисков месторождений урана. – Москва: Недра, 1975. – 255 с.
9. Белевцев Я.Н., Егоров Ю.П., Титов В.К. и др. Средние содержания урана и тория в главнейших типах горных пород Украинского щита // Геол. журн. – 1975. – 35, вып. 4. – С. 96–117.
10. Есипчук К.Е., Шеремет Е.М., Зинченко О.В. и др. Петрология, геохимия и рудоносность интрузивных гранитоидов Украинского щита. – Киев: Наук. думка, 1990. – 236 с.
11. Щербаков И.Б. Петрология Украинского щита. Львов: ЗУКЦ, 2005. – 366 с.
12. Тугаринов А.И., Балашов Ю.Н., Гаврилова П.К. Распределение редкоземельных элементов в криворожской серии нижнего протерозоя // Геохимия. – 1973. – № 1. – С. 28–34.
13. Минеев Д.А. Лантаноиды в рудах редкоземельных и комплексных месторождений. – Москва: Наука, 1974. – 237 с.
14. Балашов Ю.Н., Горяинов П.М. Редкоземельные элементы в докембрийской железорудной формации Приимандровского района // Геохимия. – 1966. – № 3. – С. 312–322.
15. Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов, т. 1. – Москва: Наука, 1964. – 686 с.



16. Коржнев М.Н., Фомин Ю.А. Эволюция условий накопления пород криворожской серии по геохимическим и изотопным данным // Геол. журн. – 1992. – № 3. – С. 93–99.
17. Усенко И.С., Рокачук Т.А., Крамаренко Н.К. и др. Щелочные полевые шпаты гранитоидов Украинского щита. – Киев: Наук. думка, 1980. – 196 с.

Стаття надійшла до редакції 11.12.2019 і прийнята до друку після рецензування 12.02.2020

## REFERENCES

1. Belevtsev, Y.N., & Koval, V.B. (Eds. in charge). (1995). *Geneticheskie tipy i zakonmernosti rozmeshcheniya uranovykh mestorozhenii Ukrainy*. [Genetic types and regularities of localization of uranium deposits of Ukraine]. Kyiv: Nauk. Dumka. (in Russian)
2. Verkhovtsev, V.G. et al. (2014). *Perspektyvy rozvytku uranovoi syrovynnoi bazy yadernoi enerhytyky Ukrainy*. [Prospects for the development of uranium resource base of nuclear power of Ukraine]. Kyiv: Naukova Dumka. (in Ukrainian)
3. Dudar, T.V., Zakytnyi, Ye.Ye., & Bugera, M.A. (2015). Uranium Mining and Associated Environmental Challenges for Ukraine. *Science-Based Technologies*, 1(25), 68-73.
4. Michel Cuney et al. (2012). Uranium deposits associated with Na-metasomatism from central Ukraine: A review of some of the major deposits and genetic constraints. *Ore Geology Reviews*, 44, 82-106.
5. Sushchuk, K.G., & Verkhovtsev, V.G. (2019). Metalogeniya uranu v fanerozoi platformenoyi chastynu Ukrainu [Metalogeny of uranium in Phanerozoic of the sedimentary part of Ukraine]. *Geokhimiya tekhnogenezu (Zb. Nauk. Prats' IGNS NAN Ukrainu)*, 2(30), 56-69. (in Ukrainian)
6. Belevtsev, Y.N. (Eds. in charge). (1968). *Zakonomernosti obrazovaniya i rozmeshcheniya uranovykh mestorozhenii Ukrainy*. [Regularities of formation and localization of uranium deposits of Ukraine]. Kyiv. (in Russian)
7. Voitkevich, G.V., Kokin, A.V., Miroshnikov, A.Ye., & Prokhorov, V.G. (1990). *Spravochnik po geokhimii*. [Geochemistry reference]. Moscow: Nedra. (in Russian)
8. Tokarev, A.N., Kupel, Ye.N., Popova, T.P., et al. (1975). *Radihidrogeologicheskii metod poiskov mestorozhenii urana*. [Radihydrogeological method for uranium deposits surveying]. Moscow: Nedra. (in Russian)
9. Belevtsev, Ya.N., Yegorov, Yu.P., Titov, V.K. et al. (1975). Srednie sodержaniya urana i toriya v glavneishykh tipakh gornyykh porod Ukrainskogo Shchita. [Average content of uranium and thorium in the major types of rocks of Ukrainian Shield]. *Geol. Zhurnal*, 35(4), 96-117. (in Russian)
10. Yesipchuk, R.Ye., Sheremet, Ye.M., Zinchenko, O.V. et al. (1990). *Petrologiya, geokhimiya s rudonostost intrusivnykh granitoidov Ukrainskogo shchita*. [Petrology, geochemistry, and ore formation in intrusive granitoids of the Ukrainian Shield]. Kyiv: Nauk. Dumka. (in Russian)
11. Shcherbakov, I.B. (2005). *Petrologiya Ukrainskogo Shchita*. [Petrology of the Ukrainian Shield]. Lviv: ZUKTS. (in Russian)
12. Tugarinov, A.I., Balashov, Yu.N., & Gavrilova, P.K. (1973). Raspredeleniye redkozemelnykh elementov v krivorozskoi serii nizhnego proterozoya [Distribution of rare earth elements in Kryvorizyia series of Lower Proterozoic]. *Geokhimiya*, (1), 28-34. (in Russian)
13. Mineev, D.A. (1974). *Lantanoidy v rudakh redkozemelnykh i kompleksnykh mestorozhdeniyakh*. [Lantanoids in ores from rare earth and complex deposits]. Moscow: Nauka. (in Russian)
14. Balashov, Yu.N., & Goryainov, P.M. (1966). Redkozemelnye element v dokembriiskoi zhelezorudnoi formatsii Pryimandrovskogo raiona. [Rare earth elements in Pre-Cambrian iron formation of Ptyimandrovskii region]. *Geokhimiya*, (3), 312-322. (in Russian)

15. *Geokhimiya, mineralogiya i geneticheskie tipy mestorozhenii redkikh elementov, v. 1 [Geochemistry, mineralogy and genetic types of rare elements deposits, v. 1].* (1964). Moscow: Nauka. (in Russian)
16. Korznev, M.N., & Fomin, Yu.A. (1992). Evolyutsia uslovii nakopleniya porod krivorozskoi serii po geokhimicheskim s szotopnym dannym. [Evolution of accumulation conditions of Kryvorizzya series rocks on geochemical and isotopic data]. *Geol. Zhurnal*, (3), 93-99. (in Russian)
17. Usenko, I.S., Rokachuk, T.A., Kramarenko, N.K. et. al. (1980). *Shchelochnye polevyeye shpaty granitoidov Ukrainskogo Shchita. [Alkaline feldspars from granitoids of the Ukrainian Shield].* Kyiv: Nauk. Dumka. (in Russian)

*The article was received 11.12.2019 and was accepted after revision 12.02.2020*

**Фомін Юрій Олександрович**

кандидат геолого-мінералогічних наук, провідний науковий співробітник ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»  
**Адреса робоча:** 03142, Україна, м. Київ-142, пр. Палладіна, 34а  
**e-mail:** yaf1941@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-3043-8359>

**Деміхов Юрій Миколайович**

кандидат геолого-мінералогічних наук, завідувач лабораторії ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»  
**Адреса робоча:** 03142, Україна, м. Київ-142, пр. Палладіна, 34а  
**e-mail:** y\_demikhov@ukr.net  
<https://orcid.org/0000-0002-3576-6570>

**Верховцев Валентин Геннадійович**

доктор геологічних наук, завідувач відділу ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»  
**Адреса робоча:** 03142, Україна, м. Київ-142, пр. Палладіна, 34а  
**e-mail:** Verkhovtsev@ukr.net  
<https://orcid.org/0000-0002-1015-6725>

**Дудар Тамара Вікторівна**

кандидат геолого-мінералогічних наук, доцент кафедри екології Національного авіаційного університету  
**Адреса робоча:** 03058, Україна, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1, корпус 5/602  
**e-mail:** tamadudar@ukr.net  
<http://orcid.org/0000-0003-3114-9732>

**Борисова Наталія Миколаївна**

провідний інженер ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»  
**Адреса робоча:** 03142, Україна, м. Київ-142, пр. Палладіна, 34а  
**e-mail:** IGNS\_Borysova@nas.gov.ua  
<https://orcid.org/0000-0002-7169-1430>

**Кравчук Зінаїда Миколаївна**

провідний інженер ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»  
**Адреса робоча:** 03142, Україна, м. Київ-142, пр. Палладіна, 34а  
**e-mail:** IGNS\_Kravchuk@nas.gov.ua  
<https://orcid.org/0000-0002-6093-488X>

UDC 624.137.2

**Anatolii P. Sirenko**, PhD, Docent, Docent of Department of dynamics and strength machines and strength of materials of the Institute of Mechanical Engineering  
ORCID: 0000-0002-4591-1165 *e-mail*: sirenkoap@gmail.com

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

## ASSESSMENT OF A LANDSLIDE HAZARD TAKING INTO ACCOUNT SEISMIC IMPACT

**Abstract.** *Landslides represent a major threat to human life, constructed facilities, infrastructure and natural environment in many regions of the world. During the decade 2000-2009, natural disasters caused nearly one million fatalities, affecting nearly 2.5 billion people across the globe. The landslide frequency of about 20 major events per year in Europe is the highest compared to floods, earthquakes and cyclones. All 50 States and the U.S. territories are subjected to landslides and other ground-failure problems; 36 States have changed (from moderate to highly) the severe landslide hazards. Landslides in the USA constitute a serious hazard. They cause the substantial human and financial losses, estimated as 25...50 deaths annually and to cost approximately \$ 1 billion to \$ 3 billion per year.*

*Activation of seismic activity in Vrancea area, the Black Sea region and in the whole world has led to increase level of seismic hazard in Ukraine and in the finally growth relevant provoke factors of landslide movement. Whole Ukraine, not only as earlier considered Carpathian and Crimean regions, is now an area with high potential risk of future huge earthquakes. "... In areas with reduced characteristics of soil (frequent flooding, landslides, etc.) can be observed 7–8-magnitude effects", – said the deputy director of the Institute of Geophysics of the National Academy of Science of Ukraine O. Kendzera. Before the Japanese earthquake (11.03.2011) considered in the world that at 9-magnitude earthquake acceleration of ground can be maximum of 0,4 g. "But the Japanese catastrophe showed whole 2,7 g. This led to much more damage than expected. This means that now is the time when we must to correct all parameters of earthquakes," – says S. Ohasyan, the director of the Armenian Institute of Geophysics and Engineering Seismology. And O. Kendzera added: "... we must to correct initial data, that designers will use in the projects of buildings and construction".*

*In the early stages of the design of anti-slip structures for operational approximate calculations of the slope and shear pressure coefficient, a program is required that has the following properties: ease of use; graphical, human-oriented interface; is based on tried and tested mathematical methods; endowed with a pleasant form of presentation of the results of calculations (graphical and tabular forms); speed of calculations, etc. LANDSLIDE meets these requirements. An example of taking into account seismic factors when calculating slopes according to the second group of boundary states is considering. A typical calculation using the LANDSLIDE program is given. The slope stability coefficients was calculated using the LANDSLIP program by Maslow-Berer and Shakhutnyants methods. By using the limit equilibrium theory, the mechanism of "unloading the accumulated tension" in the slope massive during an earthquake is described.*

**Keywords:** *slope; earthquake; landslide; marginal equilibrium method; stability*

**А.П. Сіренко**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

## **ДО ОЦІНКИ ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНОСТІ З УРАХУВАННЯМ СЕЙСМІЧНИХ ВПЛИВІВ**

***Анотація.** Зсуви становлять серйозну загрозу життю людей, об'єктам інфраструктури та природному середовищу в багатьох регіонах світу. Протягом останнього десятиліття (з 2000 по 2009 рр.) стихійні лиха пошкодили та зруйнували близько одного мільйона об'єктів, що безпосередньо торкнулося майже 2,5 млрд населення у всьому світі. Щорічно у Європі трапляється близько 20 великих зсувів, що за частотою прояву значно більше, ніж повені, землетруси та урагани. Усі 50 штатів території США відчувають зсувні та інші ґрунтові відмови. Причому у 36 штатах США зсувна загроза змінилася від помірної до вкрай небезпечної [2]. Зсуви у США становлять серйозну небезпеку, які призводять до суттєвих людських і фінансових втрат: щорічно від 25 до 50 смертей та збитки від 1 до 3 млрд доларів.*

*Активізація сейсмічної активності в зоні Вранча та Чорноморському регіоні, а також в цілому на планеті призвела до підвищення рівня сейсмічної небезпеки на всій території України та, у кінцевому підсумку, зростання відповідного зсувопровокуючого фактора. Україна, а не тільки карпатський і кримський регіони, як раніше вважалося, є зоною, де потенційно можливі землетруси, причому доволі сильні. «...В районах з послабленими ґрунтами (часті зсуви та ін.) можуть спостерігатись і 7–8-бальні ефекти», – зазначає заступник директора Інституту геофізики НАНУ О. Кендзера. До японського землетрусу (11.03.2011) вважалося, що при 9-бальному землетрусі прискорення може бути максимум 0,4 g. «Але японська катастрофа показала всі 2,7 g. Це призвело до більших руйнувань, ніж очікувалось. Це значить, що час передивитись всі параметри землетрусів», – підкреслює директор вірменського Інституту геофізики і інженерної сейсмології С. Огасян. О. Кендзера додає, що відповідно, потрібно переглянути і дані, які використовують проєктувальники при возведенні будівель та споруд.*

*На ранній стадії проєктування протизсувних споруд для оперативних наближених розрахунків коефіцієнта стійкості схилу та зсувного тиску потрібна програма, яка має наступні властивості: зручність у користуванні; графічний, людино-орієнтований інтерфейс; базується на апробованих математичних методах; наділена приємною формою подання результатів розрахунків (графічна та таблична форми); швидкість виконання розрахунків та ін. Таким вимогам відповідає програма LANDSLIDE. Наведено приклад врахування сейсмічних факторів при розрахунках схилів за другою групою граничних станів. Наведено типовий розрахунок за допомогою програми LANDSLIDE коефіцієнтів стійкості схилу методами Маслова-Берера і Шахунянца. В межах теорії граничної рівноваги описаний механізм «розвантажування накопиченої напруженості» в схиловому масиві при землетрусі.*

***Ключові слова:** схил; землетрус; зсув; метод граничної рівноваги; стійкість*

## Вступ

Зсуви становлять серйозну загрозу життю людей, об'єктам інфраструктури та природному середовищу в багатьох регіонах світу. Протягом останнього десятиліття (з 2000 по 2009 рр.) стихійні лиха пошкодили та зруйнували близько одного мільйона об'єктів, що безпосередньо торкнулося майже 2,5 млрд населення у всьому світі. Щорічно у Європі трапляється близько 20 великих зсувів, що за частотою прояву значно більше, ніж повені, землетруси та урагани [1]. Усі 50 штатів територій США відчувають зсувні та інші ґрунтові відмови. Причому у 36 штатах США зсувна загроза змінилася від помірної до вкрай небезпечної [2]. Зсуви у США становлять серйозну небезпеку, які призводять до суттєвих людських і фінансових втрат: щорічно від 25 до 50 смертей та збитки від 1 до 3 млрд доларів [3]. В Україні ж загалом станом на 01.12.2011 виявлено понад 23 100 зсувів, 17 400 зсувів – станом на 01.12.1997. Таким чином, за останні роки відбулося збільшення кількості зсувів у понад 1,3 раза, а за 30 років – у понад 3 рази. Це пов'язано з тим, що протягом другої половини ХХ ст. на більшій частині геологічних структур території України накопичені значні техногенні зміни верхньої зони геологічного середовища, які вплинули на його напружено-деформований стан та сейсмічний режим:

- вилучення великих обсягів порід при видобутку корисних копалин (вугілля до – 10 млрд тонн, залізних руд до – 5 млрд тонн, загальне вилучення руд і вміщуючих порід – до 60–70 млрд тонн);

- накопичення великих обсягів води у поверхневих водосховищах та техногенних водоймищах (до 50 млрд м<sup>3</sup>), з порушенням балансу підземних вод та зростанням потенційної енергії геологічних структур;

- регіональне техногенне водонасичення верхньої зони геологічного середовища з формуванням регіонального підтоплення на 5% території держави, переважно в межах техногенно порушених геологічних структур гірничо-видобувних регіонів (Донбас, Кривбас, Прикарпаття), великих промислово-міських агломераціях та ін.;

- порушення гідродинамічної рівноваги басейнів підземних вод та нафтогазоносних провінцій внаслідок видобутку великих обсягів нафти, газу, прісних і мінеральних вод та змін пружно-напруженого режиму системи "флюїд – мінеральний скелет". Загалом на території України еродовано 12,4 млн га сільгоспугідь. Середньорічні втрати ґрунтів з орних земель в середньому становлять 10–15 т/га. Кількість ярів різного ступеня розгалуження, глибини врізу і активності перевищує 500 тис. Небезпечні (надзвичайні) ситуації виникають в зв'язку з ерозією при зливах в районах із значною енергією рельєфу. Це переважно гірські та передгірські райони Карпат і Криму. Особливо інтенсивно ерозія протікає при паводкових підняттях рівня води на гірських річках та потоках. Тільки за останні десятиліття в Карпатах і Прикарпатті відмічались надзвичайні події в зв'язку із зливами (1965, 1969, 1974, 1993, 1994, 1998, 2001 рр.). Зокрема, в 1965 році в районі Чернівців випали зливові опади, які викликали катастрофічну повінь на струмку Клокучка. Максимальний шар опадів в м. Чернівці був зафіксований в центральній частині міста і складав 222 мм/добу. Злива завдала великих збитків міському господарству Чернівців. Були затоплені вулиці в низовій частині міста, залізничний вокзал, міська електростанція, зруйновані

розмивом будинки, розмиті дороги, знесені мости, занесено наносами залізничне полотно. Максимальні модулі стоку р. Клокучки під час паводку перевищили 3000 л/сек. км<sup>2</sup>. Гранична насиченість покривних відкладів, підняття рівня ґрунтових вод, глибина і бокова ерозія водотоків обумовили розвиток зсувів. Руйнування споруд, зсуви і селі в Карпатах відмічались також при зливових опадах в 1969, 1974, 1992, 1998, 2001 рр.

### Основна частина

Найбільш поширеними процесами, що зумовлені взаємодією атмо-, гідро- і літосфери, на території України є схилі гравітаційні процеси – ерозія, абразія, зсуви, обвали – які взаємопов’язані, часто виступають спільно або послідовно доповнюючи один одного (рис. 1).

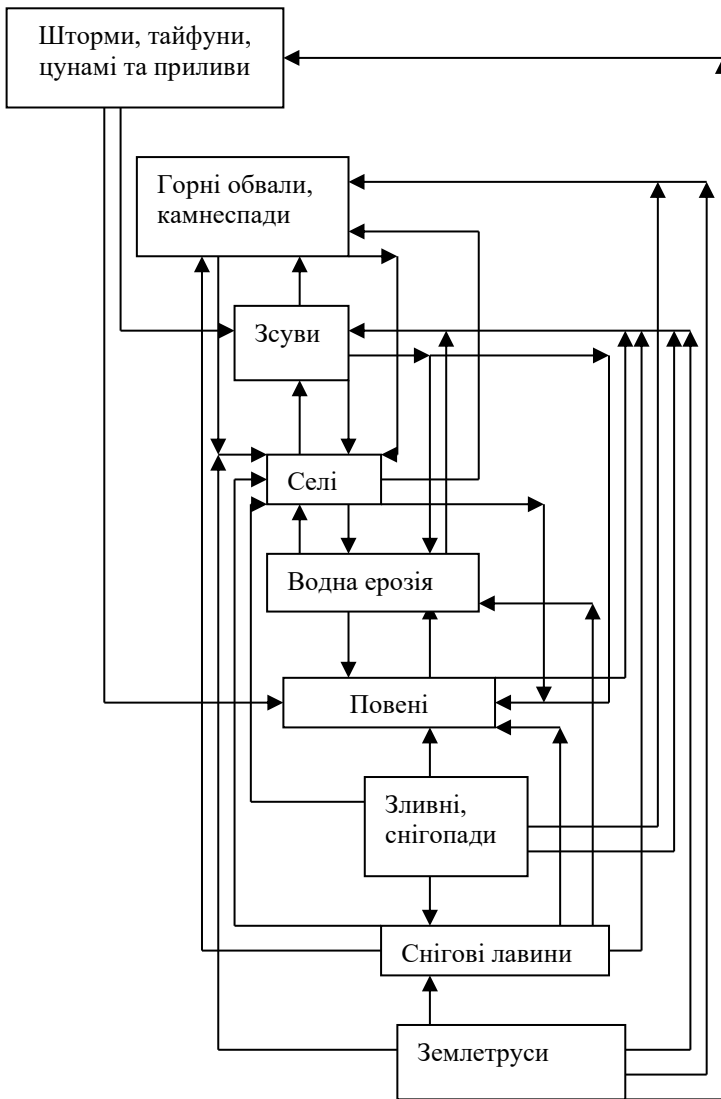


Рис. 1 – Системна дія ендо- і екзодинамічних процесів

Гравітаційні процеси – різноманітні форми руху геологічних тіл, при яких основною рушійною силою виступає сила тяжіння. Види, масштаби, швидкості, тривалість руху порід визначається перепадами висот конкретної місцевості. В межах України, в її гірських районах Карпат і Криму, спостерігаються також прояви селів як форми швидкого переміщення породного матеріалу в річищах гірських річок та ярів. В Карпатах зареєстровано понад 271 селевий водозбір в басейнах р.р. Черемоша, Прута, Дністра, Тиси. В Гірському Криму досліджено 75 селевих водозборів переважно на малих річках Південно-Східного Криму (Кутлак, Шелен, Ускут, Арпат, Судак, Ворон). В меншій мірі на річках південного берегу Криму (Учан-Су, Дерикойка, Улу-Узень, Авунда); північного схилу (Альма, Бельбек, Чорна) та в ярах (Туакська балка, Ставлухар, Західно-Карабахський, Кастель). Крім техногенних і природно-техногенних змін інженерно-геологічних умов та напруженого стану великих частин геологічних структур, в останні десятиріччя відбувається регіональне порушення балансу потенційної енергії та розвиток техногенних землетрусів у верхній зоні геологічного середовища при затопленні шахт, підйомі рівня моря, проведенні вибухових робіт та ін. Перший досвід комплексного аналізу сейсмічного та структурно-геодинамічного режимів геологічних структур був пов'язаний з оцінкою стійкості ТГС "проммайданчик Крим АЕС – ГС" (1988–1990 рр.) (акад. Осипов В.І., проф. Демчишин М.Г., акад. Шнюков Є.Ф., акад. Шестопапов В.М. та ін.) [4–9]. В цілому сейсмо-геофізична та структурно-тектонічна вивченість території України є дуже нерівномірною і недостатньою для вірогідної оцінки інженерно-сейсмогеодинамічної небезпеки. Сейсмічність території України визначається сейсмоактивними зонами Карпат, особливо зоною масиву Вранча на стику Східних і Південних Карпат на території Румунії і зоною кримських сейсмогенних осередків. В останні роки зафіксовані малопотужні сейсмогенні осередки в Прикарпатті і Українських Карпатах.

В літописних джерелах зафіксовані руйнівні прояви сейсмічності на території України: в Києві в 1170, 1196, 1230 рр., зокрема, в 1230 р. внаслідок сильного землетрусу, що відчувався по всій території Русі (Київ, Переяслав, Новгород, Ростов), був зруйнований побудований в 1176 р. Успенський собор Печерської Лаври. Збережені дані про землетруси на Україні 1650, 1730, 1793 рр. Описані наслідки землетрусів 26.10.1802 р., 26.11.1829 р., 23.01.1838 р. Достатньо повно вивчений макроефект на території України землетрусів із зони Вранча 6.10.1908 р. та 22.10.1940 р. Спостерігались і вивчалися макроефекти руйнівних землетрусів 4.03.1977 р., 30.08.1986 р., а також 30.05.1990 р.

Активізація сейсмічної активності в зоні Вранча та Чорноморському регіоні, а також в цілому на планеті призвела до підвищення рівня сейсмічної небезпеки на всій території України та, у кінцевому підсумку, зростання відповідного зсувопровокуючого фактора. Україна, а не тільки карпатський і кримський регіони, як раніше вважалось, є зоною, де потенційно можливі землетруси, причому доволі сильні. «...В районах з послабленими ґрунтами (часті зсуви та ін.) можуть спостерігатись і 7–8-бальні ефекти», – підкреслює заступник директора Інституту геофізики НАНУ О. Кендзера [10]. До японського землетрусу (11.03.2011) вважалось, що при 9-бальному землетрусі прискорення може бути максимум 0,4 g. «Але японська катастрофа показала

всі 2,7 г. Це призвело до більших руйнувань, ніж очікувалось. Це значить, що час передивитись всі параметри землетрусів», – зазначає директор вірменського Інституту геофізики і інженерної сейсмології С. Огасян. О. Кендзера додає, що, відповідно, потрібно переглянути і дані, які використовують проектувальники при зведенні будівель та споруд [10].

Інженерний захист територій, будинків та споруд від небезпечних впливів сучасних геологічних процесів як науково-технічна проблема набуває дедалі більшої актуальності. Аналіз ефективності заходів з інженерного захисту, виконаних у минулому в окремих регіонах України, сучасний його стан свідчать, що за всіма основними напрямками вирішення проблеми існує багато питань, які потребують подальшого опрацювання. Про це свідчать масштаби та наслідки повені у Прикарпатті у липні 2008 р. Важливим напрямом, де потрібні нові підходи, є інженерно-технічні розвідування. Коли йдеться про здійснення заходів з інженерного захисту, то їх основним завданням є визначення масштабів реальної загрози руйнувань, яких можуть зазнати об'єкти й території від розвитку небезпечних геологічних процесів. Як недооцінка, так і переоцінка цієї загрози вкрай небажані. У першому випадку це спричинить непередбачено великі збитки, а в другому – невинуваті витрати.

У кожному конкретному випадку проектування та виконання заходів з інженерного захисту слід виходити з таких принципів [6, 8]:

- стимулювання здатності природних систем до саморегулювання й самовідновлення;
- урахування стабільності, циклічності та ритмічності, характерних для перебігу геологічних процесів, особливо екзогенних, що знаходяться в тісному зв'язку з гідрометеорологічними чинниками;
- адекватності заходів характеру і масштабам прояву небезпечних геологічних процесів, що важливо з економічних та екологічних позицій;
- комплексності проведення інженерного захисту й урахування селективності дії окремих заходів, спрямованих на усунення певних чинників, що спричиняють небезпечні геологічні процеси;
- поєднання захисних заходів з інженерною підготовкою території та елементів захисних систем з конструктивними елементами будівель і споруд.

Слід також удосконалювати методи оцінки вразливості об'єктів стосовно дії небезпечних геологічних процесів та способи її зменшення [11–13]. Для математичного моделювання напружено-деформованого стану схилів існує багато програм та програмних комплексів: канадська програма GEOSLOPE, програмний комплекс LANDSLIDE різних версій та ін. [14–16]. Однак, на ранній стадії проектування протизсувних споруд для оперативних наближених розрахунків коефіцієнта стійкості схилу та зсувного тиску потрібна програма, яка має наступні властивості: зручність у користуванні; графічний, людино-орієнтований інтерфейс; базується на апробованих математичних методах; наділена приємною формою подання результатів розрахунків (графічна та таблична форми); швидкість виконання розрахунків та ін.

На наш погляд, всім цим вимогам відповідає програма LANDSLIDE. На рис. 2 та 3 наведено типовий розрахунок за допомогою програми LANDSLIDE. У таблиці 1 наведені коефіцієнти стійкості схилу, відповідні кожному з трьох варіантів та розраховані за допомогою програми **LANDSLIP** методами Маслово-Берера і Шахунянца.



Таблиця 1 – Коефіцієнт стійкості схилу  $K_y$

№ п/п	Номер варіанта	$K_y$ , розрахунок за методом Шахунянца	$K_y$ , розрахунок за методом Маслова- Берера	Сейсмічність, бали
1	Тестовий приклад	1.16	1.23	0- 6
2	1	1.07	1.15	7
3	2	0.99	1.07	8
4	3	0.87	0.95	9

На рис. 2 і 3 наведені епюри зсувного тиску, отримані при математичному моделюванні фактору сейсмічності за допомогою програми **LANDSLIP**.

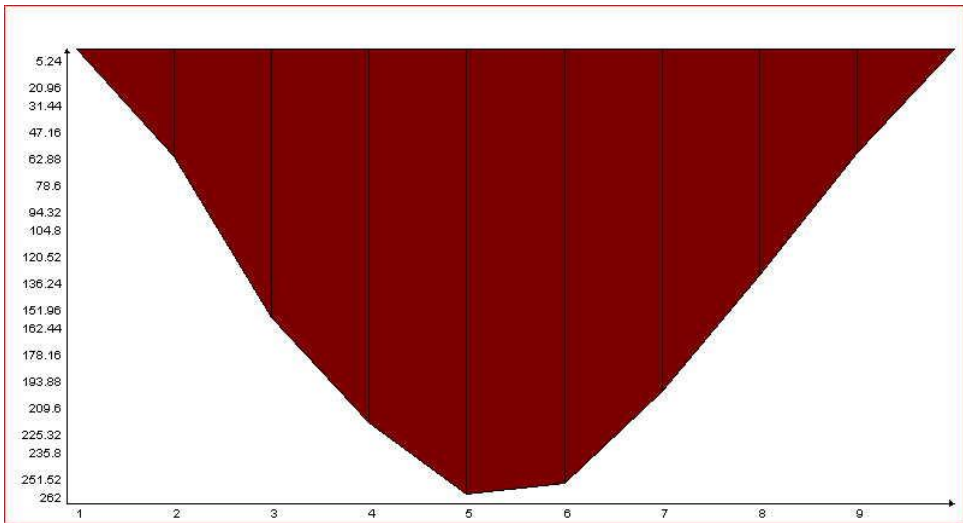


Рис. 2 – Епюра зсувного тиску. Тестовий приклад. Метод Шахунянца

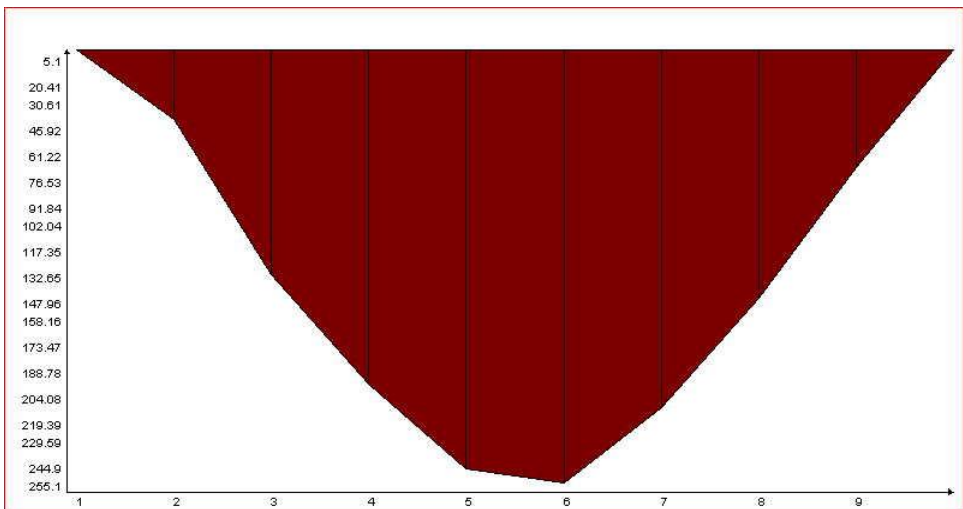


Рис. 3 – Епюра зсувного тиску. Варіант № 3. Метод Маслова-Берера

За допомогою аналізу чисельних розрахункових даних отримано наступне:

1. Незначне підвищення сейсмічності майданчика будівництва (7–8 балів) призводить до зниження коефіцієнта стійкості. Схил, спочатку стійкий, переходить в стан граничної рівноваги.

2. Подальше підвищення сейсмічності майданчика будівництва (до 9 балів і вище) призводить до зниження коефіцієнта стійкості до 20% ~ 25%. При розрахунковому землетрусі відбудуться незворотні зрушення зсувних мас вниз по схилу, що в окремих випадках може призвести до загибелі людей і руйнування будівельних конструкцій, що зводяться на такому схилі.

3. За даними чисельних розрахунків, отриманих на основі комп'ютерної програми LANDSLIP, можна поетапно простежити процес накопичення і перерозподілу напружень в зсувному схилі при підвищенні сейсмічності майданчика будівництва, що призводить, в кінцевому підсумку, до руху зсуву (розвантаження накопиченої напруженості):

- Симетричний розподіл зсувного тиску при сейсмічності будівельного майданчика від 0 до 6 залишається симетричним і при сейсмічності 9 балів. Однак при цьому, при зовнішньому збереженні форми розподілу зсувного тиску, відбуваються суттєві кількісні зміни результуючого зсувного тиску по блоках.

- При зниженні сейсмічності майданчика від 6 до 9 балів відбувається поетапне зменшення максимуму зсувного тиску в схилі приблизно 10–15% на один бал, що корелює зі зниженням підсумкового коефіцієнта стійкості зсувного схилу в цих же межах. Схил зі стану стійкої рівноваги переходить в нестійкий стан при розрахункових параметрах землетрусу (сейсмічність будівельного майданчика 8–9 балів).

- Щоб перейти в нову стійку «форму», під час землетрусу відбудеться «розвантаження накопиченої напруженості» – рух зсувних мас. Схилі маси стануть стійкими вже в новому положенні, нижче щодо початкового положення по висоті.

## **Висновки**

1. Наведено приклад врахування сейсмічних факторів при розрахунках схилів за другою групою граничних станів.

2. В межах теорії граничної рівноваги описаний механізм «розвантаження накопиченої напруженості» в схилі масиву при землетрусі.

## **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Lacasse S. 8th Terzaghi Oration Protecting society from landslides – the role of the geotechnical engineer. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013. – P. 15–34.
2. The U.S. Geological Survey Landslide Hazards Program 5-Year Plan 2006-2010. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey.
3. National Landslide Hazard Mitigation Strategy – A framework for loss reduction / Circular 1244. U.S. Department of the Interior. USGL.
4. Екологічна безпека техноприродних геосистем у зв'язку з катастрофічним розвитком геологічних процесів / Гошовський С.В., Рудько Г.І., Преснер Б.М. – К., ЗАТ "НІЧЛА-ВА", 2002. – 624 с.

5. Шнюков Е.Ф. Шестопапов В.М., Демчишин М.Г. и др. Экологическая геология Украины. Справочное пособие. – К.: Наук. думка, 1993. – 408 с.
6. Демчишин М.Г. Современная динамика склонов на территории Украины (Инженерно-геологические аспекты). – К.: Наук. думка, 1992. – 256 с.
7. Евсеев С.В. Землетрясения Украины. – Киев. Изд.-во АН УССР, 1961. – 75 с.
8. Демчишин М.Г., Краев В.Ф. Динамика и сейсмичность склонов территорий, прилегающих к сейсмогенным зонам // Геол. журн. 1987. № 6. – С. 42–48.
9. Чекунов А.В., Кутас В.В., Харитонов О.В. Сейсмичность Киева // Геол. журн. 1991. – № 2. – С. 24–33.
10. Ученые: Сильные землетрясения могут быть во всей Украине Новости Украины / 23 марта 2011 | 08:51 Режим доступа: <http://for-ua.com/ukraine /2011/03/23/085121.html>
11. Сиренко А.П. Влияние уровня грунтовых вод на устойчивость оползневого склона / А.П. Сиренко // Будівельні конструкції: зб. наук. пр. – К. : ДП НДІБК, 2014. – Вип. 80. – С. 210–213.
12. Трофимчук А. Н. Математическое моделирование устойчивости оползневого склона при подъеме уровня грунтовых вод / А. Н. Трофимчук, Ю. И. Калюх, А. С. Глебчук // Екологія і ресурси. – 2008. – № 18. – С. 51–58.
13. Сиренко А.П. Критична відстань між утримуючими елементами для зсувних та зсувонебезпечних схилів Чернівецької області / А.П. Сиренко // Екологічна безпека та природокористування. – 2013. – № 13. – С. 73–76.
14. Kaliukh Yu.I., Khavkin A., Khavkin K. Experimentally-analytical researches of the technical state of reinforce-concrete constructions for defense from landslide's pressure in seismic regions of Ukraine // Fib Symposium Tel-Aviv 2013. – P. 625–628.
15. TXT-tool 2.380-1.1: Monitoring and Early Warning System of the Building Constructions of the Livadia Palace, Ukraine / O. Trofymchuk. I. Kaliukh, O. Klimenkov / In book: Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools. – 2018. – P. 491–508.
16. Сиренко А.П. Формування оптимальних по Парето рішень відмов ґрунтової основи в умовах сейсмічної небезпеки / А.П. Сиренко // Екологічна безпека та природокористування. – 2019. – № 30. – С. 114–122. doi:<http://dx.doi.org/10.32347/2411-4049.2019.2.113-122>

Стаття надійшла до редакції 24.10.2019 і прийнята до друку після рецензування 26.12.2019

## REFERENCES

1. Lacasse, S. (2013). 8th Terzaghi Oration Protecting society from landslides – the role of the geotechnical engineer. In *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 2013. (pp. 15-34). Paris.
2. The U.S. Geological Survey Landslide Hazards Program 5-Year Plan 2006-2010. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey.
3. National Landslide Hazard Mitigation Strategy – A framework for loss reduction. Circular 1244. U.S. Department of the Interior. USGL.
4. Hoshovskyi, S.V., Rudko, H.I., & Presner, B.M. (2002). *Ekolohichna bezpeka tekhnopryrodnykh heosystem u zviazku z katastrofichnym rozvytkom heolohichnykh protsesiv*. Kyiv: ZAT "NICHLA-VA". (in Ukrainian)
5. Shniukov, E.F. Shestopalov, V.M., & Demchishin, M.H. (1993). *Jekologicheskaja geologija Ukrainy. Spravochnoe posobyje*. Kyiv: Nauk. dumka. (in Russian)
6. Demchishin, M.G. (1992). *Sovremennaja dinamika sklonov na territorii Ukrainy (Inzhenerno-geologicheskie aspekty)*. K.: Nauk. dumka. (in Russian)
7. Evseev, S.V. (1961). *Zemletrjasenija Ukrainy*. Kiev: Izd.-vo AN USSR. (in Russian)
8. Demchishin, M.G., & Kraev, V.F. (1987). Dinamika i sejsmichnost' sklonov territorij, priliegajushhiih k sejsmogennym zonam. *Geol. Zhurn.*, 6, 42-48. (in Russian)

9. Chekunov, A.V., Kutas, V.V., & Haritonov, O.V. (1991). Sejsmichnost' Kiev. *Geol. zhurn.*, 2, 24-33. (in Russian)
10. Uchenye: Sil'nye zemletrjasenija mogut byt' vo vsej Ukraine Novosti Ukrainy. (23 marta 2011 | 08:51). Retrieved from <http://for-ua.com/ukraine /2011/03/23/085121.html>. (in Russian)
11. Sirenko, A.P. (2014). Vlijanie urovnja gruntovyh vod na ustojchivost' opolznevogo sklona. *Budivelni konstruktsii: zb. nauk. pr.*, 80, 210-213. (in Russian)
12. Trofimchuk, A.N., Kaliukh, Ju.I., & Glebchuk, A.S. (2008). Matematicheskoe modelirovanie ustojchivosti opolznevogo sklona pri podjeme urovnja gruntovyh vod. *Ekolohiia i resursy*, 18, 51-58. (in Russian)
13. Sirenko, A.P. (2013). Krytychna vidstan mizh utrymuiuchymy elementamy dlia zsvnykh ta zsvonebezpechnykh skhyliv Chernivetskoj oblasti. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia*, 13, 73-76. (in Ukrainian)
14. Kaliukh, Yu.I., Khavkin, A., & Khavkin, K. (2013). Experimentally-analytical researches of the technical state of reinforce-concrete constructions for defense from landslide's pressure in seismic regions of Ukraine. In *Fib Symposium*, Tel-Aviv, 2013. (pp. 625-628). Tel-Aviv.
15. Trofymchuk, O., Kaliukh, I., & Klimenkov, O. (2018). TXT-tool 2.380-1.1: Monitoring and Early Warning System of the Building Constructions of the Livadia Palace, Ukraine. In book: *Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools* (pp. 491-508).
16. Sirenko, A. (2019). Formation by optimal on Pareto resolve of the problems of ground-based failure in conditions of seismic danger. *Environmental Safety And Natural Resources*, 30(2), 113-122. doi:<http://dx.doi.org/10.32347/2411-4049.2019.2.113-122> (in Ukrainian)

*The article was received 24.10.2019 and was accepted after revision 26.12.2019*

**Сіренко Анатолій Петрович**

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів Механіко-машинобудівного інституту НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

**Адреса робоча:** 03056 Україна, м. Київ-56, проспект Перемоги, 37

**e-mail:** [sirenkoap@gmail.com](mailto:sirenkoap@gmail.com)

ORCID ID: 0000-0002-4951-1165

## ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ NATURAL RESOURCES

UOT 626.84

**Bakhtiyar Mursal Mammadov**, PhD  
*e-mail*: meliorasiya58@mail.ru

Institute of Soil Science and Agrochemistry of ANAS, Baku, Azerbaijan

### EFFECT OF THE IRRIGATIVE WATER QUALITY ON ECOMELIORATIVE STATE OF SOILS

***Annotation.** The article deals with the influence of the irrigative water quality on soil meliorative state and ecology. The higher qualitative water creates a healthy ecological environment by affecting the soil meliorative state. This article informs us about rivers, lakes, sea, slop and underground waters and about usage opportunities from such waters in agricultural plants irrigation.*

*The terms of the international and interstates standards must be fulfilled in irrigative water use. A quantity of the injurious substances should be at a permissible limit. The water used in trickling and subsoil irrigation must be clean and limpid, the sizes of the particles floating in irrigation by the water-sprinkler machines and installations must be fitting to the exit diameter of the spraying apparatus tip.*

*The very turbid water on the surface irrigation creates difficulties in growing works by affecting the agricultural plants development negatively. The organic and mineral content of water render an influence on organoleptic indicators. The permissible limit improves irrigative water quality.*

*The qualitative waters play an important role in humus quantity increase.*

***Key words:** water-sprinkler; irrigative water; soil; quality; ecomeliorative; organic and mineral substance; organoleptic index*

### Introduction

The article is dedicated to the effect of the water quality which is used in irrigation of the agricultural plants on increase of the plant productivity, improvement of the environment and meliorative-ecological state of soils. The information about the waters of the river, lake, storehouse, underground and sea, sewer water sources and their state, at the same time the information about an accordance to the international and interstates standards of the water quality which is used in irrigation is given. From this point of view permissible limits of the useful and harmful mixture in the

irrigative water content are given. At the same time a role of the irrigative water in increase of the humus quantity is spoken.

### **Research object and method**

The water samples taken from the rivers, lakes, artesian and subartesian wells, seas, sewer water sources have been admitted as a research object in order to study a quality of the irrigative water and its influence on improvement of the soil meliorative-ecological state. The chemical content of the samples taken from the water sources, the mechanical mixtures quantity, turbidity degree and transparency has been fixed on the basis of the generally accepted methods. But the criteria of the water quality indices (para-meters) have been determined according to the international and interstates standards.

### **Analysis and discussion**

The waters of the rivers and lakes, underground and local flow, industrial and economical-life sewer are concerned the water sources for irrigation. Last years the sea water is begun to be used in irrigation. The taken water must be useful for irrigation of the agricultural plants. The water quality depends on quantity of organic and inorganic substances, microorganisms. The clay non-dissolved in water, residues of silt, plant and animal organisms, the different salts dissolved in water, gases, organic and inorganic combinations are a reason for water turbidity, and this changes its color and taste. The water resource and expenditure in the water source must provide a need for it [1, 8].

To provide the tillage areas with the irrigative water, the waters on land surface (rivers, lakes, water canals) and underground are used. The atmospheric precipitations form a base of the water source. The atmospheric precipitations falling to the earth surface (snow, rain) are expended for the different places, and run into the rivers in a direction of the ground inclination and make ponds, springs, it is a reason for subsoil waters creation, but the rest part evaporates. So, the water constantly circulates in the nature.

The subsoil water quality is various depending on natural condition, but its content depends on their creating situation. A content of the atmospheric waters is filtered from surface into soil changes depending on salts and other substances in the land layers. The water gives one substance into soil, and gets the other one from it, but the soil keeps mechanical mixtures in itself. Therefore, the subsoil waters are mainly pure. To use from such waters can be considered very rational in irrigation with water-sprinkler, drops, aerosol, and subsurface. The soil keeps oxygen, and substances as ammoniac, phosphate acid and potassium salts which are necessary for plants development [3].

The open waters sources, i.e. the rivers, canals, water storehouse, lakes and ponds are used in irrigation [2].

The atmospheric waters form a basis of the river waters, partially subsoil waters. The river waters keep a lot of colloid substances from animal micro-organisms are found. From this reason the river waters are near the atmospheric waters according to their physical, biological and chemical characters. A quantity of the mechanical and organic mixtures in the river waters changes depending on the year seasons. The river waters' quality depends on geological structure and local condition of the zone.

A number of various substances run into the rivers from the surface during the rainfalls and stream turbulent.

The salt quantity in the river waters can rise at the expense of the subsoil waters running into rivers. They are considered useful and necessary for watering of the agricultural plants. An observation of the dangerous microorganisms and bacteria in the river waters depends on presence of the dwelling points, communal and industrial enterprises. Fitness of such rivers for water provision is fixed by its bacteriological and biological content.

The lake and storehouse waters are not flowing waters. They get the water from atmospheric, river and subsoil water sources. Therefore a structure of the lake and storehouse waters is various. The subsoil waters flowing into the lake and water storehouses rise the water hardness, changes a temperature. The polluted waters flowing from the rivers contaminate the lake and storehouse waters. If it is necessary to use from the lake, pond and storehouse waters, firstly the chemical, bacteriological and biological content of the water must be fixed, then its fitness over setting must be defined [7].

The following main demands for a quality of the irrigative water must be made: it must improve a mechanical, chemical, biological, temperature regime of soil and it must be useful for irrigation with the available technics. A quality of the irrigative water is characterized by the water temperature, a quantity and coarseness of the particles floating in the water, the number of the organic and mineral substances in it (a quantity of soluble salt and chemical substances). The organic and mineral substances soak into soil by the irrigative water and rise its fertility, it causes an increase of the agricultural plants productivity [6].

Depending on water source its temperature is various. A water temperature in the open water sources mainly depends on air temperature, water deepness and water motion rate. An average temperature is 0-3°C in the lakes, but a temperature changes by 1-14°C in the artesian, kahriz (underground|pipe) and spring waters. While a temperature of the soil and air is low, the irrigative water cools the plant and consequently the plant development delays. Therefore, the water temperature should be near 20°C. If the water temperature is low under the natural condition, then it must be warmed as soon as possible. Using from the waters of which temperature isn't lower than 14-17°C for irrigation is advisable. In this case 6-20% is economized for the irrigative water expended on plant unit, but productivity can rise till 14-20% [9].

The water turbidity is a quantity of the organic particles with gram in 1 litre of water and it has a great importance for the irrigation systems. The lake, pond, plain river waters and subsoil waters aren't turbidity. The little deponent particles with the nutrient enter the area by the river waters which are considered a main water source, they moisten not only the soil but also fertilizer the area. The coarse particles in the silty waters which are transported by the canal, chute and pipeline trouble the deposit, and the little particles run into the area [9]. There mustn't be floating particles more than 0,5 mm in the water during the irrigation with the water-sprinkler machines as "Cuban", "Dnepr", "Fraqat", "Voljanka" and others, the turbidity must be less than 1-1,5 g/l in irrigation with a hose, less than 3-4 g/l in irrigation from underground pipelines [3]. There mustn't be particles floating in the water during subsurface, dropping and aerosol irrigations, the water must be mechanically pure. That is, using of the silty water with these methods in irrigation isn't absolutely advisable. While performing irrigation with the surface method, stripe or furrows, the harmful

mechanical mixtures in the more turbidity waters, especially the insoluble particles form a layer within the certain density. Then this stratum crusts, and consequently it hampers cultivation. Sometimes, the shoots are covered with the complete or partly these particles, this prevents the following development of the plants.

While performing water-sprinkler with the siltier water, the silty water splashes in a rain form falls on the plant trunk and leaves, disturbs photosynthesis processes, sometimes the plants bend as a result of heaviness and lose stability. After irrigation the silty stratum remained on the leaves delays its development, and it may negatively effect on crop (especially fruit) appearance. A quantity of mineral substances in irrigation water for some plants is till 1-1,5 g/l, but saltiness is till 5-8 g/l and it isn't considered dangerous. 15-20 g/l of the soluble salts quantity in water is considered harmful [2]. Therefore getting the water from the delta part of which mineralization decreased as a result of flowing sweet river water into the sea is advisable while using from the sea water in irrigation.

While using from slops in irrigation the chemical analysis must be performed in order to fix a quantity of the useful (phosphorus, nitrogen, potassium) and harmful (pitch, soda, phenol, oil products, lead, phor and etc) substances and their number must be compared with the permissible concentration. During the comparison presence of more soda quantity is very dangerous [1, 6].

Using of the mineralized water in irrigation depends on mutual relation of some factors, for.ex. climate, zone draining, mechanical and chemical content of soil-ground, irrigation technics, plant agrotechnics.

A quality of natural water sources is characterized with a quantity of organic and inorganic substances, microorganisms, physico-chemical indices and pathogenic bacteria content. The water normal qualitative parameters and its differences from the permissible limit are determined by a standard. The farming-drinkable water equipment sources of State Standard 2761-84, "Centralized economical-drinkable water provision sources are chosen according to the standard hygienic, technical requirements and distinguishable rules" [4, 5].

The sanitary quality of water is regulated with the "Drinkable water" standard of State Standard 2874-82. The organoleptic indices as a taste, smell, transparence of water good for the human's organism in this standard, the harm-lessness and epidemic safety parameters of the water chemical composition were given. The water turbidity depends on particles quantity. The particles floating in the water form an important condition for pathogenic bacteria development. Therefore a content of the water which is floated by the pipelines is very seriously limited. Its concentration mustn't overstep 1,5 mg/l limit [4]. There is melted iron and humus substances in the pure water, and it is not dreadful for the organism. These substances give brown-yellowish or yellow color to the water. When hydrosulphite (sulphur hydrogen) is present, its colour becomes greenish. The analyses show that presence of mineral substances in the water doesn't negatively influence on alive organisms. But mineral substances deteriorate the water taste, disturb transparence. Presence of the taste and smell in the pools, storehouses and lake waters is connected with the development, destruction, decomposing of the organic substances in the water and etc.

The mineral mixtures influencing on organoleptic composition of water mustn't overstep the displayed limit, by mg/l: dry residue – 1000, chloride (Cl) – 350, sulphate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) – 500, the iron ( $\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}$ ) – 0,3, manganese ( $\text{Mn}^{2+}$ ) – 5,0, aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ) – 0,5, metaphosphate ( $\text{PO}_3$ ) – 3,5, zinc ( $\text{Zn}^{2+}$ ) – 5,0, copper ( $\text{Cu}^{2+}$ ) – 1,0 [8].



Less mineralization of water (till 100 mg/l) deteriorates its taste, but absence of salt (distilled water) in water is harmful for the human's organism. According to the information of the sanitary epidemiological service organs while dry residue quantity in water is till 1500 mg/l, a quantity of iron in the used subsoil waters is till 1 mg/l, it is considered admissible.

Chloride and sulfate concern the main quality indices of the water. While the concentration is high it can harmfully influence on plants. The approximate parameters by mg/l which characterize the irrigative water fitness (fitness criterion for irrigation according to the chemical content of water) is as the following: while a quantity of oxygen in water content is more than 5, salts are less than 800, chlorides are less than 300, sulphates are less than 25, the same water is good for irrigation; but the water is considered useless for irrigation while oxygen is less than 3, salts are more than 1200, chlorides are more than 400, sulphates are more than 300 [3, 8]. Presence of free chlorine, sulphur (more than 0,5 mg/l) and fluorine (more than 1 g/l) in water is not permissible. The admissible maximal limit of the harmful substances must be so: mercury – 0,005 mg/l, arsen and selen – 0,05 mg/l, copper, cadmium, chrom, tin, cyanide, hydro-carbon, oil-products – 0,1 mg/l, sulphide, trinitrobenzol – 0,5 mg/l, carbon-sulphide, fluorine (colourless gas) – 1mg/l, zinc – 5 mg/l. The water quality mustn't lag behind drinkable water for the animal watering. At the same time, the requirements for its content, taste, smell, transparency can be reduced [7].

Improving the water qualities to dilute, to filter, to free from microbes, to purify the substances which inflict harm upon the human's and animals life and plants, and to lay obstacles for its using in industry, to improve an ecological state of soils and environment and to get pure product ecologically.

## **Conclusion and recommendations**

1. The water must meet the following requirements, irrigation: the mexanical, chemical, biological, temperature, there should be suitable for irrigation equipment to improve their land. The quality of water for Irrigation water temperature, mineral and organic substances should be characterized by a number of parts floating in the water, its content and size. Chloride and sulphate salts are more than -1200 mq/l least partially, at least, are suitable for irrigation water, oxygen in water content is more than 5, salts are less than 800, chlorides are less than 300, sulphates are less than 25, the same water is good for irrigation; but the water is considered useless for irrigation while oxygen is less than 3, salts are more than 1200, chlorides are more than 400, sulphates are more than 300.

2. Drip irrigation water in irrigation canals, rivers, reservoirs, lakes and ponds is efficient use of water sources, that is, the surface or underground water, and spray with sprinkler, sulsurface mainly by the method of mechanical cut off with jets open.

3. The natural water sources of organic and inorganic substances and microorganisms, bacteria causing the disease and physico-chemical indicators of the quality of content must be characterized with the composition of. Water quality and its allowable limit should be determined by the standards of nominal.

4. To improve water quality, free from germs, which can serve improvement of environmental situation is necessary to limit the damage to crops from a mixture of soil and environment in general.

## REFERENCES

1. Alasgarov, H.M. (2008). *Agricultural water supply. Study guide*. Ganja.
2. Andreev, N., et al. (1979). *Cultural pasture on irrigated lands*. Moscow: Kolos.
3. Bagirov, Sh.N. (1985). *Melioration of Irrigation*. Baku: Maarif.
4. Drinking water. ГОСТ 2874-73. Moscow: Goskomstandart.
5. Drinking water. Methods for determination of the mass concentration of fluoride. ГОСТ 4386-81. Moscow: Goskomstandart.
6. Isaev, I.P., Sergeev, B.I., & Didur, V.A. (1990). *Hydraulics and hydromechanization agricultural processes*. Moscow: Agropromizdat.
7. Kazimov, T.M. (2009). *In the livestock farm mechanization of water supply*. Baku: Azerneshr.
8. Mammadov, B.M. (2011). Effect of environmental protection yields and quality of Irrigation water. *Soil and agrochemistry*, 20(1), 275-278.
9. Palishkin, N.A. (1990). *Hydraulics in agricultural water supply*. Moscow: Agropromizdat.

*The article was received 31.10.2019 and was accepted after revision 10.01.2020*

**Б.М. Мамедов**

### **ВПЛИВ ЯКОСТІ ЗРОШУВАЛЬНОЇ ВОДИ НА ЕКОМЕЛІОРАТИВНИЙ СТАН ҐРУНТІВ**

**Анотація.** У статті описано вплив якості зрошувальної води на екологічний та меліоративний стан ґрунту. Покращена якісна вода створює екомеліоративне середовище, яке впливає на екологічний та меліоративний стан ґрунту. Надано інформацію про склад річкових, озерних, морських, стічних і підземних вод, про їх використання при зрошенні сільськогосподарських культур. При використанні зрошувальної води слід дотримуватися міжнародних і міждержавних стандартів. Використовуючи при поливі воду зі шкідливими домішками, необхідно дотримуватися допустимих норм. При крапельному і підґрунтовому зрошенні поливна вода повинна бути чистою, під час дощування плаваючі частинки мають відповідати діаметру наконечника дощувального апарату. При поверхневому поливі занадто каламутна зрошувальна вода затримує розвиток рослин і створює труднощі під час обробки ґрунту.

Мінеральний і органічний склад води впливає на органолептичний показник. При допустимих концентраціях домішок поліпшується якість зрошувальної води. Зрошувальна вода відіграє важливу роль для підвищення кількості гумусу в ґрунті.

**Ключові слова:** дощування; зрошувальна вода; ґрунт; якість; екомеліоратив; мінеральні та органічні речовини; органолептичний показник

**Мамедов Бахтіяр Мурсал огли**

кандидат технічних наук, Інститут ґрунтознавства та агрохімії Національної академії наук Азербайджану

**Адреса робоча:** AZ1073 Азербайджан, м. Баку, вул. М. Рагіма, 5

**e-mail:** meliorasiya58@mail.ru

УДК 502.3

**Volodymyr D. Pohrebennyk**<sup>1</sup>, Full professor, D. S., Professor at the Department of Ecological Safety and Nature Protection Activity  
ORCID ID 0000-0002-1491-2356 *e-mail*: vpohreb@gmail.com

**Anatoly A. Nester**<sup>2</sup>, PhD (Engineering), Associate Professor

<sup>1</sup>Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

<sup>2</sup>Khmelnitsky National University, Khmelnytsky, Ukraine

## ASSESSMENT OF THE RISK OF EMERGENCY SITUATIONS DURING THE STORAGE OF GALVANIC WASTE

**Abstract.** *The article is dedicated to the research of the consequences of emergencies related to the storage of waste (sludge) on the territory of the enterprise, as well as directly in the process of carrying out technological processes for the estimation of danger to health and human life. The problem of industrial and household waste recycling is becoming more pressing nowadays taking into consideration constantly increasing volume of waste generation, while the rate of its processing is incomparably small. As a result, hundreds of millions of tons of various solid wastes must be recycled and disposed.*

*The scale of annual production and accumulation of solid waste requires the creation of powerful processing plants with a capacity of millions tons per year with their industrial development. The environment is considered to be safe when its condition meets legislated criteria, standards, limits and standards established by legislation concerning cleanliness (not pollution), not exhaustion, environmental sustainability, sanitary requirements, ability to satisfy the interests of citizens. The level of environmental pollution in the areas of production of plates, galvanizing and painting plants, which are the greatest sources of environmental hazard and belong to main pollutants.*

*The question of risk estimation and management in different production branches of Ukraine and leading countries nowadays became urgent and significant because of repeated use of chemical elements, imperfection of disinfection and utilization processes.*

*The work objective lies in estimation of hazard level to human health and life consequent on occurring emergencies, connected with galvanizing processes and waste conservation (sludge) on the territory of the enterprise.*

*Sludge hazard classes during production of plates and galvanics are defined, allowing a possibility of searching the ways for increasing ecological safety level of territories of enterprises, involved in plate and galvanics production.*

*Application of "risk" definition lead to impossibility of the development of unified approach to its estimation. Plenty of risk types exists, among which is ecological risk. National standard of Ukraine (ДСТУ 2156-93. Industrial safety. Definitions) specifies risk of industrial enterprises as probability of potential danger realization, initiated by industrial enterprises and (or) negative consequences of this realization.*

*On the grounds of research results of galvanic sludge content the effective content and dangerous substances content was determines. Two examples of sludge taken from different Ukrainian enterprises, kept inside plantsite area, were shown. It was determined that hazard index is above normal and this risk level is inadmissible.*

*Emergencies, accompanied by storage area dismemberment and lead to galvanic sludge insertion into the environment, increasing risk for human health. Obtained*

level of carcinogenic risk and hazard index indicate on the necessity of carrying complex of resolutions concerning prevention of emergencies and minimizing their consequences. Following researches have to be directed for search of alternatives of sludge storing on the territories of enterprises, for wastes utilization with separation of valued components and recurrent use of solutions in technological processes.

**Keywords:** hazard index; plate production; waste recycling; environmental safety

**В.Д. Погребенник<sup>1</sup>, А.А. Нестер<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

<sup>2</sup>Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна

## **ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ВІД АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ ПІД ЧАС ЗБЕРІГАННЯ ГАЛЬВАНІЧНИХ ВІДХОДІВ**

**Анотація.** Статтю присвячено дослідженням наслідків виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних зі зберіганням відходів (шламів) на території підприємства, так і безпосередньо в процесі проведення технологічних процесів, для оцінювання небезпеки для здоров'я та життя людини. Проблема утилізації відходів промислового й побутового походження набуває в наш час усе більш гострого характеру у зв'язку з тим, що обсяги генерування відходів постійно зростають, тоді як темпи їхнього перероблення незрівнянно малі. У результаті дотепер накопичено сотні мільйонів тонн різних твердих відходів, які необхідно переробляти й знешкоджувати. Масштаби щорічного продукування й нагромадження твердих відходів вимагають створення потужних переробних установок продуктивністю, вимірюваною мільйонами тонн у рік з їх промисловим освоєнням. Навколишнє середовище вважається безпечним, коли його стан відповідає встановленим у законодавстві критеріям, стандартам, лімітам і нормативам, які стосуються чистоти (не забруднення), не виснаженості, екологічної стійкості, санітарних вимог, здатності задовольняти інтереси громадян. Забруднення навколишнього середовища в районах розташування цехів виробництва плат, гальванічних і фарбувальних цехів, які є найбільшими джерелами екологічної небезпеки, належить до числа основних забруднювачів.

Питання оцінювання та управління ризиком в різних галузях виробництва України та передових держав набули актуальності та значущості сьогодні через широке використання хімічних елементів, недосконалість процесів знешкодження, утилізації відходів.

Метою роботи є оцінювання рівня небезпеки для здоров'я та життя людини внаслідок виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних з гальванічними процесами та зберіганням відходів (шламів) на території підприємства.

Визначено класи небезпеки шламу виробництва плат та гальваніки, що дає змогу намітити шляхи для підвищення рівня екологічної безпеки територій підприємств виробництва плат і гальваніки.

Застосування терміну "ризик" призвело до неможливості розробити уніфікований підхід до його оцінювання. Існує багато видів ризиків, серед яких є екологічний ризик. Державний стандарт України (ДСТУ 2156-93. Безпечність промислових підприємств. Терміни та визначення) визначає ризик промислового підприємства як імовірність реалізації потенційної небезпеки, що ініціюється промисловим підприємством, та (або) негативних наслідків цієї реалізації.

*За результатами дослідження складу гальванічних шламів встановлено якісний склад та вміст небезпечних речовин. Подано два приклади шламів різних українських підприємств, які зберігаються на заводських територіях. Встановлено, що індекс небезпеки перевищує норму, тому такий рівень ризику є неприйнятним. Аварійні ситуації, що супроводжуються порушенням цілісності місць зберігання і призводять до потрапляння гальванічного шламу в довкілля, підвищують ризик для здоров'я людини. Отримані рівні канцерогенного ризику і індексу небезпеки вказують на необхідність прийняття комплексу рішень щодо відвертання виникнення надзвичайних ситуацій, а також мінімізації їх наслідків. Подальші дослідження повинні бути направлені на пошук альтернатив зберіганню шламів на територіях підприємств, на перероблення відходів з видаленням цінних компонентів та повторним використанням розчинів у технологічних процесах.*

**Ключові слова:** індекс небезпеки; виробництво плат; утилізація відходів; екологічна безпека

## Вступ

Питання стану та якості води є одними з пріоритетних в екологічній політиці європейських країн [1–3]. Стічні води, які містять важкі метали, становлять небезпеку для навколишнього середовища [4–8]. Гальванічне виробництво є одним з найнебезпечніших джерел забруднення довкілля, головним чином поверхневих і підземних вод, через утворення великого об'єму стічних вод, а також великої кількості твердих відходів, особливо від реагентного способу знешкодження стічних вод [9]. Сполуки металів, які виносяться стічними водами гальванічного виробництва, досить шкідливо впливають на екосистему ґрунт – рослина – тваринний світ – людина.

Під час використання гальванічних процесів в сучасному виробництві виникає ризик, пов'язаний з аварійними ситуаціями, який можна розглядати як ризик зберігання відходів, так і ризик в процесі проведення технологічних процесів. При цьому прийнято виділяти технічні, технологічні, організаційні та інші причини розвитку несприятливих ситуацій. Як ризик зберігання відходів, так і ризик в процесі проведення технологічних процесів є небезпекою для навколишнього середовища, в якому перебуває людина, тваринний світ та фауна. Тому такий ризик можна називати екологічним.

Сучасні підприємства, як і в кращий для виробництва час, виробляли приблизно  $4 \cdot 10^3$  м<sup>2</sup> плат, накопичили на своїй території по 1500-3000 тонн відходів за рік у вигляді солей, які зберігаються в ємкостях, поліетиленових мішках та потрапляють під дію атмосферних опадів. У процесі дії на них атмосферних опадів солі вимиваються та переходять в ґрунти, поверхневі води, забруднюючи навколишнє середовище.

Виробництво друкованих плат в Україні представлено підприємствами серед яких: АТ НПО “ЭТАЛ” м. Кіровоград, який випускає близько 4–5 тис. м<sup>2</sup> плат, маючи потужності для випуску 50000 м<sup>2</sup> плат, ДП “Гальванотехніка” ПАТ “Київського заводу “Радар”, ПАТ “Новатор” (м. Хмельницький) з випуском в межах 0,9 тис. м<sup>2</sup>, ПАТ “Концерн-Електрон” – 0,8 тис. м<sup>2</sup>. Це означає, що тільки одне підприємство може скинути зі стічними водами або накопичити шламів за рік до 5-6 т міді, що явно не веде до поліпшення екологічної обстановки навколо підприємств, які займаються виробництвом плат. До 1992 р. тільки в Києві скидалось більше 20 т міді

щорічно. Завод “Електронмаш” щорічно травив  $\approx 15\ 000\ \text{м}^2$  плат (а це призводить до виділення 7500 кг міді) [9].

Надзвичайні ситуації, які можуть виникнути під час зберігання та в процесі проведення технологічних процесів, можуть відрізнятися за ступенем тяжкості та характером наслідків. Їх негативний вплив відтворюється у вигляді прямої або побічної екологічної, економічної та соціальної шкоди.

Особливу небезпеку для людини і біоти становлять важкі метали. Шкідливий вплив таких важких металів, як хром і нікель, значно підвищується за їх канцерогенними властивостями, які проявляються в мутагенному ефекті, хромосомних ушкодженнях, зміні репарації ДНК і тому подібне.

Свинець впливає на кровотворну і нервову системи, шлунково-кишковий тракт і нирки. Сприяє анемію (оскільки включається до ланцюга біосинтезу гема і скорочує період життя еритроцитів), а також енцефалопатію, зниження розумових властивостей, викликає гіперкінетичні або агресивні стани, шлунково-кишкові розлади, диспепсію, кольки, нефропатію.

Кадмій — важкий метал, віднесений до другого класу небезпечності, має виражену тенденцію до накопичення в організмі. Отруєння кадмієм відбувається при потраплянні його в шлунок або інгаляційним шляхом. Абсорбований кадмій накопичується в печінці та нирках у вигляді комплексу з металотіонеїном. В еритроцитах і м'яких тканинах кадмій зв'язується з альфа 2-макроглобуліном та альбуміном. Кадмій зв'язується із сульфгідрильними групами білків, що призводить до їх денатурації та інактивації ферментів; пригнічується діяльність мітохондрій, підвищується вільнорадикальне окислення в клітинах. Концентрацію кадмію в нирках можна оцінити, досліджуючи нейтронно-активаційним методом отриманий субстрат сечі.

Хром викликає рак легенів і органів шлунково-кишкового тракту; нікель – рак носової порожнини і легенів [9]. За рахунок утворення комплексів з біоорганічними з'єднаннями вони довгий час можуть знаходитися в доступній для живих систем формі. Нікель індукує канцерогенез пригніченням генів і в результаті процесів гіперметилування і мутації ДНК, перетворення генів-супресорів пухлин в гетерохроматин.

## **Мета дослідження**

Метою роботи є оцінювання небезпеки для здоров'я та життя людини наслідків виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних з гальванічними процесами та зберіганням відходів (шламів) на території підприємства.

## **Матеріали і методи**

Нині єдиною офіційно затвердженою в Україні методикою визначення класу небезпеки відходів є державні санітарні правила і норми ДСанПіН 2.2.7.029-99 «Гігієнічні вимоги до поводження з промисловими відходами та визначення їх класу небезпеки для здоров'я населення» [10]. Цей нормативний документ містить деякі норми, що не відповідають вимогам діючого законодавства України та принципам державної регуляторної політики, тому Рішенням Державної служби України з питань регуляторної політики та розвитку підприємництва № 33 від 15.07.2014 р. Міністерству охорони здоров'я України було запропоновано визнати ДСанПіН 2.2.7.029-99 такими, що втратили

чинність, та усунути порушення принципів державної регуляторної політики у двомісячний строк з дня прийняття такого рішення. Проте і досі жодні зміни не були внесені у цей документ і жодних нових правил визначення класу небезпеки відходів Міністерством охорони здоров'я України розроблено не було і де-факто на практиці фахівці вимушені продовжувати користуватися цим нормативним недіючим документом, адже альтернативи немає.

Методику, яку висвітлено у вказаному нормативному документі, поширюють на тверді промислові та побутові відходи.

Суть методики визначення класу небезпеки складного відходу, описаної в [10], полягає в тому, що для окремого хімічного інгредієнта відходу визначають індекс токсичності за таким виразом

$$K_c = \frac{\lg(LD_{50})i}{(S + 0,1F + C_w)i}, \quad (1)$$

де  $LD_{50}$  – середня смертельна доза хімічного інгредієнта під час потрапляння в шлунок,  $S$  – коефіцієнт, який відображає розчинність хімічного інгредієнта у воді,  $F$  – коефіцієнт летючості хімічного інгредієнта,  $C_w$  – кількість даного інгредієнта в загальній масі відходу, або його частка т/т;  $i$  – порядковий номер конкретного інгредієнта.

Після розрахунку індексів токсичності всіх компонентів відходу вибирають не більше трьох, але не менше двох основних (визначальних компонентів), які мають найменші індекси токсичності  $K_c$ , при цьому повинна виконуватись умова  $K_1 < K_2 < K_3$ , крім того, повинно витримуватись ще і таке співвідношення:  $2 + K_c > K_3$ . Далі визначають сумарний індекс токсичності згідно з таким виразом

$$K_\sigma = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n K_i, n \leq 3. \quad (2)$$

Визначення ступеня токсичності подано у табл. 1.

Таблиця 1 – Класифікація небезпек відходів за  $LD_{50}$

Величина $K_\sigma$ (по $LD_{50}$ )	Клас небезпеки	Ступінь токсичності	Еквівалент $LD_{50}$	$Lg(LD_{50})$
Менше 1.3	I	Надзвичайно небезпечні	15	1.176
1.3 – 3.3	II	Високонебезпечні	150	2.176
3.4 – 10	III	Помірно небезпечні	5000	3.699
Більше 10	IV	Малонебезпечні	>5000	3.778

Однак, для деяких шкідливих інгредієнтів дренажних вод у цьому документі відсутня інформація щодо конкретних значень середньої смертельної дози  $LD_{50}$ . Вона також відсутня і в інших відкритих джерелах інформації.

Тоді вказана методика рекомендує використовувати умовні величини  $LD_{50}$ , які орієнтовно визначають за показниками класу небезпеки цих інгредієнтів у повітрі робочої зони. Такі умовні величини  $LD_{50}$  подано у табл. 1.

Але для деяких складників відходів не існує розроблених і впроваджених схем утилізації, знешкодження чи оброблення. Основна частина всієї маси дренажних вод видаляється після часткового очищення шляхом скиду у природні водойми. В такій ситуації буде мати місце безпосередній контакт маси недоочищених рідких відходів з об'єктами навколишнього природного середовища. Вказана методика рекомендує для спрощення розрахунків під час визначення класу небезпеки рідких відходів використовувати гранично допустиму концентрацію (*MPC*) (*maximum permissible concentration*) у ґрунті, а індекс токсичності для окремого складника визначати за таким виразом:

$$K_i = \frac{MPC_i}{(S + 0,1F + C_w)i} \quad (3)$$

Коефіцієнт розчинності *S* хімічного інгредієнта у воді визначають так. За допомогою довідників знаходять розчинність хімічного інгредієнта у воді у грамах на 100 г води за температури не вище 25<sup>0</sup>С. Цю величину ділять теж на 100 і отримують безрозмірний коефіцієнт, який в більшості випадків знаходиться в інтервалі від 0 до 1.

Коефіцієнт летючості *F* – другий доданок у знаменнику виразу (1), а також формули (3) – отримують за допомогою відповідних довідників, де визначають тиск насичених парів в мм рт. ст. інгредієнтів відходу за температури 25<sup>0</sup>С, що мають температуру кипіння за тиску 760 мм рт. ст. не вище 80<sup>0</sup>С; одержану величину ділять на 760 і отримують безрозмірну величину *F*, яка знаходиться в інтервалі від 0 до 1.

Також варто зауважити, що у випадку відсутності для деяких інгредієнтів однієї або двох із загальної кількості трьох характеристик, що містяться у знаменнику виразу (3), замість конкретного значення слід записувати цифру 0.

Для оцінювання канцерогенного ризику від важкого металу розраховуємо середню добову дозу *LADD*, усереднену з урахуванням очікуваної середньої тривалості життя людини (70 років) за формулою (4) [11]:

$$LADD = \frac{C \cdot CR \cdot ED \cdot EF}{BW \cdot AT \cdot 365} \quad (4)$$

де: *LADD* – середня добова доза, мг/(кг×добу);

*C* – концентрація речовини в забрудненому середовищі, мг/кг;

*CR* – швидкість кількісного надходження діючого середовища, кг/день;

*ED* – тривалість дії, років;

*EF* – частота дії, днів/рік;

*BW* – маса тіла людини, кг;

*AT* – період усереднювання експозиції (для канцерогенів *AT* = 70 років);

365 – число днів в році.

Канцерогенний ризик від важких металів як додаткову вірогідність розвитку раку у індивідуума впродовж життя *CR* визначаємо за формулою (5):

$$CR = LADD \cdot SF, \quad (5)$$

де *SF* – чинник нахилу, (мг/(кг×добу))<sup>-1</sup>.



Відповідно до [12] такий рівень канцерогенного ризику входить у високий (De Manifestis) – не прийнятний для виробничих умов і населення. Тому необхідне здійснення заходів з усунення або зниження ризику. Ці рівні підлягають постійному контролю і вимагають додаткових негайних заходів щодо їх зниження. Значення ризику розвитку неканцерогенних ефектів для окремих речовин визначають на основі обчислень коефіцієнта небезпеки за формулою (6):

$$HQ = AD/RfD, \quad (6)$$

де:  $HQ$  – коефіцієнт небезпеки;  $AD$  – середня доза, мг/кг;  $RfD$  – референтна (безпечна) доза, мг/кг.

Індекс небезпеки за умов одночасної дії декількох речовин розраховують за формулою (7):

$$HI = \sum_i^n HQ_i, \quad (7)$$

де:  $HQ_i$  – коефіцієнти небезпеки для окремих компонентів суміші речовин.

### Результати дослідження та обговорення

При постановці завдання для прогнозування екологічного ризику від джерела, яке має в своєму складі токсичні речовини, головним об'єктом турботи та відповідальності є людина. Тому всі види ризиків, серед яких екологічний, соціальний та індивідуальний, повинні бути орієнтовані на збереження життя та здоров'я людини. Тому найбільш правильним повинен бути принцип застосування інтегрованого показника ризику, оскільки всі сфери діяльності людини нерозривно пов'язані між собою та мають відповідний взаємовплив.

Для кількісного аналізу та вимірювань використовують, як правило, базові індикатори-ризиків для життя та життєдіяльності людини – якість та довголіття.

Кількісною оцінкою сфери дії та серйозності несприятливих впливів, які можуть статися в результаті фактичного чи передбаченого впливу речовини, повинні стати надходження забруднювальних речовин в організм людини.

Для визначення кількісного надходження забруднювальних речовин в організм людини, який може знаходитись в зоні негативного впливу шламів гальванічного виробництва, необхідно оцінити ці небезпеки, що можна виконати за такими етапами:

- характеристика навколишньої обстановки з аналізом основних фізичних параметрів досліджуваної області;
- визначення шляхів впливу джерел забруднення та їх розповсюдження;
- визначення та оцінювання рівня, частоти та часу дії кожного забруднювача, ідентифікованого на другому етапі.

За результатами дослідження складу гальванічних шламів встановлено якісний склад та вміст небезпечних речовин. Подано два приклади шламів різних українських підприємств, які зберігаються на заводських територіях (табл. 2 і 3).

1. *Найменування відходів:* шлами гальванічні з осаджувачем, лугою, содою (шлам ванн травлення). Зовнішній вигляд та консистенція: пастоподібна маса коричневого кольору. Подамо загальні відомості про відходи виробництва,

зокрема, цеху травлення трубних виробів. Травлення здійснюється розчинами сірчаної кислоти. Шлам містить переважно сполуки заліза у вигляді часток сульфату заліза та сторонніх нерозчинних домішок. Він нейтралізується до значень рН = 3-10 розчинами соди кальцинованої або їдкого натру. Якісний склад відходів та вміст в них небезпечних речовин: заліза сульфат – 35-40 мас. %; сульфат-йон – до 10 мас. %. Активна реакція розчину з відходів рН становить 5,33.

Таблиця 2 – Концентрація та клас токсичності речовини

Форма присутності	Концентрація, мг/кг (X), клас токсичності речовини						
	Pb(1)	Cd(I)	Zn(1)	Mn	Cu(2)	Cr(2)	Ni(2)
Валова	< 0,5	< 0,25	6,94	39,64	3,71	< 0,1	27,87
Рухлива за $t = 25^{\circ}\text{C}$	< 0,5	< 0,25	2,39	39,62	0,74	< 0,1	9,00
Водорозчинна за $t = 25^{\circ}\text{C}$	< 0,5	< 0,25	0,29	9,38	<0,35	< 0,1	2,90
Розчинність у експерименті, (г/100г)	–	–	4,1	23,2	Не розчинна	–	Не розчинна
Середня кількість у відходах, (кг/т)	–	–	0,007	0,04	0,004	–	0,03
ГДК у ґрунті, (мг/кг) – валова форма	32,0	1,5	–	1500,0	–	80,0	–
ГДК у ґрунті, (мг/кг) – рухлива форма	–	–	23,0	–	3,0	6,0	4,0

Визначення класу безпеки: виходячи з якісного складу відходів та їх активної реакції, яка вказує на нормалізацію первинної кислої активної реакції розчину. Розрахунок виконано за основною речовиною – сполуками заліза.

Підставивши значення у формулу (1), отримаємо:

$$K_{Fe} = \lg(5000)/(0,0+0,0+0,4) = 9,25. \quad (8)$$

Виходячи з індексу токсичності відходів, розрахованого через еквівалент  $LD_{50}$  для лабораторних тварин основного компоненту – заліза сульфату ( $3,4 < K_C < 10,0$ ), шлам ванн травлення належить до помірно небезпечних відходів (III клас токсичності).

2. *Найменування відходів:* шлами гальванічні з осаджувачем: лугою, содою.

Зовнішній вигляд та консистенція: сухі пористі грудки жовто-зеленого кольору, без запаху. Загальні відомості про відходи: відходи утворюються при багаторазовій обробці заготовок труб у ваннах з лужним розчином. Після застигання мають тверду консистенцію. Якісний склад відходів та вміст в них небезпечних речовин: натрію гідроксид – 38-65 мас. %; натрій азотнокислий – 24-35 мас. %; натрій хлористий – 5-6 мас. %; нерозчинні домішки (окалина, скломаса) – до 100%; активна реакція водної витяжки з відходів рН становить 11,68.

Таблиця 3 – Концентрація та клас токсичності речовини

Форма присутності	Концентрація, мг/кг (X), клас токсичності речовини						
	Pb(1)	Cd(I)	Zn(1)	Mn	Cu(2)	Cr(2)	Ni(2)
Валова	26,88	1,87	3,68	626,73	86,25	12497	8,79
Рухлива за $t = 25^{\circ}\text{C}$	< 0,5	< 0,25	1,64	< 0,5	73,24	200,4	< 1,0
Водорозчинна за $t = 25^{\circ}\text{C}$	< 0,5	< 0,25	2,08	< 0,5	0,53	201,8	< 1,0
Розчинність у експерименті, (г/100г)	не розч.	не розч.	56,5	не розч.	не розч.	16,0	не розч.
Середня кількість у відходах, (кг/т)	0,027	0,002	0,004	0,63	0,086	1,25	0,01
ГДК у ґрунті, (мг/кг) – валова форма	–	–	–	1500,0	–	80,0	–
ГДК у ґрунті, (мг/кг) – рухлива форма	–	–	23,0	–	3,0	6,0	4,0

Визначення класу небезпеки відходів: виходячи з фактичного вмісту у відходах, водорозчинності, активної реакції, найменший індекс токсичності мають сполуки натрію, зокрема гідроксид. Розрахунок виконано з урахуванням  $LD_{50}$  цієї речовини для теплокровних тварин за формулою (1), де:  $K_c$  – розрахунковий індекс токсичності відходів по  $LD_{50}$  для білих щурів. Підставляючи значення, отримаємо:

$$K_c = \lg(150)/(1,0+0,0+0,56) = 1,39. \quad (9)$$

Враховуючи індекс токсичності відходів, розрахований через  $LD_{50}$  для лабораторних тварин одного з найнебезпечніших компонентів – гідроксиду натрію ( $1,3 < K_c < 3,3$ ), шлами гальванічні з осаджувачем (лугою, содою) належать до високонебезпечних відходів (II клас токсичності). Приймаючи до уваги різко лужну реакцію водної витяжки з відходів, їх утилізацію слід проводити з дотриманням правил техніки безпеки під час роботи з агресивними речовинами. Клас небезпеки відходів можна зменшити після їх нейтралізації.

За результатами дослідження складу гальванічного шламу встановлено масовий вміст пріоритетних забруднювальних речовин на рівнях: хром – 1,25 кг/т, нікель – 0,01 кг/т.

Використавши необхідні для розрахунку початкові дані, деякі з яких вказано в додатках [11], отримаємо таке значення середньодобової дози нікелю:

$$LADD = \frac{C \cdot CR \cdot ED \cdot EF}{BW \cdot AT \cdot 365} = \frac{10 \cdot 0,2 \cdot 5 \cdot 365}{70 \cdot 70 \cdot 365} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ мг}/(\text{кг} \cdot \text{добу}). \quad (10)$$

Канцерогенний ризик від нікелю як додаткову вірогідність розвитку раку у індивідуума впродовж життя  $CR$  визначаємо за формулою (6):

$$CR=LADD \cdot SF=2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,84=1,68 \cdot 10^{-3}. \quad (11)$$

Визначимо індекс небезпеки за формулою (8) для пріоритетних забруднювальних речовин відходів гальванічного цеху, зокрема, для кадмію, нікелю, свинцю, хрому:

$$HI = \sum_1^4 HQ_i = \frac{0,002}{0,0005} + \frac{0,01}{0,02} + \frac{0,027}{0,0035} + \frac{0,005}{0,005} = 82,5. \quad (12)$$

## Висновки

Оскільки індекс небезпеки  $HI > 1$ , то такий рівень ризику є неприйнятним, а забруднювальні речовини, які містяться у гальванічному шламі і надійшли в об'єкти довкілля внаслідок аварійної ситуації, негативно вплинуть на здоров'я людини. Отже, аварійні ситуації, що супроводжуються порушенням цілісності місць зберігання (ємностей, мішків і т.п.) і призводять до потрапляння гальванічного шламу в довкілля, підвищують ризик для здоров'я людини. Отримані рівні канцерогенного ризику і індексу небезпеки вказують на необхідність прийняття комплексу рішень щодо відвертання виникнення надзвичайних ситуацій, а також мінімізації їх наслідків.

## Перспективи подальших досліджень

Подальші дослідження повинні бути направлені на пошук альтернатив зберіганню шламів на територіях підприємств, на перероблення відходів з видаленням цінних компонентів та повторним використанням розчинів у технологічних процесах.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bharti, N., Katyal, D.: Water quality indices used for surface water vulnerability assessment. *Inter. J Environ. Sciences*, 2011, 2 (1), 154-173, USA.
2. Pohrebennyk V., Koszelnik P., Mitryasova O., Dzhumelia E., Zdeb M. Environmental monitoring of soils of post-industrial mining areas, *Journal of Ecological Engineering*, 2019, Vol. 20, iss. 9, pp. 53–61.
3. Pohrebennyk V., Mitryasova O., Dzhumelia E., Kochanek A. Evaluation of surface water quality in mining and chemical industry, 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, Albena, Bulgaria, 2017, vol. 17, issue 51, pp. 425–433.
4. Ishchenko V., Pohrebennyk V., Borowik B., Falat P., Shaikhanova A. Toxic substances in hazardous household waste, (2018) International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 18 (4.2), pp. 223–230.
5. Petryk A., Czop M., Pohrebennyk V. The assessment of the degree of pollution of fallow vegetation with heavy metals in rural administrative units of Psary and Płoki in Poland. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 18 (5.2), 2018, pp. 921–928.

6. Mitryasova, O., Pohrebennyk, V., Kardasz, P.: Hydrochemical Aspects of Surface Water Quality Assessment, Conference proceedings 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2018, (Albena, Bulgaria. 30 June – 9 July 2018, 5.2., 18, Ecology and Environmental Protection. Ecology, Economics, Education and Legislation, 2018, pp. 513–520.
7. Mitryasova, O., Pohrebennyk, V., Selivanova, A.: Environmental Risk of Surface Water Resources Degradation. *Water Supply and Wastewater Removal*, Politechnika Lubelska, 2018, pp. 152–162.
8. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні. <http://old.menr.gov.ua/index.php/dopovidi>.
9. Нестер А.А. Очистка стічних вод виробництва друкованих плат: монографія / Хмельницький національний університет, 2016, 219 с.
10. ДСанПіН 2.2.7.029-99. Гігієнічні вимоги щодо поводження з промисловими відходами та визначення класу небезпеки для здоров'я населення. 01.07.1999 N 29.
11. Руководство Р2.1.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду // М. Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004, 4 с.
12. Караєва Н. В., Варава І. А. Методи і засоби оцінки ризику здоров'ю населення від забруднення атмосферного повітря // КІП ім. Ігоря Сікорського, 2018, 56 с.

Стаття надійшла до редакції 27.11.2019 і прийнята до друку після рецензування 23.01.2020

## REFERENCES

1. Bharti, N., & Katyal, D. (2011). Water quality indices used for surface water vulnerability assessment. *Inter. J Environ. Sciences*, 2(1), 154-173.
2. Pohrebennyk, V., Koszelnik, P., Mitryasova, O., Dzhumelia, E., & Zdeb, M. (2019). Environmental monitoring of soils of post-industrial mining areas. *Journal of Ecological Engineering*, 20(9), 53-61.
3. Pohrebennyk, V., Mitryasova, O., Dzhumelia, E., & Kochanek, A. (2017). Evaluation of surface water quality in mining and chemical industry. In *Proceedings of the 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, Albena, Bulgaria, 2017. (vol. 17, issue 51, pp. 425-433).
4. Ishchenko, V., Pohrebennyk, V., Borowik, B., Falat, P., & Shaikhanova, A. (2018). Toxic substances in hazardous household waste. In *Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. (18 (4.2), pp. 223-230).
5. Petryk, A., Czop, M., & Pohrebennyk, V. (2018). The assessment of the degree of pollution of fallow vegetation with heavy metals in rural administrative units of Psary and Płoki in Poland. In *Proceedings of the International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. (18 (5.2), pp. 921-928).
6. Mitryasova, O., Pohrebennyk, V., & Kardasz, P. (2018). Hydrochemical Aspects of Surface Water Quality Assessment. In *Ecology and Environmental Protection. Ecology, Economics, Education and Legislation: 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM. Proceedings of the Conference*, Albena, Bulgaria, 30 June – 9 July 2018. (5.2., 18, pp. 513–520).
7. Mitryasova, O., Pohrebennyk, V., & Selivanova, A. (2018). Environmental Risk of Surface Water Resources Degradation. *Water Supply and Wastewater Removal*, pp. 152-162.
8. National report on the state of the environment in Ukraine. <http://old.menr.gov.ua/index.php/dopovidi>. (in Ukrainian)
9. Nester, A.A. (2016). *Cleaning of water of virobnittva druckovanich boards: monograph*. Khmelnytsky: Khmelnytsky National University. (in Ukrainian)

10. DSanPin 2.2.7.029-99. Hygienic requirements for the management of industrial waste and the definition of a hazard class for public health. 01.07.1999 N 29. (in Ukrainian)
11. Rukovodstvo P2.1.10.1920-04. Rukovodstvo po otsenke riska dlya zdorovya naseleniya pri vozdeystvii khimicheskikh veschestv, zagryaznyayuschikh okruzhayushchuyu sredu. M.: Federalnyy tsentr gossanepidnadzora Minzdrava Rossii, 2004, 144 p. (in Russian)
12. Karaeva, N.V., & Varava, I.A. (2018). *Metody i zasoby otsinky ryzyku zdorovyu naseleennyia vid zabrudnennya atmosfernogo povitrya*. Kyiv: KPI im. Igorya Sikorskogo. (in Ukrainian)

*The article was received 27.11.2019 and was accepted after revision 23.01.2020*

**Погребенник Володимир Дмитрович**

професор, доктор технічних наук, професор кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності Національного університету «Львівська політехніка»  
**Адреса робоча:** 79013, Україна, м. Львів, вул. С. Бандери, 12  
**e-mail:** vpohreb@gmail.com  
ORCID ID 0000-0002-1491-2356

**Нестер Анатолій Антонович**

доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва та цивільної безпеки Хмельницького національного університету  
**Адреса робоча:** 29016, Україна, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11  
**e-mail:** nesteranatol111@gmail.com

## ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ ТА СИСТЕМИ INFORMATION RESOURCES AND SYSTEMS

**Anatolii V. Kuzmin**<sup>1</sup>, PhD (Physics and Mathematics), Associate professor, Faculty of Computer Science and Cybernetics  
ORCID 0000-0001-5439-6387 *e-mail*: kuzmin\_a\_b@ukr.net

**Leonid D. Grekov**<sup>2</sup>, Doctor of technical sciences, Director of SSPC “Pryroda”  
ORCID 0000-0002-1604-7730

**Nataliia M. Kuzmina**<sup>3</sup>, PhD (Physics and Mathematics), Associate professor, Faculty of Informatics  
ORCID 0000-0003-0136-1441 *e-mail*: n.m.kuzmina@npu.edu.ua

**Oleksii A. Petrov**<sup>4</sup>, PhD in Geography and GIS  
ORCID 0000-0001-9828-2007

**Olena M. Medvedenko**<sup>4</sup>, Director SPE “Agroresurssystemy” LLC  
ORCID 0000-0002-9178-9638

<sup>1</sup>Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>SSPC “Pryroda”, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup>National Pedagogical Dragomanov University, Kyiv, Ukraine

<sup>4</sup>SPE “Agroresurssystemy”, Kyiv, Ukraine

### COMPUTATIONAL PROCEDURES FOR THEMATIC PROCESSING OF SPACE IMAGERY FOR AGRICULTURAL RESOURCES MONITORING (PART 2)

**Abstract.** *The universal fast algorithm of cluster analysis is considered. The proposed algorithm is a grid type, it uses the point density parameter in the grid cell and the ratio between neighborhoods to unite of neighboring dense cells into clusters.*

*The algorithm sequentially calculates for each point the number of the cell to which it belongs, then generates groups of points for each non-empty cell. Then it sequentially unites cells into clusters, starting the process of fusion of the densest cells.*

*The next cell is included in some cluster if at least one cell neighbor already belongs to the cluster. If the neighbors of the cell do not belong to any formed cluster, then the cell forms a new cluster. If the neighbors of the cell belong to several existing clusters, the respective clusters are merged into a new cluster.*

*Combining cells into clusters uniquely determines the distribution of multiple points between the clusters. The user must specify a grid step parameter and a minimum grid cell density for which the cluster joining process is not performed. Low-density cells are considered noise.*

*The algorithm does not require a preliminary task of the number of clusters and information about the nature of the distribution of points in the input set.*

*The proposed algorithm can be used to process large arrays of point data of large spatial resolution. The most promising area of application of the algorithm is the analysis of multispectral satellite images of medium and high resolution in the fields of the analysis of the state of agricultural resources, forest resources and various natural landscapes. The result of clustering the space image data can also be used to create a classifier's training set.*

**Keywords:** *clustering algorithm; satellite space images; grid; cell; point density; neighborhood ratio; agrarian resources; natural landscapes; forest resources*

А.В. Кузьмін<sup>1</sup>, Л.Д. Греков<sup>2</sup>, Н.М. Кузьміна<sup>3</sup>, О.А. Петров<sup>4</sup>, О.М. Медведенко<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна

<sup>2</sup>ДНВЦ «Природа», м. Київ, Україна

<sup>3</sup>Національний педагогічний університет імені М.П. Драгоманова, м. Київ, Україна

<sup>4</sup>ТОВ «НВП «Агроресурсисистеми», м. Київ, Україна

## ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ ПРОЦЕДУРИ ТЕМАТИЧНОЇ ОБРОБКИ КОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ В ІНТЕРЕСАХ МОНІТОРИНГУ АГРАРНИХ РЕСУРСІВ (ЧАСТИНА 2)

**Анотація.** Розглядається універсальний швидкий алгоритм кластерного аналізу. Запропонований алгоритм відноситься до сіткового типу, використовує параметр щільності точок в комірці сітки і відношення сусідства для об'єднання сусідніх щільних комірок в кластери. Алгоритм послідовно обчислює для кожної точки номер комірки, якій вона належить, потім формує групи точок для кожної непорожньої комірки. Далі послідовно об'єднує комірки в кластери, починаючи процес об'єднання з найбільш щільних комірок. Чергова комірка включається в деякий кластер, якщо хоча б один сусід комірки вже належить кластеру. Якщо сусіди комірки не належать жодному утвореному кластеру, то комірка утворює новий кластер. У випадку коли сусіди комірки належать зразу декільком існуючим кластерам, відповідні кластери об'єднуються у новий кластер.

Об'єднання комірок в кластери однозначно визначає розподіл по кластерах множини точок. Для роботи алгоритму користувачу треба задавати параметр кроку сітки та мінімальну щільність комірок сітки, для яких процес приєднання до кластерів не здійснюється. Комірки з малою щільністю вважаються шумом.

Алгоритм не вимагає попереднього завдання кількості кластерів і інформації про характер розподілу точок вхідної множини.

Запропонований алгоритм може використовуватися для обробки великих масивів точкових даних великої просторової розмірності. Найбільш перспективним напрямком застосування алгоритму є аналіз мультиспектральних супутникових знімків середньої та високої розподільчої здатності в інтересах аналізу стану агроресурсів, лісових ресурсів та різноманітних природних ландшафтів. Результат кластеризації даних космічного знімку може також використовуватись для створення навчальної множини класифікатора.

**Ключові слова:** *алгоритм кластеризації; супутникові космічні знімки; сітка; комірка; щільність точок; відношення сусідства; аграрні ресурси; природні ландшафти; лісові ресурси*



## Вступ

Процедури кластеризації відносяться до найбільш важливих завдань інтелектуального аналізу (Data Mining), які припускають розбиття деякої множини точкових елементів на умовно непересічні підмножини – кластери – на основі властивості однорідності і схожості їх характеристик.

Слід зазначити, що в практичних задачах кластеризації кластери часто погано розділяються, мають складну форму, а області їх значень перетинаються, що робить застосування багатьох відомих алгоритмів неефективним.

Особливо важливою сферою застосування методів кластеризації є сегментація мультиспектральних супутникових зображень [1, 2], зокрема для аналізу стану аграрних ресурсів. Серед прикладних задач аналізу аграрних ресурсів, які використовують методи кластерного аналізу, можна виділити:

- Контроль за використанням сільгоспземель. Поділ на кластери: поля, що обробляються, і ті, що не використовуються для вирощування сільськогосподарських культур;

- Контроль за перебігом посівної та жнив. Поділ на кластери: поля, де процес посіву або збирання вже відбувся або ще не почався;

- Поділ полів на кластери озимих та ярих культур;

- Поділ полів озимих культур на зернові та технічні.

У таких прикладних задачах дані характеризуються:

- великим обсягом –  $10^5 - 10^7$  об'єктів;

- високою просторовою розмірністю даних і різномірністю їх характеристик;

- відсутністю апріорної інформації про кількість кластерів і ймовірнісні їх характеристики;

- наявністю шуму і викидів у вхідних даних.

Все це призводить до актуальності розробки ефективних методів кластерного аналізу для вирішення прикладних завдань такого типу.

Прийнятний алгоритм кластерного аналізу для задач сегментації супутникових зображень повинен відповідати таким вимогам [3]:

- низька обчислювальна складність;

- можливість виділяти кластери різної структури;

- виділення заздалегідь невідомого числа кластерів;

- можливість обробляти дані при наявності шуму;

- простота настроювання параметрів алгоритму.

У даній роботі розглядається алгоритм кластеризації сіткового типу, який використовує характеристики щільності комірок сітки і принцип сусідства комірок з високою щільністю. Алгоритм не вимагає початкового задавання вихідного числа кластерів і використовує в своїй роботі два пов'язаних між собою параметри, які вибирає користувач:

- $h$  – максимально допустимий крок сітки, який визначає масштаб кластерів, що підлягають виділенню;

- $M_0$  – щільність комірок, що відсікаються.

Метод, описаний нижче, можна умовно назвати методом об'єднання сусідніх комірок, або *Method of Uniting Neighboring Cells – MUNC (eng.)*

Нехай в  $n$ -вимірному евклідовому просторі задана скінченна множина векторів  $\Omega = \{\overline{X}^{(i)} = x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}, i = \overline{1, N}, \overline{X}_{\max} = \{\max_{i=1, N} x_{i,j}, j = \overline{1, n}\},$

$$\overline{X}_{\min} = \{\min_{i=1, N} x_{i,j}, j = \overline{1, n}\}.$$

Множина точок  $\Omega$  належить  $n$ -вимірному паралелепіпеду  $\Pi = [x_{\min,1}, x_{\max,1}] \times \dots \times [x_{\min,n}, x_{\max,n}]$ .

### Побудова сітки

Задаємо параметр дискретизації сітки  $h$  і обчислимо кількість розбиттів паралелепіпеда  $\Pi$  в напрямку кожної координати:

$$m_j = \left\lceil \frac{x_{\max,j} - x_{\min,j}}{h} \right\rceil + 1, j = \overline{1, n}, \text{ де } \lceil \cdot \rceil - \text{ціла частина числа. Таким}$$

чином, загальна кількість комірок, які покривають паралелепіпед  $\Pi$ , дорівнює  $M = \prod_{j=1}^n m_j$ .

Уточнимо крок сітки по кожній координаті  $h_j = (x_{\max,j} - x_{\min,j}) / m_j, j = \overline{1, n}$ .

Кожна комірка сітки характеризується своїм цілочисельним векторним індексом розмірності  $n$ ,  $R = \{(r_1, r_2, \dots, r_n), 1 \leq r_i \leq m_i, i = \overline{1, n}\}$ . Множина векторних індексів комірок сітки  $R$  взаємно-однозначно відображується на множину натуральних чисел:  $R \Leftrightarrow Z = \{1, 2, \dots, M\}$ .

### Розподіл точок множини $\Omega$ по комірках

Послідовно для кожної точки множини  $\Omega$  обчислюємо багатовимірний індекс комірки, якій вона належить:

$$R^{(i)} = \left\{ r_j^i = \left\lceil \frac{x_{i,j} - x_{\min,j}}{h_j} \right\rceil + 1, j = \overline{1, n} \right\} \forall i = \overline{1, N}, \text{ а також } \ddot{i}$$

одновимірний образ  $Z^{(i)}$ .

В результаті такого обчислення формується двовимірний список  $\Omega_Z = \langle \langle Z^{(i)}, i \rangle, i = \overline{1, N} \rangle$ , який встановлює приналежність кожної точки

множини  $\Omega$  одній з комірок сітки. Очевидно, що значна кількість комірок сітки при цьому залишаються порожніми, а кількість непорожніх комірок визначається множиною:  $Z_F = \{Z^{(i_1)}, Z^{(i_2)}, \dots, Z^{(i_m)}\}$ , де кожний елемент

враховується лише один раз,  $|Z_F|$  – кількість елементів цієї множини. Зазвичай  $|Z_F| \ll M$ .

Далі список  $\Omega_Z$  сортуємо по ключу першого елемента і формуємо групуючий список наступної структури:

$\Omega_{ZG} = \langle Z^{(i)}, \Omega^{(i)}, N^{(i)}, \mu^{(i)}, i = \overline{1, |Z_F|} \rangle$ , де  $\Omega^{(i)}$  – множина номерів точок, які належать комірці з індексом  $Z^{(i)}$ ,  $N^{(i)}$  – множина сусідів комірки  $Z^{(i)}$ ,  $\mu^{(i)}$  – щільність комірки (кількість точок, що належать комірці).

Список  $\Omega_{ZG}$  сортуємо за зменшенням ключа  $\mu^{(i)}$ :

$\Omega_{ZG} = \langle Z^{(s_i)}, \Omega^{(s_i)}, N^{(s_i)}, \mu^{(s_i)}, i = \overline{1, |Z_F|} \rangle$ , де  $\mu^{(s_i)} \geq \mu^{(s_{i+1})}$ .

### Об'єднання комірок в кластери

Об'єднання комірок в кластери однозначно визначає кластеризацію множини точок  $\Omega$ . Тому достатньо об'єднати в кластери одновимірні індекси комірок  $Z^{(s_i)}, i = \overline{1, |Z_F|}$  використовуючи відношення сусідства  $N^{(s_i)}$  та значення щільності  $\mu^{(s_i)}$ .

Індекс найбільш щільної комірки  $Z^{(s_1)}$  заноситься до першого кластеру  $K_1 = \{Z^{(s_1)}\}$ .

Обираємо наступну комірку з індексом  $Z^{(s_2)}$ , перевіряємо виконання умови  $K_1 \cap N^{(s_2)} = \emptyset$ . При виконанні цієї умови, комірка  $Z^{(s_2)}$  породжує новий кластер  $K_2 = \{Z^{(s_2)}\}$ , у протилежному випадку  $K_1 = K_1 \cup \{Z^{(s_2)}\}$ , тобто елемент  $Z^{(s_2)}$  додається до кластера  $K_1$ .

Припустимо, що здійснено  $m$  кроків, в результаті яких комірки з індексами  $Z^{(s_1)}, Z^{(s_2)}, \dots, Z^{(s_m)}$  віднесені до одного з кластерів  $K_1, K_2, \dots, K_r$ .

Визначено порядок приналежності комірки з індексом  $Z^{(s_{m+1})}$  деякому кластеру.

Обчислимо  $K_i \cap N^{(s_{m+1})}, i = \overline{1, r}$  та перевіримо умову  $\bigcup_{i=1}^r (K_i \cap N^{(s_{m+1})}) = \emptyset$ .

При виконанні цієї умови комірка з індексом  $Z^{(s_{m+1})}$  утворює новий кластер  $K_{r+1} = \{Z^{(s_{m+1})}\}$ .

При порушенні цієї умови існує  $i_1 \leq i_2 \leq \dots \leq i_l$  – номери вже утворених кластерів, для яких  $K_{i_j} \cap N^{(s_{m+1})} \neq \emptyset, j = \overline{1, l}$ . В цьому випадку ці кластери

об'єднуються в один кластер  $K_{i_1}$  і долучають комірку з номером  $Z^{(s_{m+1})}$ , тобто  $K_{i_1} = K_{i_1} \cup K_{i_2} \cup \dots \cup K_{i_r} \cup \{Z^{(s_{m+1})}\}$ . Кластери  $K_{i_2}, K_{i_3} \dots K_{i_r}$ , що увійшли в  $K_{i_1}$ , видаляються, а нумерація усіх інших  $r - r_1 + 1$  кластерів зсувається.

Процес об'єднання комірок в кластери закінчується на кроці  $m_0$ , коли виконується умова  $\mu^{(m_0)} \leq M_0$ . Тобто коли щільність комірок, що залишились, має щільність меншу за деяке порогове значення.

Множину комірок з малою щільністю точок, які не віднесені до жодного кластера, можна залишити некластеризованими, сприймаючи їх як викиди або шум.

Другий варіант завершення процедури кластеризації можна здійснити методом класифікації (навчання з вчителем), де в якості множини навчання використовуються вже сформовані кластери, наприклад методом мінімальної відстані або методом найближчих сусідів.

### Тестова перевірка працездатності алгоритму

Тестування алгоритму проводилось на штучно згенерованих точкових множинах у двовимірному просторі.

Множина 1 містить 300 000 точок, які представляють 7 нелінійно розділених кластерів різної форми, різного розміру та щільності. Змодельована кластерна структура була штучно зашумлена множиною з 2000 точок, які покривали увесь простір, що займали кластери (рис. 1).

Процедура кластеризації проводилась для різних значень параметрів налаштування  $h$  і  $M_0$ . Очікувані і найкращі результати отримані для значень  $h \leq 0.7$  і  $3 \leq M_0 \leq 10$  (рис. 2). В результаті виконання процедури 299 545 точок були віднесені до кластерів.

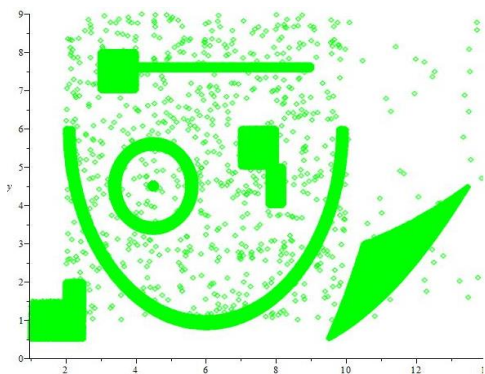


Рис. 1

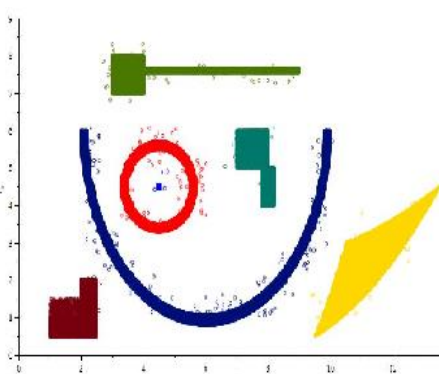


Рис. 2

Множина 2 містить 100 000 точок, об'єднаних у 3 штучно змодельованих кластери еліптичної форми, які мають зони перекриття. Кожний кластер

представляє собою множину точок на площині двовимірного розподілу Гауса з різними векторами середніх, дисперсій і нульовою коваріацією (рис. 3).

Враховуючи, що змодельовані кластери мали зони перекриття, особливо значну між другим и третім (синім та зеленим), алгоритм дозволив чітко виділити ядра кожного кластера, які є найбільш щільними частинами кластерів. Найкращі результати отримані для значень параметрів  $h \approx 0.6$  и  $M_0 \approx 25$ . При цьому до кластерів було віднесено 85% усіх точок множини (рис. 4).

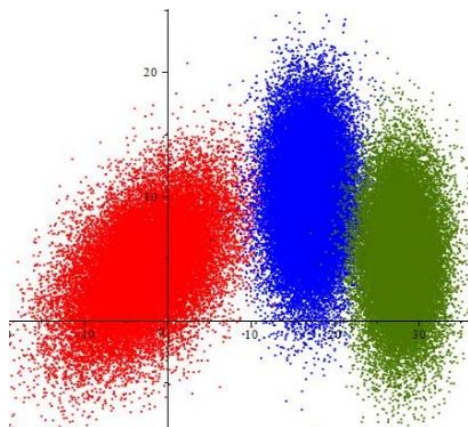


Рис. 3

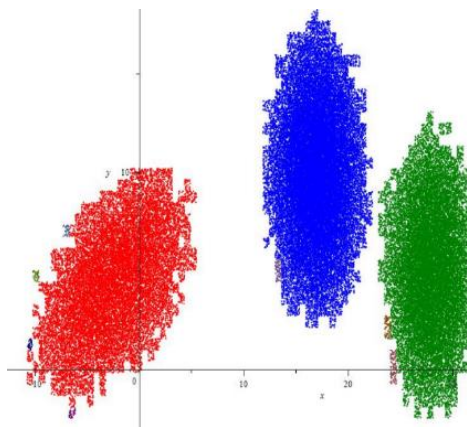


Рис. 4

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. А.В. Кузьмін, Л.Д. Греков, О.А. Петров, О.М. Медведенко (2017) Обчислювальні процедури тематичної обробки космічних знімків в інтересах моніторингу аграрних ресурсів (частина 1). Екологічна безпека та природокористування № 1-2(23), 70-78. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2017.1>
2. Sarmah S., Bhattacharyya D.K. (2012) A grid-density based technique for finding clusters in satellite image. *Pattern Recognition Letters*, V. 33, 589-604.
3. И.А. Пестунов, Ю.Н. Синявский (2012) Алгоритм кластеризации в задачах сегментации спутниковых изображений. Вестник Кемеровского государственного университета №4 (52), т. 2, 110-125.

*Стаття надійшла до редакції 17.10.2019 і прийнята до друку після рецензування 23.12.2019*

## REFERENCES

1. Kuzmin, A.V., Hrekov, L.D., Petrov, O.A., & Medvedenko, O.M. (2017). Obchysliuvalni protsedury tematychnoi obrobky kosmichnykh znimkiv v interesakh monitorynhu ahrarnykh resursiv (chastyina 1). *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia*, 1-2(23), 70-78. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2017.1>
2. Sarmah, S., & Bhattacharyya, D.K. (2012). A grid-density based technique for finding clusters in satellite image. *Pattern Recognition Letters*, 33, 589-604.
3. Pestunov, I.A., & Sinjavskij, Ju.N. (2012). Algoritm klasterizacii v zadachah segmentacii sputnikovyyh izobrazhenij. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta*, 4(52), t.2, 110-125.

*The article was received 17.10.2019 and was accepted after revision 23.12.2019*

**Кузьмін Анатолій Володимирович**

кандидат фізико-математичних наук, доцент факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка

**Адреса робоча:** Україна, 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 64/13

**e-mail:** kuzmin\_a\_b@ukr.net

ORCID 0000-0001-5439-6387

**Греков Леонід Дмитрович**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, директор ДНВЦ «Природа»

**Адреса робоча:** 03680, Україна, Київ, проспект Акад. Глушкова, буд. 40, корпус 4/1

ORCID 0000-0002-1604-7730

**Кузьміна Наталія Миколаївна**

кандидат фізико-математичних наук, доцент факультету інформатики Національного педагогічного університету імені М.П. Драгоманова

**Адреса робоча:** Україна, 01601, м. Київ, вул. Пирогова, 9

**e-mail:** n.m.kuzmina@npu.edu.ua

ORCID 0000-0003-0136-1441

**Петров Олексій Анатолійович**

кандидат географічних наук, ТОВ «НВП «Агроресурссистеми»

**Адреса робоча:** Україна, 01133, м. Київ, пров. Лабораторний, 1, оф. 450

ORCID 0000-0001-9828-2007

**Медведенко Олена Миколаївна**

директор ТОВ «НВП «Агроресурссистеми»

**Адреса робоча:** Україна, 01133, м. Київ, пров. Лабораторний, 1, оф. 450

ORCID 0000-0002-9178-9638

УДК 351.861

**Vadym Tiutiunyk**<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Senior Research  
ORCID ID 0000-0001-5394-6367

**Oleksandr Sobol**<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Senior Research  
ORCID ID 0000-0002-7133-6519

**Vladimir Kalugin**<sup>1</sup>, Doctor of Chemical Sciences, Professor  
ORCID ID 0000-0002-6899-1010

**Julia Zakharchenko**<sup>2</sup>  
ORCID ID 0000-0003-1978-2818

<sup>1</sup>National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup>Research Institution "Ukrainian Scientific Research Institute of Ecological Problems",  
Kharkiv, Ukraine

## **FORMATION OF THE DYNAMIC MODEL FOR OPERATIVE MONITORING OF THE ECOSYSTEM'S POLLUTION LEVEL THROUGH EMERGENCIES AT NUCLEAR POWER PLANTS**

**Abstract.** *In conditions of uneven distribution of sources of danger across the territory of the state, each territory has its own levels of natural, technogenic, social and military loads, which influence on the composition of forces, tactical and technical characteristics of the means of the functioning geoinformation security system, namely the national security system.*

*In Ukraine the civil defense system is functioning to ensure the implementation of state policy in the field of civil defense for protection of the population, territories, environment and property from emergencies by preventing such situations, eliminating their consequences and providing assistance to victims in peacetime and during a special period. The system consists of functional and territorial subsystems and is aimed to solving the issues of ensuring the necessary level of security of the state in the conditions of emergency. At the same time, the issues of implementation of the monitoring function and development of effective decisions by all local subsystems, which aimed at prevention and localization of different emergencies, remain completely open to the state.*

*In order to further develop the scientific and technical bases for the implementation of the subsystem of the civil defense system of Ukraine on operative monitoring of changes the boundaries of radiation pollution zone, the level of danger in the zone and the prediction of new hazards, a dynamic model of the combined use of unmanned aerial vehicles and ground control of radiation hazard factors, where the delivery of ground control devices to the danger zone is performed by unmanned aerial vehicles, is developed.*

**Keywords:** *monitoring of radiation pollution zone; dynamic model for operative monitoring; unmanned aerial vehicles; delivery of automated control devices to the danger zone*

В.В. Тютюник<sup>1</sup>, О.М. Соболев<sup>1</sup>, В.Д. Калугін<sup>1</sup>, Ю.В. Захарченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна

<sup>2</sup>Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

## ФОРМУВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ОПЕРАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ ЕКОСИСТЕМИ ВНАСЛІДОК АВАРІЙ НА ОБ'ЄКТАХ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

***Анотація.** В умовах нерівномірного розподілу джерел небезпек по території держави кожній точці простору притаманні свої рівні природного, техногенного, соціального та воєнного навантажень, які впливають на склад сил та тактико-технічні характеристики засобів функціонуючої геоінформаційної системи безпеки, а саме системи національної безпеки.*

*В Україні для забезпечення реалізації державної політики у сфері цивільного захисту щодо захисту населення, територій, навколишнього природного середовища та майна від надзвичайних ситуацій (НС) шляхом запобігання таким ситуаціям, ліквідації їх наслідків і надання допомоги постраждалим у мирний час та в особливий період функціонує Єдина державна система цивільного захисту (ЄДСЦЗ). Система ЄДСЦЗ складається з функціональних і територіальних підсистем та спрямована на розв'язання питань забезпечення необхідного рівня безпеки життєдіяльності території держави в умовах, коли виникла НС. При цьому, цілковито відкритими для держави залишаються проблемні питання реалізації в системі ЄДСЦЗ функції моніторингу та розробки ефективних управлінських рішень всіх локальних підсистем, спрямованих на попередження та локалізацію НС, в умовах зародження джерел небезпек різної природи.*

*З метою подальшого розвитку науково-технічних основ реалізації підсистеми ЄДСЦЗ України щодо оперативного моніторингу за змінами меж зони радіаційного забруднення, рівня небезпеки в зоні та прогнозування виникнення нових небезпек, в роботі сформована динамічна модель об'єднаного застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та наземних пристроїв контролю факторів радіаційної небезпеки, де доставка наземних пристроїв контролю у зону небезпеки виконується за допомогою БПЛА.*

***Ключові слова:** моніторинг зони радіаційного забруднення; динамічна модель оперативного моніторингу; безпілотні літальні апарати; доставка автоматизованих пристроїв контролю у зону небезпеки*

### Вступ

**Постановка завдання.** Актуальність та практична значущість наукових досліджень щодо розробки системи моніторингу радіоактивного забруднення екосистеми внаслідок аварій на об'єктах ядерної енергетики обумовлюється тим, що із 2 720 суб'єктів діяльності у сфері використання ядерної енергії в Україні, які отримали відповідні ліцензії на право роботи, 165 належать до високого ступеня ризику, 172 – до середнього, 2 383 – до низького. До I та II категорій радіаційної небезпеки належать енергетичні та дослідницькі ядерні установки, наслідком радіаційних аварій на яких можуть бути негативні ефекти у осіб з числа персоналу і населення, а також небезпечне забруднення екосистеми прилеглої локальної території.



На чотирьох атомних електростанціях України в експлуатації знаходяться 15 енергоблоків з водо-водяними енергетичними реакторами (ВВЕР), експлуатуючою організацією яких є ДП НАЕК «Енергоатом». На ВП «Запорізька АЕС» знаходиться в експлуатації сховище відпрацьованого ядерного палива «сухого типу». Це потребує планування, на основі результатів моніторингових досліджень, ефективних попереджувальних та невідкладних захисних дій за межами майданчиків таких установок відповідно до вимог документу серії норм безпеки МАГАТЕ GSR Part 7 «Готовність і реагування у випадку ядерної чи радіологічної аварійної ситуації», Відень, 2016 рік [1–11].

Одним із ключових засобів забезпечення безпеки функціонування об'єктів ядерної енергетики (ОЯЕ) є врахування досвіду експлуатації, що включає в себе проведення обліку та аналізу порушень у роботі об'єктів ядерної енергетики, впровадження корегувальних заходів для усунення виявлених причин і запобігання повторенню порушень, а також проведення моніторингу прилеглих до об'єктів ядерної енергетики зон радіоактивного забруднення екосистеми.

Слід відзначити, що при виникненні аварії на ОЯЕ необхідно: 1) здійснити оперативну побудову поля радіоактивного забруднення із заданою точністю, що можливо забезпечити за допомогою мобільних пристроїв контролю, прийняття обґрунтованих управлінських рішень стосовно необхідної кількості сил та засобів для ліквідації наслідків аварії; 2) виконати заходи евакуації населення із зони радіоактивного забруднення з урахуванням визначення шляхів евакуації з мінімальною їх довжиною в зоні забруднення; 3) виконати заходи, спрямовані на мінімізацію наслідків радіаційного забруднення екосистеми.

Для досягнення необхідної точності під час побудови поля радіоактивного забруднення необхідно застосовувати регулярну сітку з відомими значеннями рівня гамма-випромінювання у вузлах, що дозволить використати відомі методи інтерполяції. При цьому слід урахувати, що на теперішній час у 30-кілометровій зоні кожного ОЯЕ функціонують пости радіаційного моніторингу, які мають нерегулярне розміщення, тому унеможливується забезпечення необхідної точності при побудові поля забруднення.

Таким чином, розробка моделей та методів проведення аварійного моніторингу радіоактивного забруднення внаслідок аварії на ОЯЕ є актуальною науково-прикладною проблемою. Одним із шляхів вирішення даної проблеми є застосування БПЛА для здійснення оперативної побудови поля радіоактивного забруднення із заданою точністю.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботі [12] наведено спосіб реконструкції поля радіоактивного забруднення внаслідок аварії на атомних електростанціях (АЕС) за даними від стаціонарних постів моніторингу. Тобто була запропонована регулярна сіткова модель для інтерполяції і прогнозування поля за даними нерегулярного просторового моніторингу, що призводило до збільшення похибки побудови зазначеного поля. Питанням реконструкції полів радіоактивного забруднення територій після ядерних вибухів присвячена робота [13].

В роботі [14] підкреслено актуальність використання БПЛА для проведення радіаційного моніторингу. Концепцію проектування системи після аварійного моніторингу АЕС з використанням БПЛА наведено в роботі [15]. Можливості та результати експерименту по застосуванню безпілотних авіаційних

комплексів для моніторингу навколишнього середовища АЕС представлені в роботі [16, 17].

Крім того, у рамках проведеного, з глибиною пошуку до десяти років, аналізу винахідницько-дослідницької діяльності [18–21], відомі технічні рішення визначення границь зон небезпек, які для розташування засобів контролю факторів небезпеки використовують космічні засоби встановлення місцезнаходження та розділяються за використанням повітряних і наземних рухомих платформ.

При використанні повітряних рухомих платформ відомі корисні моделі: БПЛА малого розміру для моніторингу територій пожеж, терористичних актів і техногенних катастроф, а також – літака для повітряного моніторингу стану довкілля [18].

БПЛА малого розміру для моніторингу територій пожеж, терористичних актів і техногенних катастроф обладнаний засобами моніторингу, які включають навігаційне обладнання, радіопеленгатор, тепlopеленгатор і телекамеру, сполучені через бортовий комп'ютер з приймально-передавальною антеною GPS, «ГЛОНАС» або стільникового зв'язку для передачі результатів моніторингу на центральний пункт управління літальним апаратом.

Літак для повітряного моніторингу стану довкілля обладнаний, по меншій мірі, одним засобом для моніторингу довкілля, який встановлено під крилом літака.

Недоліками використання повітряних рухомих засобів моніторингу зони екологічного забруднення у рамках відомих технічних реалізацій, проаналізованих у роботі [18], є те, що під час виникнення масштабної небезпеки для охоплення необхідного обсягу точок вимірювання потребується використання декількох (в залежності від розмірів зони) літаків з організацією окремих каналів управління їх польотом і каналів передачі телеметричної інформації від засобів моніторингу. При реалізації режиму безперервного отримання у реальному масштабі часу інформації про стан зони враження цей спосіб моніторингу потребує збільшення у два-три рази кількості літаків і засобів контролю, якими вони обладнані, їх обслуговування, обладнання паливом і проведення ремонтних робіт. Крім того, виникає утруднення при управлінні БПЛА при їх знаходженні у зонах поганої видимості (які виникають під впливом дій небезпечних факторів), у нічний час, у разі погіршення погодних умов, а також при необхідності проведення контролю небезпечних факторів біля поверхні Землі.

При використанні наземних рухомих платформ відомі: спосіб визначення меж зон надзвичайних ситуацій (НС) [19] і спосіб оперативного визначення епіцентрів, зміни меж зон НС і одержання оперативної інформації щодо прогнозування виникнення нових ризиків [20].

Спосіб визначення меж зон НС [19] застосовує наземні рухомі засоби та геостационарні супутники. Точки вимірювання встановлюються за допомогою наземних рухомих і геостационарних супутників, точки вимірювання переміщуються за допомогою наземних рухомих засобів.

Спосіб оперативного визначення епіцентрів, зміни меж зон НС та одержання оперативної інформації щодо прогнозування виникнення нових ризиків [20] реалізований за рахунок застосування наземних рухомих пристроїв з контрольно-вимірювальними засобами та засобами

електрозов'язку, а також за рахунок застосування диспетчерського пункту та супутникових засобів з засобами електрозов'язку та електронно-обчислювальними засобами. Визначають зони НС та зміну факторів небезпеки за допомогою наземних рухомих пристроїв з контрольно-вимірювальними засобами, які надають інформацію про наслідки НС до диспетчерських пунктів за допомогою засобів електрозов'язку через супутники.

Недоліками використання наземних рухомих засобів моніторингу зони екологічного забруднення у рамках відомих підходів [19, 20] є те, що під час моніторингу неможливо охопити вимірюванням потрібний обсяг точок вимірювання у зоні небезпеки, оскільки не всі точки є доступними для вимірювання. Крім того, реалізація цих підходів не забезпечує оперативного одержання потрібних обсягу та точності інформації.

Найбільш близьким технічним рішенням до проблеми розробки науково-технічних основ системи моніторингу на локальній території, динаміки зміни меж зон екологічного забруднення, рівня небезпеки в зоні та прогнозування виникнення нових небезпек є спосіб оперативного визначення ризиків НС [21]. Цей спосіб передбачає за допомогою наземних рухомих засобів з контрольно-вимірювальними пристроями визначати зони НС та зміну факторів небезпеки. Роль наземних рухомих засобів можуть виконувати транспортні засоби, а також окремі (піші) патрульні. Для надання інформації до диспетчерських пунктів напряму та через супутникові засоби про наслідки НС застосовують засоби електрозов'язку. Для аналізу динаміки подій, що виникатимуть у процесі тривання НС, та підвищення оперативності збору інформації, повітряні рухомі засоби обладнують контрольно-вимірювальними й електронно-обчислювальними засобами з електронно-картографічними програмами, засобами радіонавігації й електрозов'язку.

Недоліками описаного вище способу оперативного визначення ризиків НС [21] є те, що можливості реалізації режиму безперервного у реальному масштабі часу оперативного одержання потрібного обсягу інформації про епіцентри та зміни меж зон небезпек обмежені можливостями використання (патрулювання) особового складу підрозділів. Крім того, термін моніторингу обмежується терміном знаходження літака у повітрі або літаків, коли ситуація потребує використання декількох літаків, які обладнані ідентичними контрольно-вимірювальними й електронно-обчислювальними засобами з електронно-картографічними програмами, засобами радіонавігації й електрозов'язку.

**Мета дослідження.** Завданням дослідження є розвиток науково-технічних основ реалізації підсистеми оперативного моніторингу за зміною меж зони радіаційного забруднення, рівня небезпеки в зоні та прогнозування виникнення нових небезпек, як складової ЄДСЦЗ. Метою цієї роботи є формулювання моделі об'єднаного застосування БПЛА та наземних пристроїв контролю факторів небезпеки, де доставка наземних пристроїв контролю у зону небезпеки виконується за допомогою БПЛА.

## **Система оперативного моніторингу радіоактивного забруднення екосистеми безпілотними літальними апаратами внаслідок аварій на об'єктах ядерної енергетики**

Мета роботи досягається тим, що безперервний та тривалий у реальному масштабі часу оперативний моніторинг за зоною радіаційного забруднення здійснюється за рахунок: а) сумісного об'єднання у систему моніторингу БПЛА та наземних пристроїв контролю факторів радіаційної небезпеки; б) оперативної доставки наземних мобільних пристроїв контролю у зону радіаційного забруднення БПЛА; в) створення в зоні та в її околиці тимчасової (на період ліквідації небезпеки) контролюючої мережі з автоматизованих наземних мобільних пристроїв контролю; г) отримання й обробки інформації від наземних мобільних пристроїв контролю диспетчерським пунктом, який розташовано на наземній рухомій платформі (штабний автомобіль, пожежно-рятувальний автомобіль, автомобіль радіаційної, хімічної та біологічної розвідки, бронетранспортер, машина військової розвідки, тягач та ін.) [18, 22–25].

Розроблену нами функціональну схему цієї системи оперативного моніторингу за зміною меж зони радіоактивного забруднення екосистеми, рівнем небезпеки в ній та прогнозування виникнення нових ризиків представлено на рис. 1. Вона включає класичну підсистему моніторингу, ситуаційний центр та підсистему виконання рішення [26, 27].

Наземний мобільний автоматизований пристрій оцінки параметрів радіаційного забруднення, схему якого представлено на рис. 2, а, включає: блок управління; контрольно-вимірювальний блок, з відповідним датчиком оцінки параметрів радіаційного забруднення; блок відеоспостереження; блок встановлення місця знаходження мобільного пристрою контролю (GPS-навігації); блок корегування місця положення мобільного пристрою на поверхні Землі; блок ручного корегування роботою мобільного пристрою; блок зберігання інформації; блок індикації; блок живлення; блок радіозв'язку; антену.

Наземний рухомий центр радіаційного моніторингу, схему якого представлено на рис. 2, б, включає: комп'ютеризовану аналітичну систему прогнозу границь зони радіаційного забруднення, рівня небезпеки в ній та можливості виникнення нових НС; контрольно-вимірювальний блок; блок метеорологічного контролю; блок встановлення місця знаходження наземного рухомого центру моніторингу (GPS-навігації); блок керування рухом БПЛА; блок отримання, аналізу та систематизації інформації від пристроїв оцінки параметрів радіаційного забруднення; блок збереження інформації; блок старту БПЛА; блок радіозв'язку; антену.

Представлений на рис. 3 електромеханічний пристрій для скидання з БПЛА у зону радіаційного забруднення автоматизованих пристроїв оцінки параметрів радіаційного забруднення містить [22, 23]: 1 – корпус пристрою для скидання з БПЛА автоматизованих пристроїв оцінки параметрів радіаційного забруднення; 2 – блок управління процесом скидання. Всередині корпусу 1 знаходяться: 1.1 – елементи кріплення електромеханічного пристрою до корпусу БПЛА; 1.2 – металеві пластини з зазором між ними (на них монтуються електромеханічні елементи пристрою); 1.3 – прокладка ущільнювача; 1.4 – металевий стержень для утримання автоматизованого

пристрою оцінки параметрів радіаційного забруднення; 1.5 – корпус котушки індуктивності для її кріплення до металевих пластин 1.2; 1.6 – елементи кріплення котушки індуктивності до металевих пластин 1.2; 1.7 – котушка індуктивності; 1.8 – зворотна пружина.

Авторами сформульовано принцип, розроблено та представлено підхід до оцінки ефективності покриття території зони радіаційного забруднення автоматизованими пристроями оцінки параметрів радіаційного забруднення, за умов їх доставки в зону небезпеки завислими, над точкою скидання, БПЛА та використання способів одиночного та касетного (див. рис. 4) скидання вантажу. Отримані аналітичні вирази для розрахунку відносного середнього виграшу у часі для касетного способу, у порівнянні з одиночним способом доставки автоматизованих пристроїв оцінки параметрів зони радіаційного забруднення [24, 25].

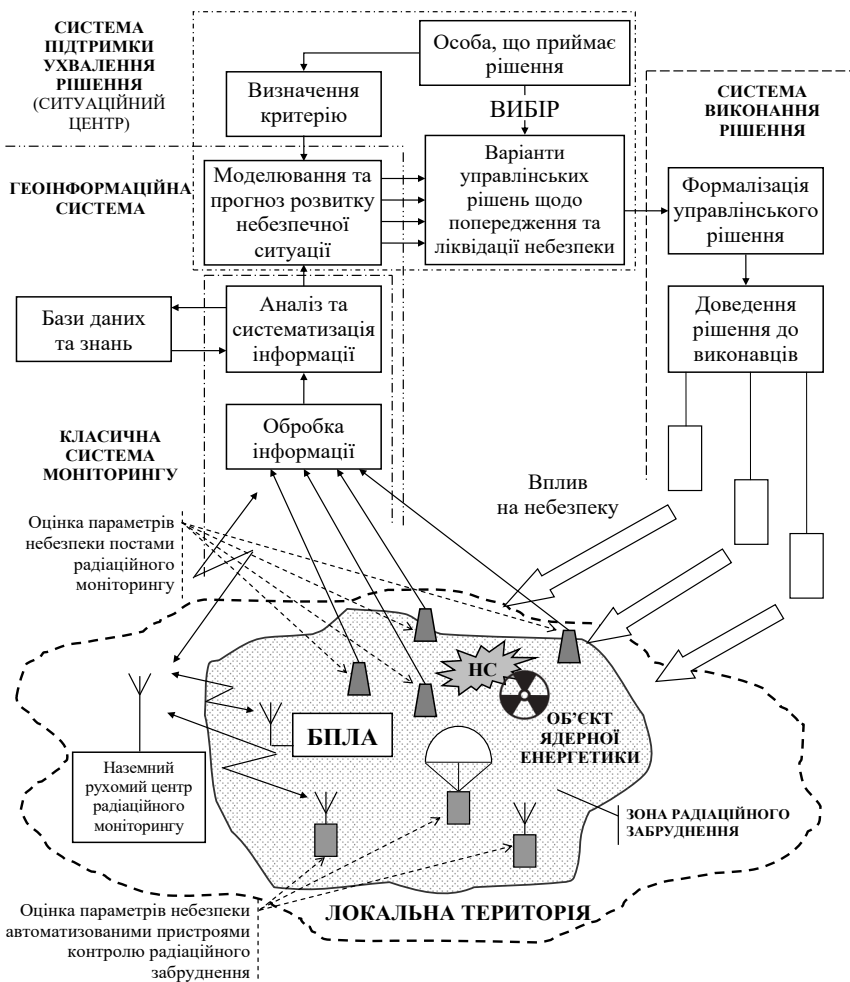


Рис. 1 – Комплексна функціональна схема системи оперативного моніторингу радіоактивного забруднення екосистеми безпілотними літальними апаратами внаслідок аварій на об'єктах ядерної енергетики

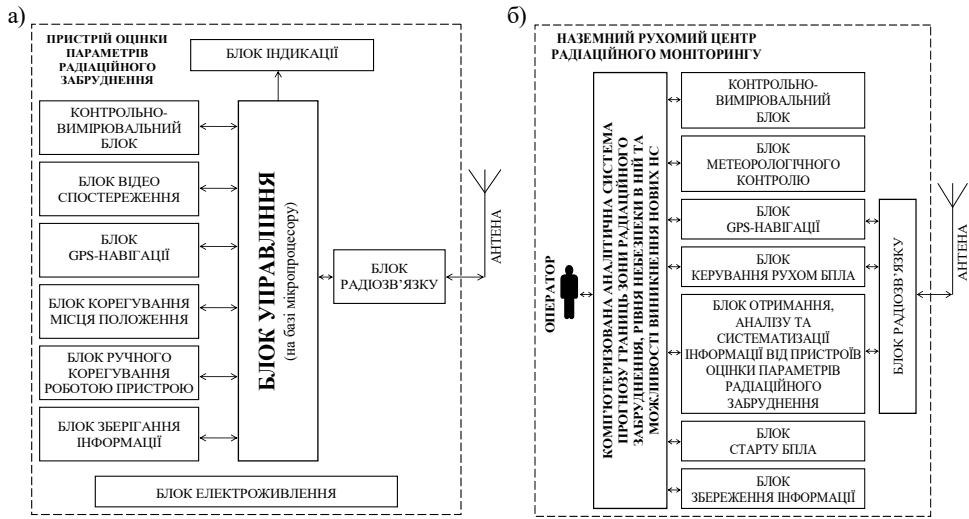


Рис. 2 – Функціональні схеми: а) наземного мобільного автоматизованого пристрою оцінки параметрів радіаційного забруднення; б) наземного рухомого центру радіаційного моніторингу

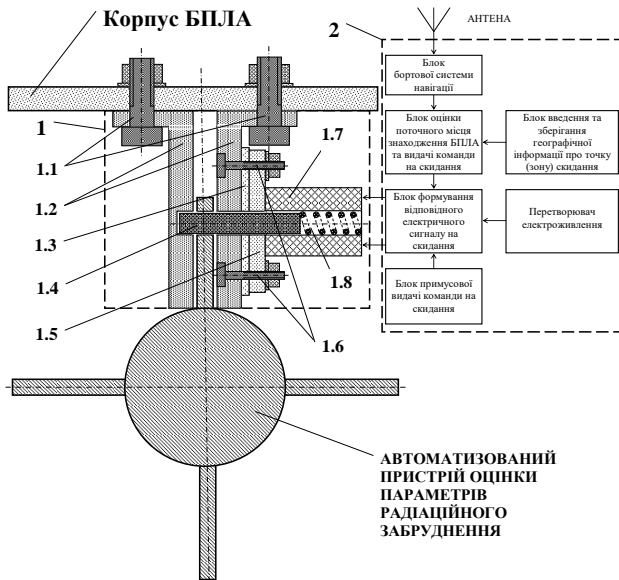


Рис. 3 – Електромеханічний пристрій для скидання з БПЛА у зону радіаційного забруднення автоматизованих пристроїв оцінки параметрів небезпеки

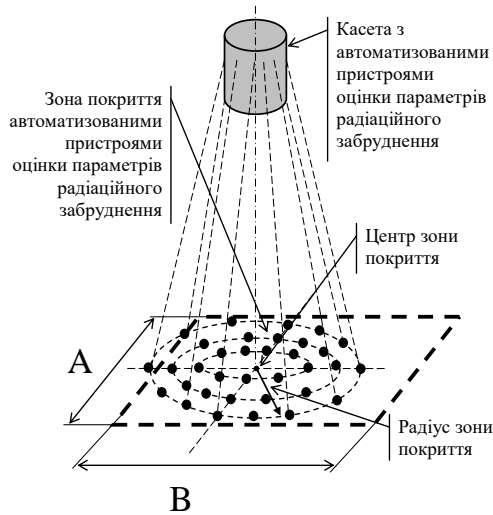


Рис. 4 – Схема покриття зони радіаційного забруднення касетним виробом, оснащеним автоматизованими пристроями оцінки параметрів небезпеки

Функціонування розробленої авторами підсистеми (яку представлено на рис. 1) оперативного моніторингу радіоактивного забруднення екосистеми, внаслідок аварій на об'єктах ядерної енергетики, повинно здійснюватись у складі функціонуючої в Україні чотирьохрівневої Єдиної державної системи цивільного захисту та в межах класичного контуру управління, який забезпечує: 1) збір, обробку та аналіз інформації; 2) моделювання розвитку обстановки на об'єкті управління та розвитку НС на території міста, регіону, держави; 3) розробку та ухвалення управлінських рішень щодо попередження та ліквідації НС, а також мінімізації їх наслідків; 4) виконання рішень щодо попередження та ліквідації НС, а також мінімізації їх наслідків [18, 22–30].

У розробленій підсистемі отримання інформації про параметри радіаційного забруднення здійснюється шляхом використання стаціонарних постів радіаційного моніторингу та автоматизованих пристроїв оцінки параметрів радіаційного забруднення, доставка яких у зону радіоактивного забруднення виконується БПЛА.

Отримана стаціонарними постами радіаційного моніторингу первинна інформація про рівень радіаційної небезпеки для екосистеми на локальній території по кабелях передається до пристроїв другого рівня.

Первинна інформація, що отримана автоматизованими пристроями оцінки параметрів радіаційного забруднення, які доставлено у зону радіоактивного забруднення за допомогою БПЛА, спочатку транслюється по радіоканалу до наземного рухомого центру радіаційного моніторингу, де відбувається первинний аналіз та систематизація цієї інформації. Від наземного рухомого центру радіаційного моніторингу інформація по радіоканалу транслюється також до пристроїв другого рівня.

Пристрої другого рівня призначені виконувати обробку отриманої інформації та представляти її у вигляді, необхідному для третього рівня. При цьому, обробка отриманої інформації може виконуватися як в одному місці, так і на декількох, залежно від конкретної системи моніторингу та розмірів контрольованої нею локальної території. Оброблена інформація у

відповідному вигляді надходить на третій рівень, де виконується її аналіз та систематизація даних, на основі чого робиться висновок про стан радіаційної небезпеки локальної території. Особливо важливо для забезпечення швидкодії системи використання автоматизованих засобів обробки інформації, яке значно прискорить процеси на другому та третьому рівнях системи моніторингу, дозволить створити електронні, доступні в реальному масштабі часу, бази даних та знань. Використання відповідних математичних методів дозволить на основі отриманої інформації у відносно нетривалі терміни часу виконати моделювання небезпечної ситуації, прогнозування її розвитку та рівня, відображати прогнозовану динаміку катастрофічних подій графічно (у тому числі з використанням електронних мап).

Друга інформаційна підсистема є системою підтримки ухвалення рішення. Особа, що приймає рішення (ОПР), визначає один або декілька критеріїв, відповідно до яких здійснюється прогностичне моделювання розвитку радіаційної небезпеки та виробляються варіанти управлінських рішень, які обґрунтовані відповідними розрахунками. З набору варіантів управлінських рішень ОПР обирає один, або задає ще додаткові критерії, відповідно до яких виконується моделювання та розробка управлінських рішень, направлених на недопущення розвитку небезпеки до рівня катастрофи. Якщо ж катастрофи вже не уникнути, то розробка управлінських рішень направлена на мінімізацію наслідків від неї. Затверджене ОПР рішення надходить до третьої підсистеми – підсистеми виконання рішення, де виконується його формалізація та доведення до виконавців – функціонуючої в Україні ЄДСЦЗ. Зміни стану локальної території та зміни стану небезпеки на ній викликать зміни у величинах вимірюваних параметрів, що фіксуються пристроями контролю. Подальше моделювання покаже ефективність виконання управлінського рішення – контур управління замкнувся.

### **Формування моделі об'єднаного застосування стаціонарних постів радіаційного моніторингу, безпілотних літальних апаратів та наземних пристроїв контролю факторів небезпеки**

Формулювання, у відповідності до даних рис. 5, моделі об'єднаного застосування стаціонарних постів радіаційного моніторингу (у режимі повсякденного функціонування ОЯЕ), а також БПЛА та наземних тимчасових пристроїв контролю факторів небезпеки (у режимах аварійної та надзвичайної ситуацій ОЯЕ), де доставка цих наземних пристроїв контролю у зону радіаційної небезпеки виконується БПЛА, здійснено на основі наступних уявлень.

Нехай задано об'єкт ядерної енергетики – Рівненська АЕС, що представлена на рис. 6 у вигляді точки  $A(0,0)$ . Стаціонарні пости радіаційного моніторингу, які розташовані у тридцятикілометровій зоні навколо ОЯЕ та проводять оцінку радіаційної небезпеки для екосистеми у режимі повсякденного функціонування ОЯЕ, мають вигляд множини точок  $P_m(x_m, y_m)$ ,  $m = 1, \dots, N_s$ , де  $N_s$  – кількість стаціонарних постів радіаційного моніторингу. Наземні тимчасові пристрої оцінки параметрів радіаційної небезпеки, які доставлено у зону радіаційного забруднення за допомогою БПЛА у режимах аварійної та надзвичайної ситуацій ОЯЕ, мають вигляд множини точок  $F_g(x_g, y_g)$ ,  $g = 1, \dots, N_T$ , де  $N_T$  – кількість тимчасових пристроїв оцінки параметрів радіаційної небезпеки.



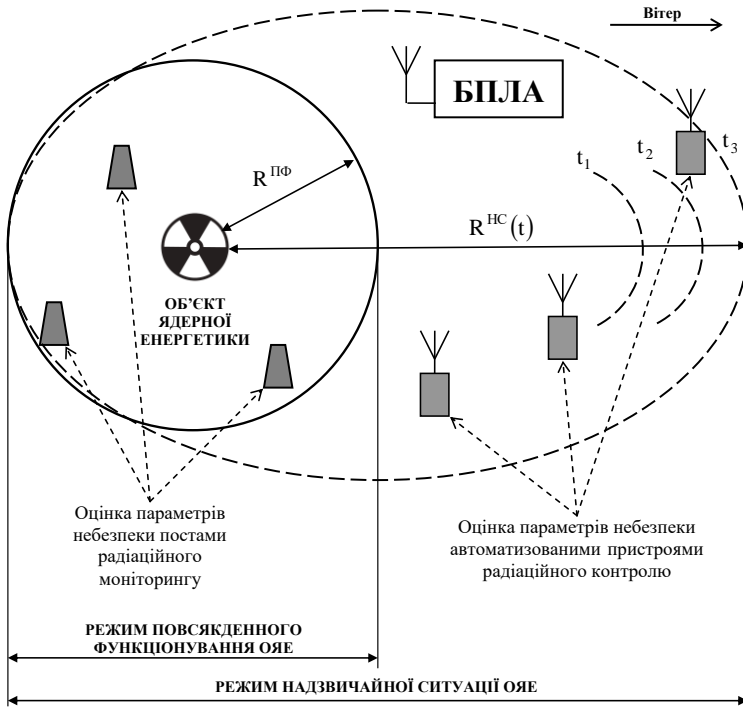


Рис. 5 – Схема об'єднаного застосування стаціонарних постів радіаційного моніторингу, БПЛА та наземних тимчасових пристроїв контролю факторів небезпеки у різних режимах функціонування ОЯЕ

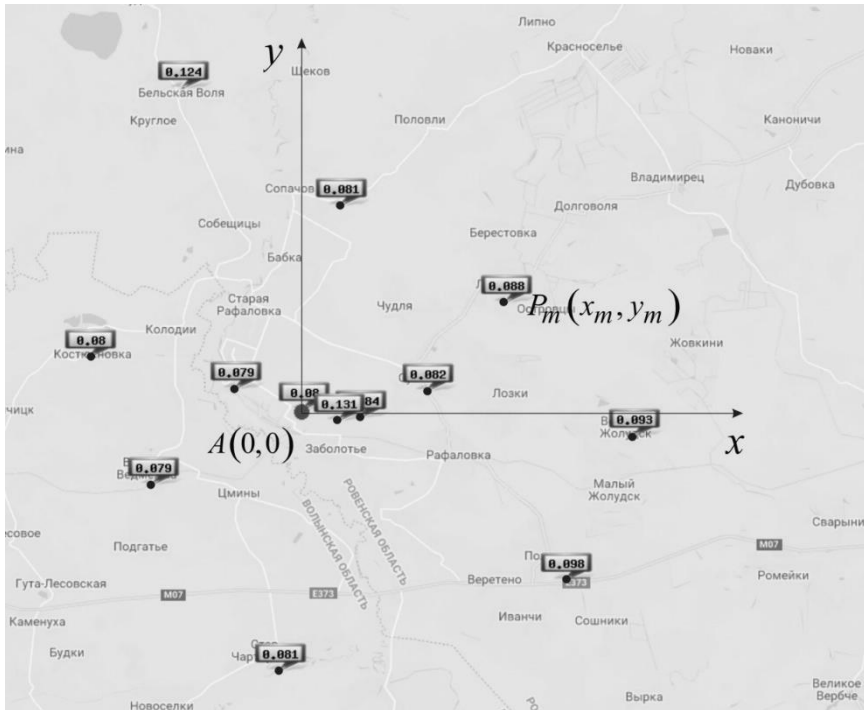


Рис. 6 – Схема розташування Рівненської АЕС та стаціонарних постів радіаційного моніторингу у тридцятикілометровій зоні навколо станції

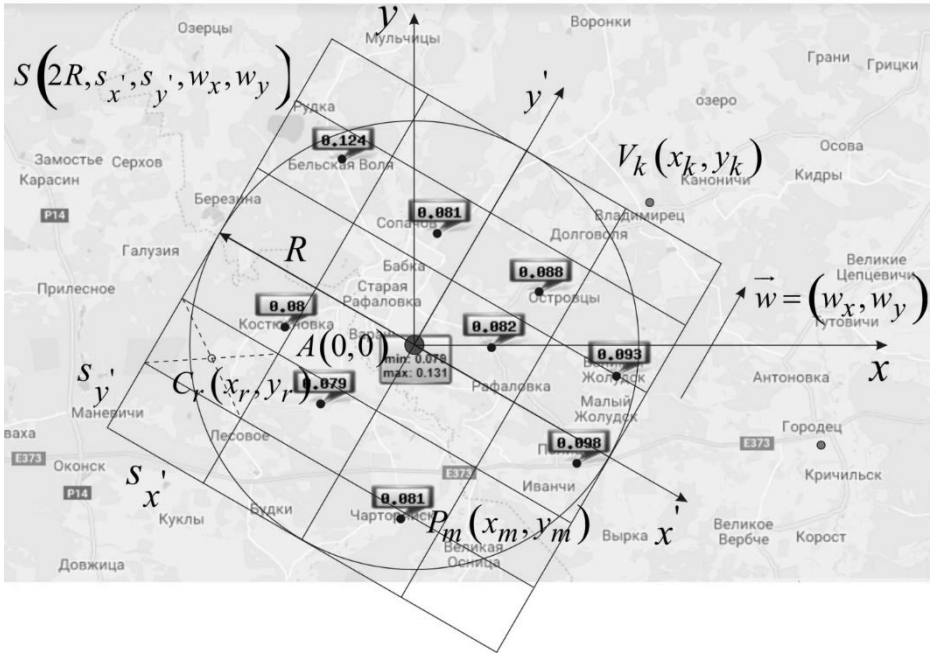


Рис. 7 – Побудова регулярної сітки для реконструкції поля радіоактивного забруднення

Необхідно визначити мінімальну кількість наземних тимчасових пристроїв оцінки параметрів радіаційної небезпеки ( $N_{T_{\min}}$ ), доставка яких у зону радіоактивного забруднення виконується БПЛА, для ефективного проведення аварійного моніторингу радіоактивного забруднення внаслідок аварії на ОЯЕ. При цьому мають виконуватися наступні обмеження:

– побудова поля радіоактивного забруднення має здійснюватися із заданою точністю  $\varepsilon$ ;

– час на побудову поля забруднення, з урахуванням терміну розгортання системи моніторингу та доставки у зону радіоактивного забруднення безпілотними літальними апаратами тимчасових пристроїв оцінки параметрів радіаційної небезпеки, має не перевищувати гранично припустимого  $T^*$ ;

– регулярна сітка  $S(2R, s_x', s_y', w_x, w_y)$  має будуватися з урахуванням вектора напрямку вітру  $\vec{w} = (w_x, w_y)$ , причому основою сітки є квадрат (рис. 7), в який вписане коло радіуса  $R$  із центром у точці  $A(0,0)$ . Радіус кола визначається за допомогою наступної умови: а) у режимі повсякденного функціонування (ПФ) об'єкта ядерної енергетики  $R = R^{ПФ} = 30 \text{ км}$ , а сітці мають належати стаціонарні пости радіаційного моніторингу  $P_m(x_m, y_m)$ ,  $m = 1, \dots, N_S$ ; б) у режимі аварійної та надзвичайної ситуацій об'єкта ядерної енергетики  $R = R^{HC}(t)$  (зона НС змінюється у часі  $t$ ), а сітці мають належати стаціонарні пости радіаційного моніторингу  $P_m(x_m, y_m)$ ,  $m = 1, \dots, N_S$  та наземні тимчасові пристрої оцінки параметрів радіаційної небезпеки, які доставлено у зону радіаційного забруднення за допомогою БПЛА,  $F_g(x_g, y_g)$ ,  $g = 1, \dots, N_T$ ;

– наземні тимчасові пристрої оцінки параметрів радіаційної небезпеки  $N_{T_{ij}}$ ,  $i = 1, \dots, N^{\text{БПЛА}}$  ( $N^{\text{БПЛА}}$  – кількість БПЛА, з урахуванням корисного навантаження БПЛА –  $N_T^{\text{БПЛА}}$ ),  $j = 1, \dots, N_{T_i}$  ( $N_{T_i}$  – кількість наземних тимчасових пристроїв оцінки параметрів радіаційної небезпеки розташовано на борту  $i$ -го БПЛА),  $N_T = \sum_{i=1}^{N^{\text{БПЛА}}} N_{T_i}$ , мають розміщуватися на визначених місцях  $V_k(x_k, y_k)$ ,  $k = 1, \dots, N_K$ , та фіксувати дозу гамма-випромінювання у вузлах сітки;

– мають також враховуватися технічні характеристики кожного виду БПЛА, а саме, швидкість, час польоту, максимальна дальність польоту, час розгортання тощо.

З врахуванням представлених обмежень модель моніторингу радіоактивного забруднення, з урахуванням об'єднаного застосування стаціонарних постів радіаційного моніторингу, БПЛА та наземних тимчасових пристроїв контролю факторів небезпеки у різних режимах функціонування ОЯЕ, має наступний вид:

$$\min_W N_{T_{\min}} (R^{HC}(t)), \quad (1)$$

де  $W$ :

$$\frac{|\Phi_{q+1}(C_r) - \Phi_q(C_r)|}{\Phi_q(C_r)} \leq \varepsilon; \quad r = 1, \dots, N_C; \quad (2)$$

$$\frac{|\Phi_{q+1}(P_m) - \Phi_q(P_m)|}{\Phi_q(P_m)} \leq \varepsilon; \quad m = 1, \dots, N_S; \quad (3)$$

$$\max T(l_i) \leq T^*; \quad i = 1, \dots, N^{\text{БПЛА}}; \quad L = \sum_{i=1}^{N^{\text{БПЛА}}} l_i; \quad (4)$$

$$\max N_{T_i} \leq N_T^{\text{БПЛА}}; \quad (5)$$

$$P_m(x_m, y_m) \in S(2R^{\text{ПФ}}, s_{x'}, s_{y'}, w_x, w_y); \quad m = 1, \dots, N_S; \quad (6)$$

$$F_g(x_g, y_g) \in S(2R^{\text{HC}}(t), s_{x'}, s_{y'}, w_x, w_y); \quad g = 1, \dots, N_T; \quad (7)$$

$$N_{T_{ij}} \in V_k(x_k, y_k); \quad i = 1, \dots, N^{\text{БПЛА}}; \quad j = 1, \dots, N_{T_i}; \quad N^T = \sum_{i=1}^{N^{\text{БПЛА}}} N_{T_i}; \quad k = 1, \dots, N_K. \quad (8)$$

Вираз (1) є цільовою функцією. Обмеження (2) та (3) являють собою умову побудови поля забруднення із заданою точністю  $\varepsilon$ . Тут  $C_r(x_r, y_r)$  – точки, що знаходяться на перетину діагоналей кожної комірки сітки, причому кількість

комірок дорівнює  $N_C$ ;  $\Phi_q(C_r)$  та  $\Phi_{q+1}(C_r)$  – значення поля забруднення у відповідних точках на  $q$  та  $q+1$  ітераціях;  $P_m(x_m, y_m)$  – стаціонарні пости радіаційного моніторингу, кількість яких дорівнює  $N_S$ ;  $\Phi(P_m)$  – рівень гамма-випромінювання, зафіксований стаціонарними постами радіаційного моніторингу. Обмеження (4) являє собою умову побудови поля забруднення протягом часу  $T$ , який залежить від маршрутів  $l_{ij}$  БПЛА щодо доставки у зону радіаційного забруднення наземних тимчасових пристроїв контролю факторів безпеки  $N_{T_{ij}}$  і не перевищує заданого  $T^*$ . При цьому,  $L$  – сумарна довжина польоту БПЛА. Обмеження (5) характеризує умову завантаження  $i$ -того БПЛА наземними тимчасовими пристроями контролю факторів безпеки ( $N_{T_i}$ ), з урахуванням не перевищення показника корисного навантаження БПЛА ( $N_T^{БПЛА}$ ). Обмеження (6) являє собою умову належності стаціонарних постів радіаційного моніторингу регулярній сітці  $S(2R^{ПФ}, s_x', s_y', w_x, w_y)$  у зоні (радіус зони дорівнює  $R = R^{ПФ} = 30\text{км}$ ), яка характерна для режиму повсякденного функціонування об'єкта ядерної енергетики. Обмеження (7) являє собою умову належності наземних тимчасових пристроїв контролю факторів безпеки (які доставлено у зону радіаційного забруднення за допомогою БПЛА) регулярній сітці  $S(2R^{HC}(t), s_x', s_y', w_x, w_y)$  у зоні (радіус зони змінюється у часі  $t$  та дорівнює  $R = R^{HC}(t)$ ), яка характерна режиму аварійної та надзвичайної ситуацій об'єкта ядерної енергетики. Обмеження (8) описує належність наземних тимчасових пристроїв контролю факторів безпеки (які доставлено у зону радіаційного забруднення за допомогою БПЛА) фіксованим місцям їх розміщення  $V_k(x_k, y_k)$ ,  $k = 1, \dots, N_K$ .

Таким чином, задача, яка описується сумою положень (1)÷(8), є комбінованою, тобто відноситься як до класу задач комбінаторної оптимізації, так і до класу задач трасування.

Особливості моделі моніторингу БПЛА рівня забруднення екосистеми внаслідок аварій на об'єктах ядерної енергетики:

- цільова функція визначається в процесі розв'язання задачі;
- обмеження (2)÷(4) є нелінійними, а (5)÷(8) – дискретними;
- загальна кількість обмежень дорівнює  $N_C + 2N_S + 2N^{БПЛА}N_{T_i}$ .

Слід відзначити, що для визначення початкових розмірів комірки регулярної сітки  $s_x'$  та  $s_y'$  можна скористатися, наприклад, дослідженням поля радіоактивного забруднення внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС. Далі, в процесі розв'язання задачі, розміри комірки коригуються відповідно до обмежень (2) та (3).

Запропонована у самому загальному вигляді динамічна модель оперативного моніторингу рівня забруднення екосистеми внаслідок аварій на об'єктах ядерної енергетики потребує подальшого ретельного дослідження та можливого спрощення по складових її обмеженнях.

## Висновки

1. Розроблені науково-технічні основи створення комплексної функціональної схеми системи моніторингу радіоактивного забруднення екосистеми внаслідок аварій на об'єктах ядерної енергетики. Схема характеризується тим, що для підвищення оперативності моніторингу сумісно застосовуються стаціонарні пости радіаційного моніторингу та наземні тимчасові пристрої контролю факторів небезпеки, які доставляються в зону НС за допомогою БПЛА.

2. Розроблена система моніторингу дозволяє проводити доставку в зону радіоактивного забруднення наземних тимчасових автоматизованих пристроїв контролю факторів небезпеки за допомогою БПЛА, для чого розроблені схеми покриття зони радіаційного забруднення касетним та одиночним способами доставки пристроїв контролю. Запропонована система моніторингу передбачає розташування диспетчерського пункту отримання й обробки інформації та обладнання для старту БПЛА на наземній рухомій платформі (штабний автомобіль; пожежно-рятувальний автомобіль; автомобіль радіаційної, хімічної та біологічної розвідки; бронетранспортер; машина військової розвідки; тягач та ін.).

3. Здійснено побудову моделі проведення моніторингу радіоактивного забруднення екосистеми внаслідок аварії на об'єктах ядерної енергетики за допомогою сумісного застосування стаціонарних постів радіаційного моніторингу, БПЛА та наземних тимчасових пристроїв контролю факторів небезпеки. Зроблено висновок, що задача (1)÷(8) є комбінованою, тобто відноситься як до класу задач комбінаторної оптимізації, так і до класу задач трасування. З урахуванням сказаного потребує розробки комплексного рішення поставленої задачі, оскільки подальше дослідження особливостей розробленої моделі дозволить суттєво оптимізувати час доставки тимчасових автоматизованих пристроїв контролю факторів небезпеки в зону НС та підвищити достовірність отриманих результатів. В результаті успішного розв'язання задачі (1)÷(8) подальші дослідження будуть направлені на розробку методу моніторингу радіоактивного забруднення екосистеми внаслідок аварії на об'єктах ядерної енергетики за допомогою сумісного застосування стаціонарних постів радіаційного моніторингу, БПЛА та наземних тимчасових пристроїв контролю факторів небезпеки.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dsns.gov.ua/>
2. Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2016 рік [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.dsns.gov.ua/ua/Analitichniy-oglyad-stanu-tehnogennoyi-ta-prirodnoyi-bezpeki-v-Ukrayini-za-2015-rik.html>
3. Андронов В.А. Природні та техногенні загрози, оцінювання небезпек / В.А. Андронов, А.С. Рогозін, О.М. Соболев, В.В. Тютюник, Р.І. Шевченко – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2011. – 264 с.
4. Черногор Л.Ф. Фізика и екологія катастроф / Л.Ф. Черногор – Харків: Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 2012. – 556 с.
5. Романченко І.С. Екологічна безпека: екологічний стан та методи його моніторингу / І.С. Романченко, А.І. Сбітнев, С.Г. Бутенко – Київ, 2006. – 560 с.
6. Батлук В.А. Радіаційна екологія / В.А. Батлук – Київ: Знання, 2006. – 560 с.

7. Перепелятников Г.П. Основы общей радиозологии / Г.П. Перепелятников – Киев: Атика, 2008. – 460 с.
8. Васильев Н.В. Медико-социальные последствия ядерных катастроф (Семипалатинск – Алтай, Южный Урал, полигон «Северный – Новая Земля», Чернобыль) / Н.В. Васильев, В.И. Мальцев, В.М. Коваленко, В.М. Шубик, В.Ф. Москаленко, Ю.Л. Волянский, Т.И. Коляда, В.М. Пономаренко, З.М. Парамонов – Киев: «Здоровье», 1999. – 296 с.
9. Сліпченко В.Г. Еколого-економічні збитки: кількісна оцінка / В.Г. Сліпченко, Є.В. Брикун, В.В. Дергачова [та ін.]; За ред. І.В. Недіна. – Київ: ІВЦ «Видавництво Політехніка», 2001. – 216 с.
10. Калугін В.Д. Енергетичний підхід до оцінки екологічного стану природно-техногенно-соціальної системи України в режимі повсякденного функціонування / В.Д. Калугін, В.В. Тютюник, Л.Ф. Черногор, Р.І. Шевченко // Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості. – Севастополь: Севастопольський національний університет ядерної енергії та промисловості, 2013. – Вип. 4(48). – С. 196–208.
11. Чернявский И.Ю. Анализ условий для создания системы выявления и оценки уровня радиационной безопасности жизнедеятельности населения при чрезвычайных ситуациях военного характера / И.Ю. Чернявский, В.В. Тютюник, В.Д. Калугин // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2016. – Вип. 23. – С. 168–185.
12. Коба К.М. Моделі і методи розв'язання задач маршрутизації при ліквідації наслідків техногенних аварій: автореф. дис. ... к.т.н.: спец. 01.05.02 "Математичне моделювання та обчислювальні методи" / К.М. Коба. – Х., 2005. – 21 с.
13. Рапута В.Ф. Модели реконструкции полей радиоактивного загрязнения территорий после ядерных взрывов / В.Ф. Рапута // Ползуновский вестник №4-2, 2011. – С. 133–137.
14. В МАГАТЭ презентovali беспилотники для радиационного мониторинга [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.atomic-energy.ru/news/2013/05/29/41898>.
15. Система послеаварийного мониторинга АЭС с использованием беспилотных летательных аппаратов: концепция, принципы построения / [А.А. Саченко, В.В. Кочан, В.С. Харченко, М.А. Ястребенецкий, Г.В. Фесенко, М.Э. Яновский] // Ядерна та радіаційна безпека 1(73), 2017. – С. 24–29.
16. Бабак С.В. Мониторинг окружающей среды АЭС с использованием систем видеонаблюдения и измерения мощности экспозиционной дозы на базе беспилотного авиационного комплекса / С.В. Бабак // Системи обробки інформації, 2015. – Вип. 7(132). – С. 190–194.
17. Безпілотні літальні апарати радіаційної розвідки і сільськогосподарського призначення: [монографія] / [В.Я. Канченко, Р.В. Карнаушенко, О.О. Ключников, О.П. Мариношенко, М.Л. Челур] – Чернобыль (Київ. обл.): Ін-т проблем безпеки АЕС, 2015. – 180 с.
18. Тютюник В.В. Розробка науково-технічних основ системи моніторингу зони надзвичайної ситуації, яка включає доставку автоматизованих пристроїв контролю повітряними безпілотними засобами / В.В. Тютюник, В.Д. Калугін, Л.Ф. Черногор, Р.І. Шевченко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2014. – №3(16). – С. 41–44.
19. Бабушкин Ю.Н. Применение спутниковой навигации при действиях в экстремальных условиях / Ю.Н. Бабушкин // Информост. – 2001. – № 3. – С. 74–85.
20. Пат. 49115 Україна, МПК(2009) G08C19/00, G08B19/00, G08B21/00. Система раннього виявлення надзвичайних ситуацій / Йора А.П., Сидоров С.М. – № u201002449; заявл. 04.03.2010; опубл. 12.04.2010, бюл. № 7.

21. Пат. 60922 Україна, МПК(2011.01) G01V3/00. Спосіб оперативного визначення ризиків надзвичайних ситуацій / Якорнов Є.А., Липчеська І.Л., Лисенко О.І., Романченко І.С., Андрієвська О.А., Чумаченко С.М., Туровець Ю.С., Крюченко Н.О.; Власники патенту: Якорнов Є.А., Липчеська І.Л., Лисенко О.І., Романченко І.С., Андрієвська О.А. – № u201101676; заявл. 14.02.2011; опубл. 25.06.2011, бюл. № 12.
22. Пат. 105339 Україна, МПК(2016.01) B64D1/08 (2006.01), G08B19/00, G08B25/00, G08B26/00. Пристрій для скидання автоматизованих засобів контролю факторів небезпеки та вантажів для постраждалих з безпілотного літального апарату / Андронов В.А., Калугін В.Д., Тютюник В.В., Тютюник Ю.В.; Власник патенту: Національний університет цивільного захисту України. – № u201510075; заявл. 15.10.2015; опубл. 10.03.2016, бюл. № 5.
23. Пат. 114393 Україна, МПК(2017.01) B64D1/02 (2006.01), G08B19/00, G08B17/00, G08B21/00. Пристрій для скидання автоматизованих засобів контролю небезпечних факторів надзвичайних ситуацій з безпілотного літального апарату / Андронов В.А., Калугін В.Д., Левтеров О.А., Тютюник В.В., Тютюник Ю.В.; Власник патенту: Національний університет цивільного захисту України. – № u201608736; заявл. 11.08.2016; опубл. 10.03.2017, бюл. № 5.
24. Тютюник В.В. Оцінка ефективності покриття території надзвичайної ситуації за допомогою автоматизованих пристроїв контролю небезпечних факторів при їх розкиданні із зависаючого над точкою скидання безпілотного літального апарату / В.В. Тютюник, В.Д. Калугін, Г.В. Іванець, М.Г. Іванець, Ю.В. Захарченко // Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист. – Київ: Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України, 2016. – Вип. 10. – С. 34–43.
25. Іванець Г.В. Алгоритм оцінки ефективності покриття території надзвичайної ситуації автоматизованими пристроями контролю небезпечних факторів при їх розкиданні з безпілотного літального апарату в умовах нестабільностей повітряного середовища / Г.В. Іванець, В.В. Тютюник, В.Д. Калугін, Б.Б. Поспелов, Ю.В. Захарченко // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2017. – Вип. 25. – С. 45–56.
26. Андронов В.А. Науково-конструкторські основи створення комплексної системи моніторингу надзвичайних ситуацій в Україні: Монографія / В.А. Андронов, М.М. Дівізінюк, В.Д. Калугін, В.В. Тютюник. – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2016. – 319 с.
27. Калугін В.Д. Розробка науково-технічних основ для створення системи моніторингу, попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру та забезпечення екологічної безпеки / В.Д. Калугін, В.В. Тютюник, Л.Ф. Черногор, Р.І. Шевченко // Системи обробки інформації. – Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2013. – Вип. 9(116). – С. 204–216.
28. Кодекс цивільного захисту України від 2 жовтня 2012 року № 5403-VI // Голос України. – 2012.– листопад (№ 220(5470)). – С. 4–20.
29. Постанова Кабінету Міністрів України від 9 січня 2014 року № 11 «Про затвердження Положення про Єдину державну систему цивільного захисту» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF>
30. Розпорядження КМУ від 25 січня 2017 р. №61 р. «Про схвалення Стратегії реформування системи Державної служби України з надзвичайних ситуацій» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/61-2017-%D1%80>.

*Стаття надійшла до редакції 16.01.2020 і прийнята до друку після рецензування 03.03.2020*

## REFERENCES

1. Nacionaljna dopovidj pro stan tekhnoghennoi ta pryrodnoi bezpeky v Ukraini. (n.d.). Retrieved January 18, 2020, from <https://www.dsns.gov.ua/> (in Ukrainian)
2. Analitychnyj oghljad stanu tekhnoghennoi ta pryrodnoi bezpeky v Ukraini za 2016 rik. (n.d.). Retrieved January 18, 2020, from <http://www.dsns.gov.ua/ua/Analitichniy-oglyad-stanu-tehnoghennoi-ta-pryrodnoi-bezpeki-v-Ukrayini-za-2015-rik.html> (in Ukrainian)
3. Andronov, V.A., Roghozin, A.S., Sobolj, O.M., Tuituinyk, V.V. & Shevchenko, R.I. (2011). *Pryrodni ta tekhnoghenni zaghrozy, ocinjvannja nebezpek*. Kharkiv: Nacionalnyj universytet cyvilnogho zakhystu Ukrainy. (in Ukrainian)
4. Chernogor, L.F. (2012). *Fizika i ekologiya katastrof*. Kharkiv: Kharjkovskij nacyonalnij unyversytet ymeny V.N. Karazyna. (in Russian)
5. Romanchenko, I.S., Sbitnjev, A.I. & Butenko, S.Gh. (2006). *Ekologhichna bezpeka: ekologhichnyj stan ta metody jogho monitorynghu*. Kyiv. (in Ukrainian)
6. Batluk, V.A. (2006). *Radiacijna ekologhija*. Kyiv: Znannya. (in Ukrainian)
7. Perepelyatnikov, G.P. (2008). *Osnovy obshchey radioekologii*. Kiev: Atika. (in Russian)
8. Vasil'ev, N.V., Mal'tsev, V.I., Kovalenko, V.M., Shubik, V.M., Moskalenko, V.F., Volyanskiy, Yu.L., Kolyada, T.I., Ponomarenko, V.M. & Paramonov, Z.M. (1999). *Mediko-sotsial'nye posledstviya yadernykh katastrof (Semipalatinsk – Altay, Yuzhnyy Ural, poligon «Severnnyy – Novaya Zemlya», Chernobyl')*. Kiev: «Zdorov'e». (in Russian)
9. Slipchenko, V.Gh., Brykun, Je.V. & Derghachova, V.V. (2001). *Ekologho-ekonomichni zbytky: kiljkisna ocinka*. Kyiv: IVC «Vydavnytstvo Politekhnika». (in Ukrainian)
10. Kalughin, V.D., Tuituinyk, V.V., Chornogor, L.F. & Shevchenko, R.I. (2013). Energhetychnyj pidkhid do ocinky ekologhichnogho stanu pryrodno-tekhnoghenno-socialnoji systemy Ukrainy v rehymy povsjakdennogho funkcionuvannja. *Zbirnyk naukovykh pracj Sevastopoljskoghho nacionaljnoghho universytetu jadernoji energhiji ta promyslovosti*, 4(48), 196-208. (in Ukrainian)
11. Chernyavskiy, I.Yu., Tuituinyk, V.V. & Kalugin, V.D. (2016). Analiz usloviy dlya sozdaniya systemy vyyavleniya i otsenki urovnya radiatsionnoy bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti naseleniya pri chrezvychaynykh situatsiyakh voennogo kharaktera. *Problemy nadzvychajnykh sytuacij*, 23, 168-185. (in Russian)
12. Koba, K.M. (2005). Modeli i metody rozv'jazannja zadach marshrutyzaciji pry likvidaciji naslidkiv tekhnoghennykh avarij. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kharkiv (in Ukrainian)
13. Raputa, V.F. (2011). Modeli rekonstruksii poley radioaktivnogo zagryazneniya territoriy posle yadernykh vzryvov. *Polzunovskiy vestnik*, 2-4, 133-137. (in Russian)
14. V MAGATE prezentovali bespilotniki dlya radiatsionnogo monitoringa. Retrieved January 18, 2020, from <http://www.atomic-energy.ru/news/2013/05/29/41898>. (in Russian)
15. Sachenko, A.A., Kochan, V.V., Kharchenko, V.S., Yastrebenetskiy, M.A., Fesenko, G.V. & Yanovskiy, M.E. (2017). Sistema posleavariynogo monitoringa AES s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov: kontseptsiya, printsipy postroeniya. *Jaderna ta radiacijna bezpeka*, 1(73), 24-29. (in Russian)
16. Babak, S.V. (2015). Monitoring okruzhayushchey srody AES s ispol'zovaniem sistem videonablyudeniya i izmereniya moshchnosti ekspozitsionnoy dozy na baze bespilotnogo aviatsionnogo kompleksa. *Systemy obrobky informacii*, 7(132), 190-194. (in Russian)
17. Kanchenko, V.Ja., Karnausenko, R.V., Kljuchnykov, O.O., Marynoshenko, O.P. & Chepur, M.L. (2015). *Bezpilotni litaljni aparaty radiacijnoji rozvidky i siljskoghospodarskoghho pryznachennja: [monoghrafija]*. Chornobylj (Kyiv. obl.): In-t problem bezpeky AES. (in Ukrainian)
18. Tuituinyk, V.V., Kalughin, V.D., Chornogor, L.F. & Shevchenko, R.I. (2014). Rozrobka naukovo-tehnychnykh osnov systemy monitorynghu zony nadzvychajnoji sytuaciji, jaka vkljuchaje dostavku avtomatyzovanykh prystrojiv kontrolju povitranymy bezpilotnymy zasobamy. *Nauka i tekhnika Povitranjnykh Syl Zbrojnykh Syl Ukrainy*, 3(16), 41-44. (in Ukrainian)



19. Babushkin, Yu. N. (2001). Primenenie sputnikovoy navigatsii pri deystviyakh v ekstremal'nykh usloviyakh. *Informost*, 3, 74-85. (in Russian)
20. Pat. 49115 Ukraïna, MPK(2009) G08C19/00, G08B19/00, G08B21/00. Systema rannjogho vyjavlennja nadzvychajnykh sytuacij / Jora A.P., Sydorov S.M. – # u201002449; zajavl. 04.03.2010; opubl. 12.04.2010, bjul. # 7. (in Ukrainian)
21. Pat. 60922 Ukraïna, MPK(2011.01) G01V3/00. Sposib operatyvnogho vyznachennja ryzykiv nadzvychajnykh sytuacij / Jakornov Je.A., Lipchevsjka I.L., Lysenko O.I., Romanchenko I.S., Andrijevsjka O.A., Chumachenko S.M., Turovecj Ju.S., Krjuchenko N.O.; Vlasnyky patentu: Jakornov Je.A., Lipchevsjka I.L., Lysenko O.I., Romanchenko I.S., Andrijevsjka O.A. – № u201101676; zajavl. 14.02.2011; opubl. 25.06.2011, bjul. № 12. (in Ukrainian)
22. Pat. 105339 Ukraïna, MPK(2016.01) B64D1/08 (2006.01), G08B19/00, G08B25/00, G08B26/00. Prystrij dlja skydannja avtomatyzovanykh zasobiv kontrolju faktoriv nebezpeky ta vantazhiv dlja postrazhdalych z bezpilotnogho litaljnogho aparatu / Andronov V.A., Kalughin V.D., Tjutjunyk V.V., Tjutjunyk Ju.V; Vlasnyk patentu: Nacionaljnyj universytet cyviljnogho zakhystu Ukraïny. – № u201510075; zajavl. 15.10.2015; opubl. 10.03.2016, bjul. # 5. (in Ukrainian)
23. Pat. 114393 Ukraïna, MPK(2017.01) B64D1/02 (2006.01), G08B19/00, G08B17/00, G08B21/00. Prystrij dlja skydannja avtomatyzovanykh zasobiv kontrolju nebezpechnykh faktoriv nadzvychajnykh sytuacij z bezpilotnogho litaljnogho aparatu / Andronov V.A., Kalughin V.D., Ljevtjerov O.A., Tjutjunyk V.V., Tjutjunyk Ju.V; Vlasnyk patentu: Nacionaljnyj universytet cyviljnogho zakhystu Ukraïny. – # u201608736; zajavl. 11.08.2016; opubl. 10.03.2017, bjul. # 5. (in Ukrainian)
24. Tuituinyk, V.V., Kalughin, V.D., Ivanecj, Gh.V., Ivanecj, M.Gh. & Zakharchenko, Ju.V. (2016). Ocinka efektyvnosti pokryttja terytoriji nadzvychajnoji sytuaciji za dopomoghoju avtomatyzovanykh prystrojiv kontrolju nebezpechnykh faktoriv pry jikh rozkydanni iz zavysajuchoho nad točkoju skydannja bezpilotnogho litaljnogho aparatu. *Tekhnoghenno-ekologichna bezpeka ta cyviljnyj zakhyst*, 10, 34-43. (in Ukrainian)
25. Ivanecj, Gh.V., Tuituinyk, V.V., Kalughin, V.D., Pospjelov, B.B. & Zakharchenko, Ju.V. (2017). Alghorytm ocinky efektyvnosti pokryttja terytoriji nadzvychajnoji sytuaciji avtomatyzovanykh prystrojamy kontrolju nebezpechnykh faktoriv pry jikh rozkydanni z bezpilotnogho litaljnogho aparatu v umovakh nestabiljnestej povitranogho seredovyssha. *Problemy nadzvychajnykh sytuacij*, 25, 45-56. (in Ukrainian)
26. Andronov, V.A., Divizinjuk, M.M., Kalughin, V.D. & Tuituinyk, V.V. (2016). *Naukovo-konstruktorsjki osnovy stvorennja kompleksnoji systemy monitorynghu nadzvychajnykh sytuacij v Ukraïni*: Monoghrafija. (in Ukrainian)
27. Kalughin, V.D., Tuituinyk, V.V., Chornoghor, L.F. & Shevchenko, R.I. (2013). Rozrobka naukovo-tekhnichnykh osnov dlja stvorennja systemy monitorynghu, poperedzhennja ta likvidaciji nadzvychajnykh sytuacij pryrodnogho ta tekhnoghennogho kharakteru ta zabezpechennja ekologichnoji bezpeky. *Systemy obrobky informaciji*, 9(116), 204-216. (in Ukrainian)
28. Kodeks cyviljnogho zakhystu Ukraïny vid 2 zhovtnja 2012 roku № 5403-VI. (2012). Gholos Ukraïny. (in Ukrainian)
29. Postanova Kabinetu Ministriv Ukraïny vid 9 sichnja 2014 roku № 11 «Pro zatverdzhennja Polozhennja pro Jedynu derzhavnu systemu cyviljnogho zakhystu». Retrieved January 18, 2020, from <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF>. (in Ukrainian)
30. Rozporjadzhennja KMU vid 25 sichnja 2017 r. №61 «Pro skhvalennja Strateghiji reformuvannja systemy Derzhavnoji sluzhby Ukraïny z nadzvychajnykh sytuacij». Retrieved January 18, 2020, from <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/61-2017-%D1%80>. (in Ukrainian)

*The article was received 16.01.2020 and was accepted after revision 03.03.2020*

**Тютюник Вадим Володимирович**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, начальник кафедри управління та організації діяльності у сфері цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України

**Адреса робоча:** Україна, м. Харків, вул. Чернишевська, 94

**e-mail:** tutunik\_v@ukr.net

ORCID ID 0000-0001-5394-6367

**Соболь Олександр Миколайович**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри управління та організації діяльності у сфері цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України

**Адреса робоча:** Україна, м. Харків, вул. Чернишевська, 94

ORCID ID 0000-0002-7133-6519

**Калугін Володимир Дмитрович**

доктор хімічних наук, професор, професор кафедри спеціальної хімії і хімічної технології Національного університету цивільного захисту України

**Адреса робоча:** Україна, м. Харків, вул. Чернишевська, 94

ORCID ID 0000-0002-6899-1010

**Захарченко Юлія Вадимівна**

аспірантка Науково-дослідної установи «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем»

**Адреса робоча:** Україна, м. Харків, вул. Бакуліна, 6

ORCID ID 0000-0003-1978-2818

УДК 532.5; 519

**Dmytro I. Cherniy**, PhD, Associate Professor, Principle Investigator ITGIS NASU  
*e-mail*: Dmytro.Cherniy@gmail.com

Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NASU, Kyiv, Ukraine

## METHOD OF BUILDING A MATHEMATICAL MODEL OF LAYERED FLOWS

**Abstract.** *The method of constructing mathematical models for plane-parallel layered flows is considered. Given that the flow structure implies simplification and splitting of the problem, it is shown that, for planar parallel fluxes, it is possible to construct a layered flow model in which the problem solution is constructed by the method of separating variables. It is shown that for each layer of flow it is possible to distinguish a function whose derivatives determine the velocity distribution in the layer and which can be interpreted as "flow potential in the layer". But the potential representation for the velocity field distribution in a layer has a parametric dependence on a variable that is orthogonal to the plane currents. Although there is a function that can be interpreted as the "potential" of a flow in a layer, the most common layered flow (as a whole) is not potential. Only a stream the averaged of a layer thickness can be considered as a potential flow. When constructing models, the viscosity, non-stationarity and inertia of the flow are taken into account (by taking into account nonlinear dynamic components). It is shown that the mathematical models constructed, of some cases of the stream, represent the classical solutions for layered flows.*

**Key words:** *mathematical models; layered flows*

**Д.І. Черній**

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України,  
м. Київ, Україна

## МЕТОД ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ШАРУВАТИХ ТЕЧІЙ

**Анотація.** *Розглянуто метод побудови математичних моделей для плоскопаралельних шаруватих течій. Враховуючи те, що структура течії припускає спрощення та розщеплення задачі, показано, що для плоскопаралельних в'язких течій можливо побудувати модель шаруватої течії, в якій розв'язок задачі будується методом відокремлення змінних. Показано, що для кожного шару течії можливо виділити функцію, похідні від якої визначають розподіл швидкостей в шарі та яка може трактуватися як «потенціал течії в шарі». Але потенціальне представлення для розподілу поля швидкостей в шарі має параметричну залежність від змінної, яка ортогональна до площини течії. Незважаючи на те, що існує функція, яка може трактуватися як «потенціал» течії в шарі, сама загальна шарувата течія (в цілому) не є потенціальною. В якості потенціальної течії можна розглядати лише течію, осереднену по товщині шару. При побудові моделей враховується в'язкість, нестационарність та інерційність течії (за рахунок врахування нелінійних динамічних складових). Показано, що побудовані математичні моделі в граничних випадках представляють класичні розв'язки для шаруватих течій.*

**Ключові слова:** *математичні моделі; шаруваті течії*

## Вступ

Найбільшу потребу в прогнозі еволюції таких процесів, як поширення забруднень на водній поверхні, масоперенос (з урахуванням забруднень) в обмежених акваторіях під впливом змін гідрологічних і атмосферних умов, відчувають служби, покликані оперативно попереджати розвиток природних і техногенних катастроф та зменшувати / запобігати їх впливу на навколишнє середовище. Таких прогнозів потребують гідрометслужби, служби із запобігання та подолання наслідків надзвичайних ситуацій, установи – проєктанти гідротехнічних споруд, мостобудівники, будівники технологічних споруд, лоцманська служба та інші. Але проблеми, які виникають в акваторіях, мають як різні причини виникнення, так і різні масштаби проявів.

Задля забезпечення роботи прогнозуючих інформаційних систем необхідно, в моделюючому модулі, застосування ефективних математичних моделей, які в реальному масштабі часу здатні враховувати домінуючі фактори процесів. При дослідженні течій в акваторіях, як правило, головний інтерес представляє швидкість, осереднена по товщині шару, а також поверхнева та придонна швидкість. При такому підході доцільно мати математичні моделі шаруватих течій, придатні для комп'ютерних моделюючих та інформаційних систем. В роботі розглянуто метод побудови математичних моделей для плоскопаралельних шаруватих течій. Мета роботи – показати, що структура моделей припускає застосування відокремлення змінних та розщеплення задачі. В побудованих нелінійних моделях враховано в'язкість, нестационарність та інерційність течії. Побудовані математичні моделі в крайніх випадках представляють класичні розв'язки для шаруватих течій.

## Постановки задач та методи досліджень

Розглядається плоскопаралельна течія, яка описується рівняннями Нав'є-Стокса (1), (2). При дослідженні течій в акваторіях, як правило, головний інтерес представляє швидкість, осереднена по товщині шару [1], а також поверхнева та придонна швидкість. При такому підході доцільно розглядати математичні моделі шаруватих течій [2, 3, 4, 5, 6].

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}\nabla)\vec{V} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \vec{F} + \frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{V} \quad (1)$$

$$\nabla \vec{V} = 0. \quad (2)$$

Задача зводиться до визначення розв'язків – моделей плоскопаралельної течії в криволінійному каналі квазіпостійної глибини.

## Аналитичні розв'язки для в'язких шаруватих течій

При розгляді в'язких шаруватих нестационарних течій, паралельних площині  $OXY$ , компонента швидкості  $w$  уздовж осі  $OZ$  (перпендикулярна цій площині) вважається рівною нулю:  $w(x, y, z, t) \equiv 0$ .

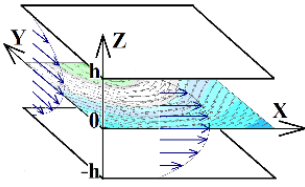


Рис. 1 – Схема шаруватої течії між двох площин

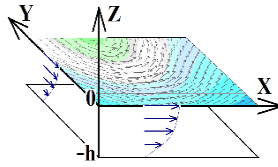


Рис. 2 – Схема шаруватої течії над площиною

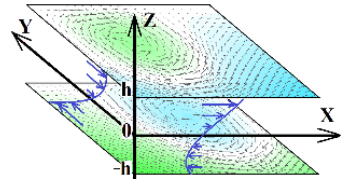


Рис. 3 – Схема плоскопаралельної шаруватої течії

У припущенні про консервативність поля зовнішніх сил вважається, що існує  $U = U(x, y, z)$ , така що  $\vec{F} = \nabla U$ . В цьому випадку рівняння (1), (2) в проєкціях на осі координат записуються у вигляді:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \quad (4)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial U}{\partial z}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (6)$$

Припускається, що при будь-яких  $z$  і  $t$  існує безперервно диференційована функція  $\varphi = \varphi(x, y, z, t)$  така, що для компоненти швидкості  $u(x, y, z, t)$  і  $v(x, y, z, t)$  справедливо:

$$u(x, y, z, t) = \frac{\partial}{\partial x} \varphi(x, y, z, t), \quad v(x, y, z, t) = \frac{\partial}{\partial y} \varphi(x, y, z, t). \quad (7)$$

При таких припущеннях, рівняння (3) і (4) можуть бути представлені у виді:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right) + \frac{p}{\rho} - U - \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) \right\} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right) + \frac{p}{\rho} - U - \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) \right\} = 0 \quad (9)$$

При підстановці (7) в (6) стає видно, що функція  $\varphi = \varphi(x, y, z, t)$  є гармонійною, при будь-яких фіксованих  $z$  і  $t$

$$\frac{\partial^2 \varphi(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi(x, y, z, t)}{\partial y^2} = 0. \quad (10)$$

Тому, в силу (10), для (8) і (9) справедливо:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right) + \frac{p}{\rho} - U - \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) \right\} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right) + \frac{p}{\rho} - U - \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) \right\} = 0. \quad (12)$$

В результаті, при зробленому припущенні (7), в силу (10) з рівнянь (11), (12) отримуємо інтеграл руху:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right) + \frac{p}{\rho} - U(x, y, z) - \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = q(z, t). \quad (13)$$

Де деяка функція  $q(z, t)$  є залежною тільки від  $t$  при будь-якому фіксованому  $z$  і визначається з вхідних даних завдання.

Проінтегроване рівняння (5) має вигляд:

$$p = \rho U(x, y, z) + P(x, y, t). \quad (14)$$

При підстановці (15) в (14) маємо:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varphi(x, y, z, t) + \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial}{\partial x} \varphi(x, y, z, t) \right)^2 + \left( \frac{\partial}{\partial y} \varphi(x, y, z, t) \right)^2 \right) + \frac{P(x, y, t)}{\rho} - \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \varphi(x, y, z, t) = q(z, t). \quad (15)$$

### Стационарні шаруваті течії

Стационарні повільні шаруваті течії (повзучі течії) [2], паралельні площині  $OXY$ , характеризуються умовою  $\frac{\partial}{\partial t} = 0$  та нехтуванням доданком

$\left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2$ , внаслідок чого (15) набуде вигляду звичайного

диференціального рівняння другого порядку (відносно похідної по  $z$ ):

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \varphi(x, y, z) = \frac{P(x, y)}{\mu} - \frac{\rho}{\mu} q(z). \quad (16)$$

Двічі проінтегрувавши (16) по  $z$ , отримуємо

$$\varphi(x, y, z) = \frac{z^2}{2\mu} P(x, y) + z\varphi_1(x, y) + \varphi_0(x, y) - \frac{\rho}{\mu} Q(z), \quad (17)$$

де  $\varphi_0 = \varphi_0(x, y)$  і  $\varphi_1 = \varphi_1(x, y)$  – функціональні коефіцієнти, а для останнього доданку у правій частині (7.17) справедливо:

$$q(z) = \frac{\partial^2}{\partial z^2} Q(z). \quad (18)$$

Для визначення в (17) значень функціональних коефіцієнтів  $\varphi_0 = \varphi_0(x, y)$  і  $\varphi_1 = \varphi_1(x, y)$  необхідно задати крайові умови: наприклад, значення функцій  $\varphi = \varphi(x, y, z)$  на границях шару  $z = \pm h$   $\varphi_{\pm h} = \varphi(x, y, \pm h, t)$ , або їх похідні. Для в'язких рідин зазвичай задаються значення швидкостей на границях шару, відомі з умови прилипання на рухомих і нерухомих границях.

Будемо розглядати оператор  $\nabla_{xy}$  як діючий тільки у площині  $Oxy$ , тому компоненти вектора швидкості  $u(x, y, z)$  і  $v(x, y, z)$  представимо у вигляді похідних  $(u(x, y, z), v(x, y, z)) = \nabla_{xy}\varphi(x, y, z)$ , або інакше:

$$\vec{V}(x, y, z) = \nabla_{xy}\varphi(x, y, z). \quad (19)$$

Різні крайові умови будуть визначати функціональні коефіцієнти та різні розв'язки задач.

### Стационарна шарувата повзуча течія між двома нерухомими паралельними площинами (аналог течії Пуазейля)

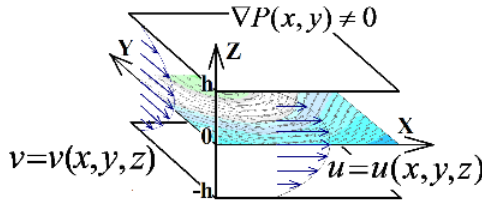


Рис. 4 – Схема шаруватої течії між двох площин

У задачі про стаціонарну шарувату повзучу течію між двома нерухомими паралельними площинами крайові умови прилипання для швидкостей визначаються, як у (19), після застосування оператора  $\nabla_{xy}$  до (17):

$$\nabla_{xy}\varphi(x, y, z) = \frac{z^2}{2\mu} \nabla_{xy}P(x, y) + z\vec{V}_1(x, y) + \vec{V}_0(x, y), \quad (20)$$

де  $\vec{V}_0$  і  $\vec{V}_1$  – векторні функції (двовимірні), не залежні від  $z$ .

$$\vec{V}_0(x, y) = \nabla_{xy}\varphi_0(x, y), \quad (21)$$

$$\vec{V}_1(x, y) = \nabla_{xy}\varphi_1(x, y). \quad (22)$$

Граничні умови прилипання на площинах, при  $z = \pm h$ :

$$(u, v)|_{z=\pm h} = \nabla_{xy}\varphi|_{z=\pm h} = (0,0). \quad (23)$$

Підстановка у (21) граничних умов (24) призводить до системи лінійних рівнянь для визначення векторних функцій  $\vec{V}_0$  і  $\vec{V}_1$  :

$$\nabla_{xy}\varphi(x, y, h) = \frac{h^2}{2\mu} \nabla_{xy}P(x, y) + h\vec{V}_1(x, y) + \vec{V}_0(x, y) = (0,0), \quad (25)$$

$$\nabla_{xy}\varphi(x, y, -h) = \frac{h^2}{2\mu} \nabla_{xy}P(x, y) - h\vec{V}_1(x, y) + \vec{V}_0(x, y) = (0,0). \quad (26)$$

Із системи рівнянь (7.25), (7.26) для  $\vec{V}_0$  і  $\vec{V}_1$  отримуємо вирази:

$$\vec{V}_0 = -\frac{h^2}{2\mu} \nabla_{xy}P(x, y) \quad (27)$$

$$\vec{V}_1 = (0,0). \quad (28)$$

Підстановка (27) і (28) у (20) надає часткове рішення, з симетричним по осі OZ профілем швидкості:

$$(u, v) = \nabla_{xy}\varphi(x, y, z) = -\frac{h^2}{2\mu} \nabla_{xy}P(x, y) \left(1 - \frac{z^2}{h^2}\right). \quad (29)$$

В силу (27) і (28), для значень функціональних коефіцієнтів  $\varphi_0 = \varphi_0(x, y)$  і  $\varphi_1 = \varphi_1(x, y)$  справедливо:

$$\varphi_0(x, y) = -\frac{h^2}{2\mu} P(x, y) + C_0 \quad (30)$$

$$\varphi_1 = C_1 = Const - \quad (31)$$

Підстановка (7.30) і (7.31) у (7.18) дає часткове рішення виду:

$$\varphi(x, y, z) = -\frac{h^2}{2\mu} P(x, y) \left(1 - \frac{z^2}{h^2}\right) + zC_1 + C_0 - \frac{\rho}{\mu} Q(z). \quad (32)$$

Граничні умови прилипання на нерухомих площинах призводять до постійності значень потенціалу на кожній із цих площин:

$$\text{при } z = -h: \quad \varphi(x, y, -h) = -hC_1 + C_0 - \frac{\rho}{\mu} Q(-h) = C_{-h} = Const; \quad (33)$$

$$\text{при } z = h: \quad \varphi(x, y, h) = hC_1 + C_0 - \frac{\rho}{\mu} Q(h) = C_h = Const. \quad (34)$$

дозволяють визначити константи  $C_0$  і  $C_1$ .



$$C_0 = \frac{1}{2}(\varphi(x, y, h) + \varphi(x, y, -h)) + \frac{\rho}{2\mu}(Q(h) + Q(-h)); \quad (35)$$

$$C_1 = \frac{1}{2h}(\varphi(x, y, h) - \varphi(x, y, -h)) + \frac{\rho}{2\mu h}(Q(h) - Q(-h)). \quad (36)$$

Підстановка отриманих коефіцієнтів у (32) призводить до виразу для потенціалу

$$\phi(x, y, z) = -\frac{h^2}{2\mu}P(x, y)\left(1 - \frac{z^2}{h^2}\right) + \frac{1}{2}\left(\phi(x, y, h) + \frac{\rho Q(h)}{\mu}\right)\left(1 + \frac{z}{h}\right) +$$

$$+ \frac{1}{2}\left(\phi(x, y, -h) + \frac{\rho Q(-h)}{\mu}\right)\left(1 - \frac{z}{h}\right) - \frac{\rho}{\mu}Q(z)$$

$$\text{або} \\ \phi(x, y, z) = -\frac{h^2}{2\mu}P(x, y)\left(1 - \frac{z^2}{h^2}\right) + \frac{1}{2}\left(C_h + \frac{\rho Q(h)}{\mu}\right)\left(1 + \frac{z}{h}\right) + \frac{1}{2}\left(C_{-h} + \frac{\rho Q(-h)}{\mu}\right)\left(1 - \frac{z}{h}\right) - \frac{\rho}{\mu}Q(z). \quad (38)$$

З (36) видно, що коефіцієнт  $C_1$  породжує несиметрію відносно площини  $z = 0$  у виразі для потенціалу (37). При рівності постійних значень функцій  $\varphi(x, y, z)$  і  $Q(z)$  на обох границях (умова симетрії течії)

$$\varphi(x, y, h) = \varphi(x, y, -h) = C_h, \quad Q(z) = Q(-z) \quad (39)$$

для констант  $C_0$  і  $C_1$  справедливо:

$$C_0 = C_h + \frac{\rho}{\mu}Q(h), \quad C_1 = 0. \quad (40)$$

Вираз для потенціалу (39) істотно спрощується:

$$\phi(x, y, z) = -\frac{h^2}{2\mu}P(x, y)\left(1 - \frac{z^2}{h^2}\right) + C_h + \frac{\rho}{\mu}(Q(h) - Q(z)). \quad (41)$$

В силу умов симетрії (39), для екстремального (при  $z = 0$ ) значення потенціалу виходить:

$$\phi_{\max}(x, y) = \phi(x, y, 0) = -\frac{h^2}{2\mu}P(x, y) + C_h + \frac{\rho}{\mu}(Q(h) - Q(0)), \quad (42)$$

або інакше

$$\phi_{\max}(x, y) = \phi(x, y, 0) = -\frac{h^2}{2\mu}P(x, y) + \text{Const}_1. \quad (43)$$

Для усередненого по товщині шару значення потенціалу виходить:

$$\bar{\phi}(x, y) = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h \phi(x, y, z) dz = -\frac{1}{2h} \int \frac{h^2}{2\mu} P(x, y) \left(1 - \frac{z^2}{h^2}\right) dz + \frac{1}{2h} \int_{-h}^h Const_1 dz \quad (44)$$

$$\bar{\phi}(x, y) = -\frac{h^2}{3\mu} P(x, y) + Const_2. \quad (45)$$

Таким чином, з (43), (45) випливає, що поля швидкостей для максимального і усередненого по товщині шару відповідають течіям із заданими потенціалами (43), (45), що є класичним рішенням для течії Hele-Shaw [2].

З (29) випливає, що в шарі швидкості приймають найбільші значення при  $z = 0$

$$(u_{\max}, v_{\max}) = \nabla_{xy} \phi(x, y, 0) = -\frac{h^2}{2\mu} \nabla_{xy} P(x, y), \quad (46)$$

а осереднені по товщині шару значення швидкості

$$(\bar{u}, \bar{v}) = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h \nabla_{xy} \phi(x, y, z) dz = -\frac{1}{2h} \int_{-h}^h \frac{h^2}{2\mu} \nabla_{xy} P(x, y) \left(1 - \frac{z^2}{h^2}\right) dz = -\frac{h^2}{3\mu} \nabla_{xy} P(x, y). \quad (47)$$

Значення  $Const_1$  і  $Const_2$  у (43) і (45) визначаються з (7.41):

$$Const_1 = C_h + \frac{\rho}{\mu} (Q(h) - Q(0)) \quad (48)$$

$$Const_2 = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h \left( C_h + \frac{\rho}{\mu} (Q(h) - Q(z)) \right) dz. \quad (49)$$

**Стационарна шарувата повзуча течія між двома паралельними площинами. Течія викликається рухом дотичних швидкостей в площині однієї з меж (аналог течії Куета) і заданим градієнтом тиску в площині течії**

Задача про знаходження рішення для шаруватої повзучої течії над нерухомою площиною, із заданим розподілом дотичних швидкостей на верхній межі при заданому градієнті тиску  $\nabla P(x, y) \neq 0$  (рис. 2), зводиться до знаходження функціональних коефіцієнтів  $\varphi_0(x, y)$ ,  $\varphi_1(x, y)$ , для функції  $\varphi = \varphi(x, y, z)$ , представленої у вигляді (17), з граничними умовами прилипання до нерухомої і рухомої границь – паралельним площинам (при  $z = 0$  і при  $z = h$ , рис. 2).

Вираз для швидкостей в шарі визначається через похідні від представлення (17) і має вигляд:

$$\nabla_{xy} \varphi(x, y, z) = \frac{z^2}{2\mu} \nabla_{xy} P(x, y) + z \bar{V}_1(x, y) + \bar{V}_0(x, y), \quad (50)$$

з умовами прилипання:

$$(u, v)|_{z=0} = \nabla_{xy} \varphi(x, y, 0) = (0, 0) \text{ при } z = 0, \quad (51)$$

$$(u, v)|_{z=h} = \nabla_{xy} \varphi(x, y, h) = \vec{V}_h(x, y) \text{ при } z = h. \quad (52)$$

При підстановці в (50) в крайові умови (51) і (52) отримуємо систему лінійних рівнянь щодо визначення  $\vec{V}_1$  і  $\vec{V}_0$  векторних функцій:

$$\vec{V}_0 = (0, 0), \quad \text{при } z = 0; \quad (53)$$

$$\frac{h^2}{2\mu} \nabla_{xy} P + h\vec{V}_1 + \vec{V}_0 = \vec{V}_h(x, y), \text{ при } z = h. \quad (54)$$

Рішення для векторних функцій  $\vec{V}_0$  і  $\vec{V}_1$  має вигляд:

$$\vec{V}_0 = (0, 0), \quad (55)$$

$$\vec{V}_1 = \frac{1}{h} (\vec{V}_h(x, y) - \frac{h^2}{2\mu} \nabla_{xy} P(x, y)). \quad (56)$$

При підстановці отриманих векторних функцій  $\vec{V}_0$  і  $\vec{V}_1$  в (50) маємо розв'язок вигляду

$$(u, v) = \nabla_{xy} \varphi(x, y, z) = \frac{z}{h} \vec{V}_h(x, y) - \frac{h^2}{2\mu} \nabla_{xy} P(x, y) \frac{z}{h} \left(1 - \frac{z}{h}\right). \quad (57)$$

У випадку, коли поле швидкостей  $\vec{V}_h(x, y)$  при  $z = h$  допускає потенціал  $\Phi = \Phi(x, y)$ , такий, що  $\vec{V}_h(x, y) = \nabla_{xy} \Phi(x, y)$ , розв'язок (57) може бути представлений у вигляді:

$$(u, v) = \nabla_{xy} \varphi(x, y, z) = \nabla_{xy} \left( \frac{z}{h} \Phi(x, y) - \frac{h^2}{2\mu} P(x, y) \frac{z}{h} \left(1 - \frac{z}{h}\right) \right). \quad (58)$$

Причому, при  $z = h$ , видно, що  $\Phi(x, y) \equiv \varphi(x, y, h) + const$ .

З (46), за умови  $z = 0$ , впливає, що

$$\varphi_0(x, y) = C_0 = Const. \quad (59)$$

З (47), за умови  $z = h$ , впливає, що

$$\varphi_1(x, y) = \frac{1}{h} (\varphi(x, y, h) - \frac{h^2}{2\mu} P(x, y)) + C_1, \quad (60)$$

в силу чого

$$\varphi(x, y, z) = -\frac{h^2}{2\mu} P(x, y) \frac{z}{h} \left(1 - \frac{z}{h}\right) + \frac{z}{h} (\varphi(x, y, h) + C_1) + C_0 - \frac{\rho}{\mu} Q(z). \quad (61)$$

У припущенні, що поверхнева течія потенційна

$$\vec{V}_h(x, y) = \nabla_{xy} \varphi(x, y, h), \quad (62)$$

розв'язок (58) може бути представлений у вигляді:

$$(u, v) = \nabla_{xy} \varphi(x, y, z) = \nabla_{xy} \left( \frac{z}{h} \varphi(x, y, h) - \frac{h^2}{2\mu} P(x, y) \frac{z}{h} \left(1 - \frac{z}{h}\right) \right). \quad (63)$$

У такому разі, для усередненого по шару руху,

$$(\bar{u}, \bar{v}) = \frac{1}{h} \int_0^h \nabla_{xy} \varphi(x, y, z) dz = \frac{1}{h} \int_0^h \nabla_{xy} \left( \frac{z}{h} \varphi(x, y, h) - \frac{h^2}{2\mu} P(x, y) \frac{z}{h} \left(1 - \frac{z}{h}\right) \right) dz. \quad (64)$$

видно, що значення усереднених по шару швидкостей визначається рухом на поверхні шару

$$(\bar{u}, \bar{v}) = \frac{1}{h} \int_0^h \nabla_{xy} \varphi(x, y, z) dz = \frac{1}{2} \vec{V}_h(x, y) + \frac{h^2}{12\mu} \nabla_{xy} P(x, y), \quad (65)$$

або

$$(\bar{u}, \bar{v}) = \frac{1}{h} \int_0^h \nabla_{xy} \varphi(x, y, z) dz = \nabla_{xy} \left( \frac{1}{2} \varphi(x, y, h) + \frac{h^2}{12\mu} P(x, y) \right). \quad (66)$$

А усереднений по шару «потенціал течії» [21–25, 27] визначається поверхневим потенційним перебігом та розподіленням тисків у вигляді

$$\bar{\varphi}(x, y) = \frac{1}{h} \int_0^h \varphi(x, y, z) dz = \frac{h^2}{6\mu} P(x, y) + \frac{1}{2} \left( \varphi(x, y, h) - \frac{h^2}{2\mu} P(x, y) + C_1 \right) + C_3 \quad (67)$$

або

$$\bar{\varphi}(x, y) = \frac{1}{h} \int_0^h \varphi(x, y, z) dz = \frac{1}{2} \varphi(x, y, h) - \frac{h^2}{12\mu} P(x, y) + \frac{1}{2} C_1 + C_3, \quad (68)$$

де

$$C_3 = \frac{1}{h} \int_0^h \left( C_0 + \frac{\rho}{\mu} Q(z) \right) dz. \quad (69)$$

## Нестационарні шаруваті течії

Розглядається нестационарна шарувата повзуча течія між двома нерухомими паралельними площинами. Вважається, що течія викликається градієнтом тиску. Для випадку повільної нестационарної шаруватої течії рівняння (15) набуде вигляду

$$\frac{\partial}{\partial t} \varphi(x, y, z, t) = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \varphi(x, y, z, t) + q(z, t) - \frac{P(x, y, t)}{\rho}. \quad (70)$$

Або, в термінах рівняння для швидкостей  $(u, v) = \nabla_{xy} \varphi$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \nabla_{xy} \varphi(x, y, z, t) &= \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \nabla_{xy} \varphi(x, y, z, t) - \frac{\nabla P(x, y, t)}{\rho} \\ \frac{\partial}{\partial t} \vec{V}(x, y, z, t) &= \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \vec{V}(x, y, z, t) - \frac{\nabla P(x, y, t)}{\rho} \end{aligned} \quad (71)$$

з граничними умовами прилипання на площинах

$$\text{при } z = \pm h: \quad \vec{V} \Big|_{z=\pm h} = (u, v) \Big|_{z=\pm h} = \nabla_{xy} \varphi = (0, 0). \quad (72)$$

Наслідком яких буде

$$\text{при } z = h: \quad \varphi(x, y, h, t) = C_{+h}(t) \quad (73)$$

$$\text{при } z = -h: \quad \varphi(x, y, -h, t) = C_{-h}(t) \quad (74)$$

при однакових значеннях при  $z = \pm h: \varphi(x, y, h, t) = \varphi(x, y, -h, t) = \text{Const}(t)$ . (75)

З початковими умовами :

$$\text{при } t = 0: \varphi(x, y, z, 0) = \Phi(x, y, z) = -\frac{h^2}{2\mu} P(x, y) \left( 1 - \frac{z^2}{h^2} \right) + zC_1 + C_0 - \frac{\rho}{\mu} Q(z), \quad (76)$$

$$\text{чи } P(x, y, 0) = P(x, y), \varphi(x, y, z, 0) = \Phi(x, y, z) = -\frac{h^2}{2\mu} P(x, y, 0) \left( 1 - \frac{z^2}{h^2} \right) + zC_1 + C_0 - \frac{\rho}{\mu} Q(z). \quad (77)$$

З початковими умовами в термінах для швидкостей  $(u, v) = \nabla_{xy} \varphi$ :

При  $t = 0$ :

$$\vec{V} \Big|_{t=0} = \vec{V}(x, y, z, 0) = (u(x, y, z, 0), v(x, y, z, 0)) \Big|_{t=0} = \nabla_{xy} \Phi(x, y, z) = \frac{h^2}{2\mu} \nabla_{xy} P(x, y, 0) \left( \frac{z^2}{h^2} - 1 \right). \quad (78)$$

Розв'язок початково-крайової задачі для параболічного рівняння має представлення у вигляді:

$$\vec{V}(x, y, z, t) = (u(x, y, z, t), v(x, y, z, t)) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{h} \int_{-h}^h \vec{V}(x, y, \xi, 0) \sin \frac{\pi n}{h} \xi d\xi \right) e^{-\left(\frac{\pi \sqrt{\mu}}{h \sqrt{\rho}}\right)^2 t} \sin \frac{\pi n}{h} z +$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{h \rho} \int_0^t \int_{-h}^h \nabla_{xy} P(x, y, \tau) e^{-\left(\frac{\pi \sqrt{\mu}}{h \sqrt{\rho}}\right)^2 (t-\tau)} \sin \frac{\pi n}{h} \xi d\xi d\tau \right) \sin \frac{\pi n}{h} z$$

Або

$$\vec{V}(x, y, z, t) = (u(x, y, z, t), v(x, y, z, t)) = \frac{h^2}{2\mu} \nabla_{xy} P(x, y, 0) \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{h} \int_{-h}^h \left( \frac{\xi^2}{h^2} - 1 \right) \sin \frac{\pi n}{h} \xi d\xi \right) e^{-\left(\frac{\pi \sqrt{\mu}}{h \sqrt{\rho}}\right)^2 t} \sin \frac{\pi n}{h} z$$

$$\vec{V}|_{t=0} = \vec{V}(x, y, z, 0) = (u(x, y, z, 0), v(x, y, z, 0))|_{t=0} = \nabla_{xy} \Phi(x, y, z) = \frac{h^2}{2\mu} \nabla_{xy} P(x, y, 0) \left( \frac{z^2}{h^2} - 1 \right).$$

**Нестационарна шарувата повзуча течія між двома паралельними площинами. Течія викликається дотичним рухом в площині однієї з меж (рис. 5)**

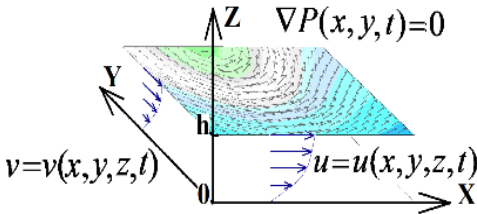


Рис. 5 – Схема шаруватої течії між двох площин

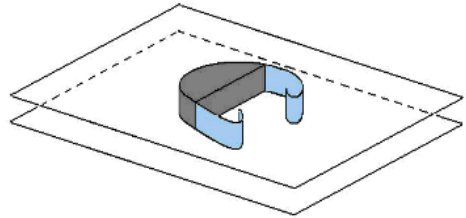


Рис. 6 – Схема шаруватої течії над площиною з перешкодою

Для нестационарних, швидкісних плоскопаралельних шаруватих течій рівняння (15) надає можливість поставити задачу:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - \frac{1}{2} \left( \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right) - \frac{P(x, y, t)}{\rho} + q(z, t),$$

з граничними умовами прилипання на границях

$$(u, v)|_{z=0} = \nabla_{xy} \varphi(x, y, 0, t) = (0, 0),$$

$$(u, v)|_{z=h} = \nabla_{xy} \varphi(x, y, h, t) = \vec{V}_h(x, y, t),$$

$$\text{і початковими умовами } t = 0: \quad \varphi(x, y, z, 0) = \Phi(x, y, z).$$

Доцільно зазначити, що в загальному випадку, функція  $\varphi = \varphi(x, y, z, t)$  має залежність від  $z$  – глибини шару. Тому, будемо вважати, що вона може бути представлена у вигляді

$$\varphi = \varphi(x, y, z, t) = \phi(x, y, t) Z(z).$$

Враховуючи (85), рівняння (81) набуває вигляду звичайного диференціального рівняння (з похідними відносно  $z$ ) для функції  $Z = Z(z)$ :

$$Z \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\mu}{\rho} \phi \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} - \frac{Z^2}{2} \left( \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right) - \frac{P(x, y, t)}{\rho} + q(z, t) \quad (86)$$

з крайовими умовами прилипання на межах:

$$\text{при } z = 0: Z(0) = 0 \quad (87)$$

$$\text{при } z = h: Z(h) = 1 \quad (88)$$

та додаткової задачі для функції  $\phi = \phi(x, y, t)$  з параметром  $t$ :

$$\Delta \phi = 0, \text{ в } D^+. \quad (89)$$

$$\text{З крайовими умовами на бокових межах } \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \text{ на } L_d, \quad (90)$$

$$\int_A^B (\nabla \phi, n) ds = Q \quad \text{на } AB, \quad (91)$$

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|^+ = \left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|^-, \quad \frac{\partial \phi^+}{\partial t} + \frac{|\nabla \phi^+|^2}{2} = \frac{\partial \phi^-}{\partial t} + \frac{|\nabla \phi^-|^2}{2} \text{ на } L_v, \quad (92)$$

та початковими умовами при  $t = t_0$ :

$$L_d(t_0) = L_{d0}, \quad L_v(0) = L_{v0}, \quad \phi^+ \Big|_{t=0} = \phi_0^+. \quad (93)$$

$$\text{З обмеженням на клас функцій } |\nabla \phi^+| < \infty. \quad (94)$$

У багатьох випадках [5, 6, 7, 9], для вирішення плоскої задачі про нестационарне обтікання непроникних, рухомих зі швидкостями  $\vec{W}_d$  і  $\vec{W}_v$  границь – контурів  $L_d(t)$  і  $L_v(t)$ , в деформованій області  $D(t)$ , використовується математична модель (з параметричною залежністю від часу  $t$ , яка в термінах ТФКЗ має інтегральні представлення):

$$\Phi(z, t) = \phi(x, y, t) + i\psi(x, y, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{L_d(t)} \gamma(\omega, t) \ln(z - \omega) d\omega + \frac{1}{2\pi i} \int_{L_v(t)} \gamma(\omega, t) \ln(z - \omega) d\omega, \quad (95)$$

$$\bar{V}(z, t) = u(x, y, t) - iv(x, y, t) = \frac{\partial \Phi(z, t)}{\partial z} = \frac{1}{2\pi i} \int_{L_d(t)} \frac{\gamma(\omega, t)}{z - \omega} d\omega + \frac{1}{2\pi i} \int_{L_v(t)} \frac{\gamma(\omega, t)}{z - \omega} d\omega, \quad (96)$$

$$\Gamma_0 = \int_{L_d(t)} \gamma(\omega, t) d\omega + \int_{L_v(t)} \gamma(\omega, t) d\omega = const. \quad (97)$$

В силу мінливості області із заздалегідь невідомою формою частини границь, рішення конкретної задачі про нестационарне обтікання непроникних рухомих меж можливо тільки чисельними методами.

Для лінійної залежності від  $z$ , доданок з похідною по  $z$  у (15) пропадає і інтеграл набирає «вигляду інтеграла Коші-Лагранжа», але із  $const(z, t)$ , залежною від часу і шару. При усереднюванні інтеграла (86) по товщині шару виходить інтеграл Коші-Лагранжа, справедливий для «деякого усереднення по OZ» течії. Отриманий інтеграл може бути використаний при постановках початково-крайових задач (для розривних в площині OXZ, але шаруватих по OZ течій в'язкої рідини), для вирішення яких можливе використання МДО. Отриманий результат демонструє можливість реалізації нестационарних і циркуляційних режимів в шаруватих течіях.

## Висновки

Розглянуто метод побудови математичних моделей для плоскопаралельних шаруватих течій. Показано, що структура моделей припускає застосування відокремлення змінних та розщеплення задачі.

За припущенням шаруватості течії отримано інтеграл (15), який, у випадку невязкої течії, зводиться до інтегралу Коші-Лагранжа.

Постановки задач з використанням даного рівняння для шаруватої течії, з припущенням стаціонарності та малої швидкості руху, в залежності від крайових умов, призводять до класичних розв'язків: течії Пуазейля, течії Hele-Shaw, течії Куета.

При усереднюванні інтеграла (15) по товщині шару буде отримано інтеграл Коші-Лагранжа, справедливий для «деякого усереднення по OZ» течії. Отриманий інтеграл може бути використаний при постановках початково-крайових завдань (для розривних в площині OXZ, але шаруватих по OZ течій в'язкої рідини), для вирішення яких можливе застосування теорії граничних інтегральних рівнянь.

Метод побудови математичних моделей базується на відокремленні змінних та розщепленні задач по незалежних змінних. В побудованих нелінійних моделях враховано в'язкість, нестационарність та інерційність течії. Побудовані математичні моделі в граничних випадках представляють класичні розв'язки для шаруватих течій.

Отримані результати демонструють можливість побудови математичних моделей без нехтування конвективними доданками та здатні враховувати нестационарні та циркуляційні режими в течіях, подібних течіям Хіл-Шоу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Иванов В.А. Математическое моделирование динамических процессов в зоне море - суша. / В.А. Иванов, В.В. Фомин // Севастополь, НВЦ «ЕКОСИ-Гідрофізика»-2008., 363 с.
2. Шкадов В.Я. Течения вязкой жидкости. / В.Я. Шкадов, З.Д. Запryanov // М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984 г. – 200 с.
3. Черний Д.И. Математическая модель течения в мелководной акватории. / Д.И. Черний // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна



- Серія «Мат. моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління», Вип. 29, Харків, 2016, С. 78–86.
4. Черний Д.И. Экспериментальное и математическое моделирование слоистых течений в плоском канале. / Д.И. Черний, А.А. Воскобойник, В.А. Воскобойник // Тези науково-практичної конференції «Комп'ютерна гідромеханіка», м. Київ, 29-30 вересня 2016 р., Інститут гідромеханіки НАН України, С. 68–69.
  5. Kordas O. A study on mathematical short-term modelling of environmental pollutant transport by sea currents: The Lagrangian approach / O. Kordas, A. Gourjii, E. Nikiforovich, D. Cherniy // *Journal of Environmental Accounting and Management*. – 2017. – Vol. 5, N 2. – p. 87–104 (DOI: 10.5890/JEAM.2017.06.002).
  6. Довгий С.А. Метод сингулярных интегральных уравнений и вычислительные технологии. / С.А. Довгий, И.К. Лифанов, Д.И. Черний // К.: Издательство «Юстон» 2016, 380 с.
  7. Довгий С.О. Алгоритмы метода дискретных особенностей для обчислювальних технологій. / С.О. Довгий, С.І. Ляшко, Д.І. Черний // *Кибернетика и системный анализ*. 2017, №6, С. 147–159.
  8. Cherniy D. The Vortex Model of a Viscid Wall's Layer / D. Cherniy, S. Dovgiy, V. Meleshko // *IUTAM Symposium on "Vortex Dynamics: Formations, Structure and Function"*, Abstract Book, March 10(Sun)-14(Thu), 2013, Centennial Hall, Kyushu University School of Medicine, Fukuoka, Japan, pp. 126–127.
  9. Voskoboinick V.A. The modeling of different scale hydrologic processes in aquatories. / V.A. Voskoboinick, O.A. Voskoboinyk, D.I. Cherniy // *Environmental safety and natural resources*. – V. 29. – 2019. – pp. 87–97. DOI:10.32347/2411-4049.2019.1.87-98

Стаття надійшла до редакції 23.01.2020 і прийнята до друку після рецензування 03.03.2020

## REFERENCES

1. Ivanov, V.A., & Fomin, V.V. (2008). *Mathematical modeling of dynamic processes in the sea - land*. Sevastopol: National Exhibition Center "EKOSI-Gidrofizika". (in Russian)
2. Schkadov, V., Zaprianov, Z. (1984). *Techenie vjazkoy jidkosty*. Moscow.: Izd. MSU. (in Russian)
3. Cherni, D.I. (2016). Mathematical model of the flow in the shallow water area. *Bulletin of Kharkiv National University of V.N. Karazina, Seriya "Mat. fashion model. Informacion technology. Automation Systems Management"*, (29), 78-86. (in Ukrainian)
4. Cherniy, D.I., Voskoboynik, V.A., & Voskoboynik, O.A. (2016). Experimental and mathematical modeling of layered flows in a flat channel. *Abstracts of Papers. Naukovo-practical conference "Comp'yuterna gidromekhanika"*. Kyiv, September 29–30, 2016. (pp. 68-69). Kyiv: Institute of gidromekhaniki NAN Ukraine. (in Ukrainian)
5. Kordas, O., Gourjii, A., Nikiforovich, E., & Cherniy, D. (2017). A study on mathematical short-term modelling of environmental pollutant transport by sea currents: The Lagrangian approach. *Journal of Environmental Accounting and Management*, 5(2), 87-104 (DOI: 10.5890/JEAM.2017.06.002).
6. Dovgy, S.A., Lifanov, I.K., & Cherniy, D.I. (2016). The method of singular integral equations and computational technologies. Kyiv: Euston Publishing House. (in Russian).
7. Dovgiy, S.O., Lyashko, S.I., & Cherniy, D.I. (2017). Algorithms of Discrete Singularities Method of Computational Technologies. *Cybernetics and System Analysis*, (6), 147-159. (in Ukrainian).
8. Cherniy, D., Dovgiy, S., & Meleshko, V. (2013). The Vortex Model of a Viscid Wall's Layer. *Abstracts of Papers. IUTAM Symposium on "Vortex Dynamics: Formations, Structure and Function"*, Fukuoka, Japan, March 10–14, 2013. (pp. 126-127). Fukuoka: Centennial Hall, Kyushu University School of Medicine.

9. Voskoboinick, V., Voskoboinyk, O., & Cherniy, D. (2019). The modeling of different scale hydrologic processes in aquatories. *Environmental Safety And Natural Resources*, 29(1), 87-98. doi:<http://dx.doi.org/10.32347/2411-4049.2019.1.87-98> (in Ukrainian)

*The article was received 23.01.2020 and was accepted after revision 03.03.2020*

**Черній Дмитро Іванович**

кандидат фізико-математичних наук, доцент, провідний науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

**Адреса робоча:** 03186, Україна, м. Київ-186, Чоколівський бульвар, 13

**e-mail:** Dmytro.Cherniy@gmail.com

© Авторські і суміжні права належать авторам окремих публікацій, Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київському національному університету будівництва і архітектури.

© Авторские и смежные права принадлежат авторам отдельных публикаций, Институту телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины, Киевскому национальному университету строительства и архитектуры.

Copyring © authors of publications, Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv National University of Construction and Architecture. All rights reserved.

## ДО УВАГИ АВТОРІВ ЗБІРНИКА

Зміст матеріалів, що направляються до редакції, повинен відповідати профілю та науково-технічному рівню збірника.

Кожна наукова стаття повинна мати вступ, розділи основної частини та висновки, а також анотацію і ключові слова (не менше п'яти) трьома мовами (українською, російською та англійською).

Підготовка статті здійснюється в текстовому редакторі MS WORD for WINDOWS, з використанням шрифту Times New Roman, Суг, кегль 11, одинарний інтервал, полями 2,0 см з кожного боку, заданим розміром сторінок 17x26 см.

Усі формули мають бути набрані в редакторі MathType.

Люстрації повинні обов'язково нумеруватися, мати книжкову орієнтацію і не можуть перевищувати за розміром задану сторінку (параметри сторінки 17x26 см з полями 2,0 см). Перелік літературних джерел перекладається англійською мовою (або транслітерується в романському алфавіті) і подається відповідно до міжнародного стандарту оформлення наукових публікацій **APA (American Psychological Association) style** загальним списком у кінці статті за чергою посилань у тексті.

Наприкінці статті наводиться коротка довідка про авторів, де вказуються прізвище, повне ім'я та по батькові авторів, науковий ступінь, вчене звання, посада, назва підрозділу (кафедри) та організації, особисті дані кожного з авторів (адреса, місто, країна, контактний телефон, e-mail), ORCID ID.

Обов'язково слід надати електронну версію статті в редакторі Microsoft Word.

Усі представлені в редакцію рукописи проходять ретельне багатоланкове рецензування відповідними фахівцями за профілем статті. Якщо сумарна оцінка рецензентів менша за встановлений поріг, рукописи відхиляються.

Зміст статті та якість написання або перекладу (українською або англійською мовами) переглядаються коректорами збірника, проте відповідальність за зміст та якість статті несуть автори матеріалу. До статті можуть бути внесені зміни редакційного характеру без згоди автора.

Розділ збірника, до якого буде віднесена стаття, визначається редакцією, узгоджується – головним редактором або його заступником. Остаточний висновок щодо публікації матеріалів схвалює редакційна колегія збірника.

Електронна версія збірника, правила оформлення та вимоги до статей містяться в Інтернеті на сайті <http://www.es-journal.in.ua>, який систематично оновлюється.

Збірник наукових праць також представлений на сайті Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського, на сайті Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України <http://itgip.org/> у розділі «Видавнича діяльність» та на сайті бібліотеки Київського національного університету будівництва і архітектури <http://library.knuba.edu.ua/node/883>.

*Редактор – В.П. Берчун*

---

Надруковано в ТОВ «Видавництво «Юстон»  
01034, м. Київ, вул. О. Гончара, 36а.  
Тел.: (044) 360-22-66  
[www.yuston.com.ua](http://www.yuston.com.ua)

**Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру  
видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції  
серія дк № 497 від 09.09.2015 р.**

---

Підписано і здано до друку 16.03.2020. Формат 70x108/16. Папір офсетний.  
Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 10.21  
Обл.-вид. арк.10.7  
Замовлення № \_\_\_\_\_

Тираж 300 примірників

---

КИЇВ 2020