

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Київський національний університет
будівництва і архітектури**

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

**Інститут телекомунікацій
і глобального інформаційного простору**

Екологічна безпека та природокористування

Environmental safety and natural resources

Збірник наукових праць

ВИПУСК 38

2021

**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 2 (38), квітень-червень 2021 р.

Заснований у 2008 р.
Виходить 4 рази на рік

Academic journal

Issue 2 (38), April-June 2021

Founded in 2008
The journal is published 4 volume a year

КИЇВ 2021

KYIV 2021

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор: О.М. Трофимчук, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАНУ
Заступник головного редактора: О.С. Волошкіна, д-р техн. наук, проф.

Члени редколегії:

Биченок М.М., д-р техн. наук
Бойко І.П., д-р техн. наук, проф.
Довгий С.О., д-р фіз.-мат. наук, проф., академік НАНУ
Калюх Ю.І., д-р техн. наук, проф.
Качинський А.Б., д-р техн. наук, проф.
Коржнєв М.М., д-р геол.-мін. наук, проф.
Кочетов Г.М., д-р техн. наук, проф.
Кривомаз Т.І., д-р техн. наук, проф.

Олійник О.Я., д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАНУ
Павлишин В.І., д-р геол.-мін. наук, проф.
Приймак О.В., д-р техн. наук, проф.
Рудько Г.І., д-р техн. наук, д-р геол.-мін. наук, д-р геогр. наук, проф.
Триснюк В.М., д-р техн. наук
Яковлев Є.О., д-р техн. наук

МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА РАДА

М.-Й. Валері, професор, Польща
Н. Касаглі, професор, Італія
Н. Маргвелашвілі, PhD, Австралія
Д. Мінтер, професор, Великобританія
А. Мішо, дослідник, Франція

М.Г. Мустафаєв, д-р аграрних наук, член-кор. РАЕ, Азербайджан
Я. Пекутін, професор, Польща
Пінг Лу, професор, Китай
Г. Собчук, професор, Польща

Рекомендовано до друку Вченою радою
Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України
(протокол № 8 від 04.06.2021 р.)

Збірник наукових праць включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія "Б"), 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 02.07.2020 № 886)

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

Пиріков О.В., Чумаченко С.М., Яковлєв Є.О. Аналіз чинників формування еколого-техногенних і соціальних загроз безпеці життєдіяльності у вуглепромисловій зоні Донбасу.....	5
Олійник О.Я., Телима С.В., Калугін Ю.І., Олійник Є.О. Обґрунтування методів розрахунку вилучення азоту (нітрифікація) в біореакторах з використанням біоплівкових моделей.....	18
Хрутьба В.О., Нікітченко Ю.С., Крюковська Л.І., Лук'янова В.В., Спасіченко О.В. Шляхи зниження екологічних ризиків шлакових відвалів металургійних комбінатів, Україна.....	39
Ishchenko V. Assessment of spent batteries streams in Ukraine.....	55

ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Кривомаз Т.І., Савченко А.М. Адаптація секторів міського розвитку до кліматичних змін.....	64
Триснюк В.М., Шумейко В.О., Голован Ю.М. Механізм визначення кількісних характеристик рівня концентрації забруднюючих речовин викидами автомобільного транспорту.....	79
Мітрясова О.П., Приходько А.С. Визначення залежності між кліматичними чинниками і захворюваністю на Covid-19.....	94

ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ ТА СИСТЕМИ

Лебідь О.Г. П'ятимодова квазілінійна модель нелінійної динаміки протяжної системи.....	104
Триснюк Т.В. Система мобільного екологічного моніторингу Дністра: моделювання технічної системи гідроресурсів та екстремальних паводків.....	121
Адаменко О.М., Мосюк М.І., Качала С.В., Радловська К.О. Пошуки нових місцезнаходжень фауни волохатих носорогів та мамонтів на території Старунського Парку Льодовикового періоду на Прикарпатті	129
ДО ВІДОМА АВТОРІВ.....	139

CONTENTS

ENVIRONMENTAL SAFETY

Pyrikov O.V., Chumachenko S.M., Yakovlev Ye.O. Analysis of formation of ecological-technogenic and social threats of life safety in the coal industry zone of Donbass.....	5
Oliynyk O.Ya., Telyma S.V., Kalugin Yu.I., Oliynyk Ye.O. Substantiation of the calculation methods of the nitrogen removing (nitrification) in bioreactors with using on the biofilm models.....	18
Khrutba V.O., Nikitchenko Y.S., Kriukovska L.I., Lukianova V.V., Spasichenko O.V. Ways of reduction of environmental risks of slag heaps of metallurgical enterprises, Ukraine.....	39
Ishchenko V. Assessment of spent batteries streams in Ukraine.....	55

NATURAL RESOURCES

Kryvomaz T.I., Savchenko A.M. The adaptation of city development sectors to climate change.....	64
Trysnyuk V.M., Shumeiko V.O., Holowan Yu.M. Mechanism to determine quantitatively characterize the level of concentration of pollutants emissions road transport.....	79
Mitryasova O.P., Pryhodko A.S. Determination of the dependence between climatic factors and Covid-19 disease incidence.....	94

INFORMATION RESOURCES AND SYSTEMS

Lebid O.G. Five-mode quasilinear model of nonlinear dynamics of extended system.....	104
Trysnyuk T.V. Mobile environmental monitoring system of the Dniester: modeling of technical system of hydro resources and extreme floods.....	121
Adamenko O.M., Mosiuk M.I., Kachala S.V., Radlowska K.O. Prospects for new sites of woolly rhinoceros and mammoths on the territory of paleontological site in Starunia, Carpathian region.....	129
INFORMATION FOR AUTHORS.....	139

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ENVIRONMENTAL SAFETY

UDC 504.064.2

Oleksii V. Pyrikov¹, PhD
e-mail: 0506463222av@gmail.com

Sergii M. Chumachenko², Dr, Professor of Department of Information System
ORCID ID 0000-0002-8894-4262, *e-mail*: s_chum@ukr.net

Yevhenii O. Yakovlev³, Dr, Chief Scientist Specialist
ORCID ID 0000-0001-6934-618X, *e-mail*: yakovlevhydro@gmail.com

¹ The Foundation of development of environmental and energy markets NGO, Kyiv, Ukraine

² National University of Food Technology, Kyiv, Ukraine

³ Institute of Telecommunication and Global Information Space of NASU, Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF FORMATION OF ECOLOGICAL-TECHNOGENIC AND SOCIAL THREATS OF LIFE SAFETY IN THE COAL INDUSTRY ZONE OF DONBASS

Abstract. *The article considers the need to form an information-analytical complex of natural-technogenic geosystem (NTGS) of Donbass "regional technogenic complex – environment" as a tool base for building a model of ecological and economic development. Donbass (area up to 5.8 thousand km² with a population of more than 4 million people) is a technogenic-geological system (TGS) ("regional technogenic complex – geological environment"). In addition, there are more than 4,000 potentially dangerous objects within the PTGS of Donbass. The predominance of regional irreversible changes in the ecological parameters of the geological environment as the main "depot" of the technogenesis effects (deformation of the earth's surface, geochemical pollution of landscapes, surface and groundwater, biodiversity loss, etc.) necessitates the preservation of its ecological resources for further socio-economic recovery of the Donbass region. Comparison of the impact of natural resource potential of the geological environment (GS) of Donbass and the Chernobyl Exclusion Zone showed the fundamental importance of balancing the interaction of the lithosphere with the surface hydrosphere, near-surface atmosphere and biosphere for the formation of socio-economic parameters and safety of life activity. Flooding of coal mines and rising of groundwater level to surface are the critical ecological factors of post-mining situation within Donbas. The performed analysis of ecological and technogenic parameters of NTGS of mining areas within Donbass also showed that in case of further increase in the number of flooded mines, advanced scientific development of maximum allowable changes in the environment is necessary. It is also noted that all selected tools for the formation of life safety should have a clear justification of socio-economic and environmental-technological parameters. All this should provide an opportunity to assess the efficiency of the ecological and economic system, methods of its construction and possible forecasting.*

Key words: *life safety; geological media; environment; dangerous exogenous geological processes*

О.В. Пиріков¹, С.М. Чумаченко², Є.О. Яковлєв³

¹ ГО «Фундація розвитку екологічних та енергетичних ринків», м. Київ, Україна

² Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна

³ Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

АНАЛІЗ ЧИННИКІВ ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГО-ТЕХНОГЕННИХ І СОЦІАЛЬНИХ ЗАГРОЗ БЕЗПЕЦІ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ У ВУГЛЕПРОМИСЛОВІЙ ЗОНІ ДОНБАСУ

***Анотація.** У статті розглядається необхідність формування інформаційно-аналітичного комплексу природно-техногенної геосистеми (ПТГС) Донбасу “регіональний техногенний комплекс – навколишнє природне середовище” як інструментальної бази для побудови моделі еколого-економічного розвитку. При цьому враховано, що провідною еколого-ресурсною складовою ПТГС вуглепромислової зони Донбасу (площа до 5.8 тис км² з населенням понад 4 млн людей) є техногенно-геологічна система (ТГС) “регіональний техногенний комплекс – геологічне середовище”. Крім того, в межах ПТГС Донбасу розташовано понад 4000 потенційно-небезпечних об’єктів, просторова щільність яких втричі перевищує середній показник по Україні. Переважання регіональних незворотних змін екологічних параметрів геологічного середовища як головного “депо” наслідків впливу факторів техногенезу (порушення рівноваги надр, деформації земної поверхні, геохімічне забруднення ландшафтів, поверхневих і підземних вод, скорочення біорізноманіття і ін.) обумовлюють необхідність збереження його еколого-ресурсного потенціалу для подальшого соціально-економічного відновлення регіону Донбасу. Порівняння впливу природно-ресурсного потенціалу геологічного середовища (ГС) Донбасу та Чорнобильської зони відчуження засвідчило фундаментальне значення рівноваги взаємодії літосфери з поверхневою гідросферою, приземною атмосферою та біосферою для формування соціально-економічних параметрів та безпеки життєдіяльності населення. Виконаний аналіз еколого-техногенних параметрів ПТГС гірничо-добувних районів Донбасу також засвідчив, що за умови подальшого збільшення кількості шахт, що затоплюються, є необхідною випереджаюча наукова розробка гранично-припустимих змін навколишнього природного середовища (НПС). Також зазначено, що усі обрані інструментарії формування безпеки життєдіяльності повинні мати чітке обґрунтування соціально-економічних та еколого-технологічних параметрів. Все це повинно надавати можливість для оцінки працездатності еколого-економічної системи, методів її побудови та можливого прогнозування.*

***Ключові слова:** безпека життєдіяльності; геологічне середовище; довкілля; небезпечні екзогенні геологічні процеси*

DOI: 10.32347/2411-4049.2021.2.5-17

Вступ

Тривалий термін видобутку вугілля (понад 150 років), великі площі порушення рівноваги надр (до 15 000 км²), об’єми вилучення вугілля й порід (9,5–10,0 млрд м³) та витоків вибухонебезпечного метану (до 6 млрд м³/рік) за умов просторового розподілу до 4000 потенційно небезпечних об’єктів (хімічних, металургійних та ін.) створили нестійку природно-техногенну

геосистему (ПТГС) “техногенний комплекс – навколишнє природне середовище”, провідним елементом якої є техногенно-геологічна система (ТГС) “техногенний комплекс – геологічне середовище”. Ця ТГС внаслідок некерованого закриття й затоплення великої кількості шахт (до 90 об’єктів за попередніми даними) переходить у нестійкий, нерівноважний стан ураженості комплексом небезпечних процесів і критичних змін екологічного стану геологічного середовища (ГС).

За попередніми оцінками відбуваються додаткові осідання й деформації денної поверхні (до 0.25–0.50 м/рік) в межах значної кількості промислово-міських агломерацій вуглепромислового регіону, підтоплення й затоплення земель та територій міст і селищ, забруднення підземних і поверхневих водозаборів.

Військові чинники впливу на сучасному етапі (артилерійські обстріли (в тому числі з ракетних систем залпового вогню)), геохімічне забруднення ландшафтів, порушення енергопостачання, шахтного водовідливу й вентиляції шахт, соціальні напруження), як свідчать результати моніторингових обстежень [1, 4], суттєво пришвидшують процеси негативних незворотних змін навколишнього природного середовища (НПС) і погіршення соціальних та економічних параметрів безпеки життєдіяльності (БЖД) населення на регіональному та транскордонному рівні.

Виклад основного матеріалу дослідження

На сьогоднішній день є багато експертних та аналітичних матеріалів з оцінками й прогнозами наслідків комплексного впливу екологічно незбалансованого затоплення шахт та збройного конфлікту на Донбасі: насамперед військових, геополітичних, економічних, соціальних і різноманітних екологічних – щодо стану біосфери, заповідних територій, забрудненості поверхневих вод і приземної атмосфери внаслідок вибухів, руйнувань промислових об’єктів, критичної інфраструктури тощо. При цьому підкреслюється соціально-економічна важливість збереження гірничодобувного комплексу Донбасу, тому що відповідно до усереднених статистичних даних один шахтар вугільної шахти формує роботу 7–10 працівників на поверхні, а втрата 1% ВВП Донбасу еквівалентна скороченню 2,2–2,5% ВВП в інших регіонах України [1, 2]. На жаль, при цьому майже не звертають уваги на те, що Донбас, навіть у порівнянні з Рурським басейном (Німеччина), – найбільший у світі вуглепромисловий комплекс (табл. 1), у межах якого за 150 років індустріальної історії відбулися комплексні регіональні порушення як екологічних параметрів стану ГС, так і геодинамічного режиму геологічних структур: надр, рівноваги рельєфу, тектонічних систем, рівнів, напрямів потоків і хімічного складу та джерел формування підземних вод, геохімічного складу ландшафтів [1, 2, 4, 6].

Крім того, як засвідчують численні дослідження (проф. В.Д. Бабушкін, проф. Г.І. Рудько, проф. М.М. Коржнев, акад. НАНУ В.М. Шестопапов, чл.-кор. НАНУ А.В. Анциферов, чл.-кор. НАНУ О.М. Трофимчук, проф. А.В. Лушик, д.т.н. В.М. Єрмаков, д.т.н. О.В. Луньова, канд. геол.-мінерал. наук Г.Г. Лютий, М.І. Беседа та ін.), на період повномасштабного розвитку гірничодобувного району Донбасу його ГС значною мірою перетворилося на головне “депо” більшості техногенних викидів та механічних, фізичних

і хімічних впливів на складові довкілля (приземна атмосфера, поверхнева і підземна гідросфера, ґрунти, верхня зона літосфери тощо).

Таблиця 1 – Порівняння природно-техногенних геосистем (ПТГС)
“вуглепромисловий комплекс – навколишнє природне середовище”
Руру (Німеччина) та Донбасу (Україна)

Назва вугільних басейнів	Площа вуглепромислових територій, км ²	Кількість діючих шахт	Число працюючих шахтарів, тис.
Рур	5200	146	607
Донбас	6200	227	Понад 500

Загалом промислова розробка кам'яного вугілля призвела до необоротних порушень геодинамічної та гідродинамічної рівноваги регіону й суттєво підвищила чутливість ГС до впливу військових чинників збройного конфлікту. Тим часом, комплексні оцінки впливу техногенних і військових чинників на зміни ГС Донбасу в межах його вуглепромислового комплексу дають змогу дійти висновку про новий стан геологічних структур та їх нерівноважну взаємодію з техно- і гідросферою, а також приземною атмосферою [2, 6–9].

Техногенні порушення природних умов тут переважно зумовлені накопиченим просторово-часовим впливом гірничих робіт, які виконувалися майже на 900 шахтах по 180 вугільних пластів переважно на територіях, що прилеглі до переважної більшості місцевих промислово-міських агломерацій, враховуючи містоутворюючий характер вугільних шахт (табл. 2).

Таблиця 2 – Сукупні дані про порушеність вугледобувними роботами геологічного середовища міст і селищ Донбасу

№ з/п	Адміністративні області (кількість вуглепромислових міст і селищ)	Сукупна площа (орієнтовно на 2010 р.), км ²	
		Міст і селищ над гірничими виробками (потенційного просідання й підтоплення)	Фактичного підтоплення міст і селищ у зонах впливу затоплення шахт
1	Донецька (31)	783,2	53,7
2	Луганська (28)	202,5	22,2
Усього:		985,7	75,9

Усього в межах вугленосних геологічних структур нараховують приблизно 2 250 пласторозробок, що суттєво зменшило їхню геомеханічну стійкість під час затоплення та фонових землетрусів (до 4–5 балів за шкалою МСК-64). За майже повсюдного застосування способу керування покрівлею вироблених вугільних пластів через її повне обвалення, об'єм порушених гірських порід становив орієнтовно 600 млрд м³, тобто до 15% від загального об'єму гірського масиву в межах шахтних полів [2, 3].

Створена природно-техногенна геосистема (ПТГС) регіону “техногенні об'єкти – навколишнє середовище”, де мешкало до 7 млн населення (нині до 4,4 млн осіб), охоплювала до 4 000 потенційно небезпечних об'єктів (ПНО),

понад 300 шахт і кар'єрів та 2,5 тис. так званих “копанок” (неліцензійних неглибоких вугледобувних шурфів), до 1 300 териконів, з яких понад 300 горять і є стабільними джерелами забруднення токсичними елементами та сполуками приземної атмосфери, прилеглих ландшафтів і ґрунтових вод (див. табл. 2). Окрім того, за умов зменшення останніми роками шахтного водовідливу (орієнтовно до 2-3 разів) і збільшення площ підтоплення зростає ризик прискореного горіння териконів та їхнього вибухання з руйнівним впливом на прилеглі житлові та промислові об'єкти [2–4].

На нашу думку, потребує також оцінювання небезпека забруднення провідних складових навколишнього середовища (поверхневих і підземних вод, ґрунтів, об'єктів природно-заповідного фонду тощо), що пов'язана з довгостроковою експлуатацією понад 1,5 тис. фільтрувальних накопичувачів токсичних і забруднених стоків загальною площею 102 км². Новим зростаючим чинником хімічного забруднення, територіальної деградації і руйнування природних ландшафтів є небезпечні сполуки від **хімічних та металічних викидів, що утворюються** під час артилерійських обстрілів, щільність яких за даними аналізу матеріалів ДЗЗ може сягати до 60–70 вибухових воронок на 1 км².

Критичний екологічний вплив на гідрогеомеханічні умови ГС (фільтраційна компресія, механічна й хімічна суфозія та ін.), порушення режиму поверхневої та підземної гідросфери були зумовлені щорічним водоприпливом у гірничі виробки шахт до 760 млн м³ (24,5 м³/сек) забруднених мінералізованих шахтних вод (з вмістом до 2,5 млн т/рік водорозчинних солей). На практиці, за час зростання площі вугледобувних робіт і порушень ГС, зокрема регіональних водотривів, просторового розвитку техногенної тріщинуватості з порушенням річкових русел (понад 600 випадків) обсяг місцевих ресурсів підземного стоку збільшився до 5 разів [1, 2]. Отже, за умов досягнутого рівня техногенної взаємодії поверхневого й підземного стоку скорочення в умовах збройного конфлікту шахтного водовідливу впливатиме на прискорення затоплення шахт, прилеглих земель, міст і селищ [1, 2, 4].

Аналіз даних поточного екологічного моніторингу та виконані у 2015–2017 рр. експедиційні обстеження місцевих джерел водопостачання (Центр гуманітарного діалогу, ОБСЄ, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, НДІ цивільного захисту ДСНС) засвідчили, що вищезазначені чинники негативно вплинули на водно-екологічні параметри транскордонного стоку р. Сіверський Донець (2–3-кратне збільшення мінералізації, концентрацій небезпечних хімічних та органічних сполук), який за умов збройного конфлікту є провідним джерелом питно-господарського водопостачання (до 80–85%), узбережжя Азовського моря, поверхневих і підземних водозаборів.

Виконаний аналіз просторово-часового впливу чинників збройного конфлікту на прискорення процесу зняття шахт з експлуатації (Інститути НАН України, УкрДГРІ та ДНВП “Геоінформ” Держгеонадра та ін.) за схемою “мокрої консервації” (простого автореабілітаційного затоплення внаслідок зупинки водовідливу) з перетіканням вод і вибухонебезпечних газів до робочих шахт показав загрозу ланцюгового (синергічного) розвитку комплексу нових небезпечних процесів:

1) ризики аварійних водо-газоприпливів до експлуатованих гідравлічно пов'язаних шахт, зокрема внаслідок руйнування міжшахтних захисних ціликів (держпідприємства “Лисичанськвугілля” та “Первомайськвугілля” Луганської обл., “Торецьквугілля” Донецької обл. та ін.);

2) додаткові осідання й зрушення денної поверхні з ризиком руйнівних деформацій будівель, шляхів, інженерних мереж критичної інфраструктури тощо;

3) додатковий розвиток площ підтоплення й затоплення прилеглих земель, міст і селищ; враховуючи, що більшість шахт є містоутворюючими, масштаб наслідків може мати катастрофічний характер;

4) незворотне забруднення підземних і поверхневих водних об'єктів та питно-господарських водозаборів на їх основі;

5) прискорення руху забруднюючих речовин внаслідок підтоплення й затоплення полігонів токсичних і побутових відходів;

6) розширення площ техногенних землетрусів (підземних гідрогеомеханічних поштовхів і деформацій порід).

Негативний вплив на безпеку життєдіяльності буде пов'язаний переважно з успадкованими порушеннями ГС, тому що до початку конфлікту більшість міст і селищ, особливо наближених до шахт і кар'єрів, перебували в небезпечному інженерно-геотехнічному стані внаслідок підтоплення (до 70%) і деформацій житлових і промислових будівель. Здебільшого це зумовлено аномальними втратами води й тепла (до 50–70% і більше) з 59 000 км водопровідно-каналізаційних і теплоенергетичних мереж та підніманням рівнів підземних вод під час затоплення прилеглих (містоутворюючих) шахт і кар'єрів (табл. 1).

З даних табл. 1. випливає, що перед початком військових дій із робочих шахт із загальною площею шахтних полів 4,9 тис. км² понад 20% з них перебували під забудовою в межах території 63 міст і 91 селища міського типу; при цьому було підроблено відповідно 25 і 51% їхньої площі [1, 2].

Тому ризики некерованих в умовах збройного конфлікту зупинки шахтного водовідливу призведуть до істотного збільшення площ активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів (НЕГП): осідань денної поверхні з руйнівними деформаціями житлових і промислових будівель та об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ) – інженерних мереж, залізниці, нафто-, газопроводів та ін., розширення площ підтоплення й затоплення, активізації зсувоутворення.

Еколого-геологічна небезпека бойових дій в регіональній ПТГС Донбасу істотно підсилюється такими її характеристиками:

1) містоутворюючий характер більшості вугільних шахт і потенційно-небезпечних об'єктів (ПНО);

2) зношеність критичного обладнання більшості ПНО перевищує 70%, що збільшує вразливість життєзабезпечуючих та інженерних систем (порушення енерго-, тепло-, водопостачання, функціонування нафто-, газопроводів тощо);

3) перебування великої кількості житлових і промислових будівель у старому та аварійному стані за умови втрати води й тепла з водопровідно- та теплоенергетичних мереж до 60–70% і більше, що в разі їх істотної кородованості й підтоплення формує загрозу численних ситуацій, як, наприклад, трапилось в Алчевську (морозне руйнування зовнішніх і

внутрішньодомових мереж з наступними деформаціями будівельних конструкцій, зменшення міцності фундаментів, шляхів, мостів та ОКІ).

Незворотні еколого-геологічні та соціально-економічні небезпеки для населення зони впливу військових дій та прилеглих територій можуть виникнути внаслідок руйнування захисного водовідливу Микитівського ртутного рудника, екологічно незбалансованого затоплення шахти “Юнком” з камерою атомного вибуху (квітень 2018 р.), забруднених високотоксичними сполуками гірничих виробок шахт поблизу проммайданчика Горлівського хімзаводу та некерованих витоків забруднених вод з численних (2,5–3,0 тис.) просторово розосереджених “копанок” (шурфів стихійного видобутку вугілля). Крім того, додаткові небезпеки руйнівних деформацій житлових і промислових комплексів можуть спровокувати техногенні землетруси під час прискороного затоплення шахт унаслідок накопичення потенційної енергії та розвитку гідрогеомеханічних поштовхів за деформацій породного масиву в зонах гірничих робіт (Стаханов, Краснодон, Дзержинськ, 2002–2009 рр.)

Але найбільші просторово-часові екологічні небезпеки варто пов’язувати із суцільним порушенням гірничими виробками вугленосних порід і розвинутих у них водотривів, які екранували витoki солоних глибинних вод разом з вибухонебезпечними та токсичними газами [3, 4]. Під час затоплення шахт міцність порушених порід зменшиться, збільшиться площа просідання поверхні з додатковим підтопленням і затопленням прилеглих міст і селищ, розпочнеться довгострокова міграція забруднених шахтних вод у підземні й поверхневі водозабори.

Загалом, як засвідчують дослідження фахівців з проблем параметризації воєнно-техногенних загроз і ризиків для навколишнього середовища (НС) (проф. О.І. Лисенко, д.т.н. С.М. Чумаченко, проф. Г.В. Лисиченко, проф. О.М. Трофимчук, проф. А.Б. Качинський, проф. І.С. Романченко, проф. М.М. Коржнев, д.т.н. С.П. Іванюта, д.т.н. В.М. Єрмаков, к.т.н. В.В. Бігун, к.т.н. В.Ф. Гречанінов та ін.), необоротні порушення за умов збройного конфлікту складних ПТГС “ПНО – НС”, “ОКІ – НС” або “військова ПТГС – НС” доцільно виділити як самостійні “території критичного стану інженерної інфраструктури (ТКС II)”.

Підсумовуючи результати досліджень з вищезазначеної проблеми (акад. В.І. Лялько, чл.-кор. М.О. Попов, акад. В.М. Шестопалов, проф. А.В. Лущик, к.т.н. Г.Г. Стрижельчик, к.т.н. В.А. Соколов, к.г.-м.н. Н.Г. Люта та ін.), можна дійти висновку щодо дворівневої структури формування ТКС II та еколого-геологічних ризиків у зоні проведення ООС (АТО):

1) **сценарний або пошуково-оцінювальний**, пов’язаний з відповіддю на запитання “Що відбудеться, якщо...?”;

2) **інженерно-нормативний** – “Що треба зробити, щоб БЖД була на належному рівні?”.

Пошук відповіді на друге запитання є дуже складною проблемою на сьогодні, бо в зоні бойових дій чинники їх еколого-техногенного впливу мають практично непрогнозований характер, в той час коли на прилеглих територіях майже зруйновано систему екологічного моніторингу. Можна сказати, що життєдіяльність населення й військового персоналу в зоні впливу бойових дій відбувається в умовах “екологічної сліпоти”. На жаль, аналіз публікацій з екологічних проблем Донбасу засвідчив, що в спеціальній екологічній літературі поки що переважають підходи до оцінки розмірів порушення

природного середовища, зокрема концентрацій шкідливих речовин, переважно в біотичних складниках екосистеми. Водночас в умовах Донбасу переважно екологічна безпека ГС визначає рівень БЖД як за умов інтенсифікації збройного конфлікту, так і на період мирної реструктуризації вугледобувного комплексу регіону [2, 4].

Для отримання екологічної інформації останнім часом широко використовують найсучасніші методи моніторингових спостережень за станом природного середовища, навіть із застосуванням космічних засобів. Саме завдяки цим методам вдалося оцінити провідні регіональні чинники реального руйнування біосфери в південно-східному регіоні України.

Проте до цього часу ще не розроблено загальноприйнятого універсального методу оцінювання впливу бойових дій на довкілля в умовах техногенно-порушених ландшафтів вуглевидобувного регіону.

Виконаний протягом 2015-2018 рр. аналіз зменшення величин та хімічного складу сумарного шахтного водовідливу як індикатора стану регіональної гідрогеофільтраційної системи Донбасу засвідчив, що загалом некероване (аварійне) закриття численних шахт вже призводить до необоротної втрати геологічним середовищем своїх стабілізуючих еколого-захисних функцій і перетворення Донбасу на екологічно фрагментований регіон з переважанням територій, небезпечних для життєдіяльності людей. Щодо цього показовим є зіставлення екологічно-захисних функцій геологічного середовища в зонах аварійного впливу Чорнобильської АЕС і затоплення шахт (див. табл. 3).

Таблиця 3 – Провідні еколого-геологічні чинники впливу масового закриття вугледобувних шахт Донбасу

Види впливу закриття шахт на геологічне середовище	Склад еколого-геологічних чинників впливу закриття шахт	Просторово-часова стійкість еколого-геологічних чинників впливу закриття шахт
Ландшафтно-геохімічні	Геохімічне поліелементне забруднення ландшафтів	Регіональне довгострокове порушення геохімічних ландшафтів
Літосферний: геомеханічні порушення рівноваги надр	Порушення внаслідок просідань, техногенного тріщиноутворення	Незворотні деформації поверхні та породного масиву
Гідрологічний: критичні зміни режиму та якості поверхневого стоку	Регіональне забруднення поверхневого стоку та водозборів	Уповільнена стабілізація еколого-ресурсних параметрів поверхневих водних об'єктів
Гідрогеологічний: критичні зміни рівнів та хімічного складу підземних вод	Автореабілітаційне підвищення рівнів підземних вод з розвитком підтоплення і затоплення земель	Скорочення площ формування прісних підземних вод, зростання уразливості забруднення водоносних горизонтів
Газогеохімічний: активізація висхідної міграції вибухонебезпечних та токсичних газів	Насичення верхньої зони літосфери та приземної атмосфери вибухонебезпечними та токсичними газами	Довгострокове збільшення витоків вибухонебезпечних та токсичних газів у приземний шар атмосфери

Продовження таблиці № 3

Види впливу закриття шахт на геологічне середовище	Склад еколого-геологічних чинників впливу закриття шахт	Просторово-часова стійкість еколого-геологічних чинників впливу закриття шахт
Інженерно-геологічний: регіональне порушення геомеханічної та динамічної рівноваги підстилаючих порід	Зростання водонасичення породного масиву, зниження міцності порід, активізація небезпечних геологічних процесів	Зменшення несучої здатності порід фундаментів, збільшення ураженості геологічними процесами
Інженерно-сейсмологічний: сейсотехногенні струшування породного масиву	Зниження інженерно-сейсмогеологічної стійкості породного масиву (на 1-3 бали)	Збільшення сейсмічності при транзитних землетрусах до 1-3 балів, ризик довгострокової додаткової активізації зсувів, осідань і зрушень денної поверхні, руйнівних деформацій інженерних споруд

Сучасне зростання комплексної техногенно-екологічної, економічної та соціальної небезпеки Донбасу неабиякою мірою пов'язане зі скороченням за період конфлікту шахтного водовідливу з 2,0 млн м³/добу (до 2010 р.) до 1,1 млн м³/добу й менше (у 2013–2018 рр.), що зумовлено як безпосереднім впливом бойових дій на енергопостачання та технологічні шахтні комплекси, так і щораз збільшуваним скороченням вугледобутку, зокрема на нерентабельних шахтах, більшість яких є містоутворюючими та моносировинною базою життєдіяльності населення Донбасу.

За умов потенційного територіального впливу підтоплення внаслідок затоплення шахт на площі з населенням 3,5 млн людей і середнього терміну автореабілітаційного затоплення (“мокрої консервації”) шахт, що становить 10–15 років, це дає змогу за консервативною схемою оцінити орієнтовну кількість людей, безпека життєдіяльності яких буде критичною (на рівні “екологічних біженців”):

$$N = \frac{3,5 \times 10^6}{(10 \times 15) \times (2,2 \times 10^6 \div 1,4 \times 10^6)} = 150 \text{ч} \div 230 \text{ тис. люд/рік}$$

Одночасно за умов територіального піднімання рівнів підземних вод, зокрема і мінералізованих, до критичних глибин (< 3-4 м від поверхні) у межах раніше сформованих площ осідання (до 90% від сумарної товщини видобутих вугільних шарів) прискориться процес додаткових (вторинних) осідань і горизонтальних зрушень поверхні, небезпечних деформацій житлових і промислових комплексів, нафто-, газо- і продуктопроводів, ділянок залізниці, ПНО та ОКІ.

Враховуючи те, що оцінювання рівнів впливу закриття шахт на геологічне середовище досить важко формалізувати через відсутність повного переліку аналітичних складових, авторами запропоновано розробити експертний метод на базі інформаційно-аналітичної системи [5]. Для оцінювання запропоновано наступну ієрархічну систему критеріїв і чинників, що наведена на рис. 1 (а). Результати оцінювання наведено на рис. 1 (б).

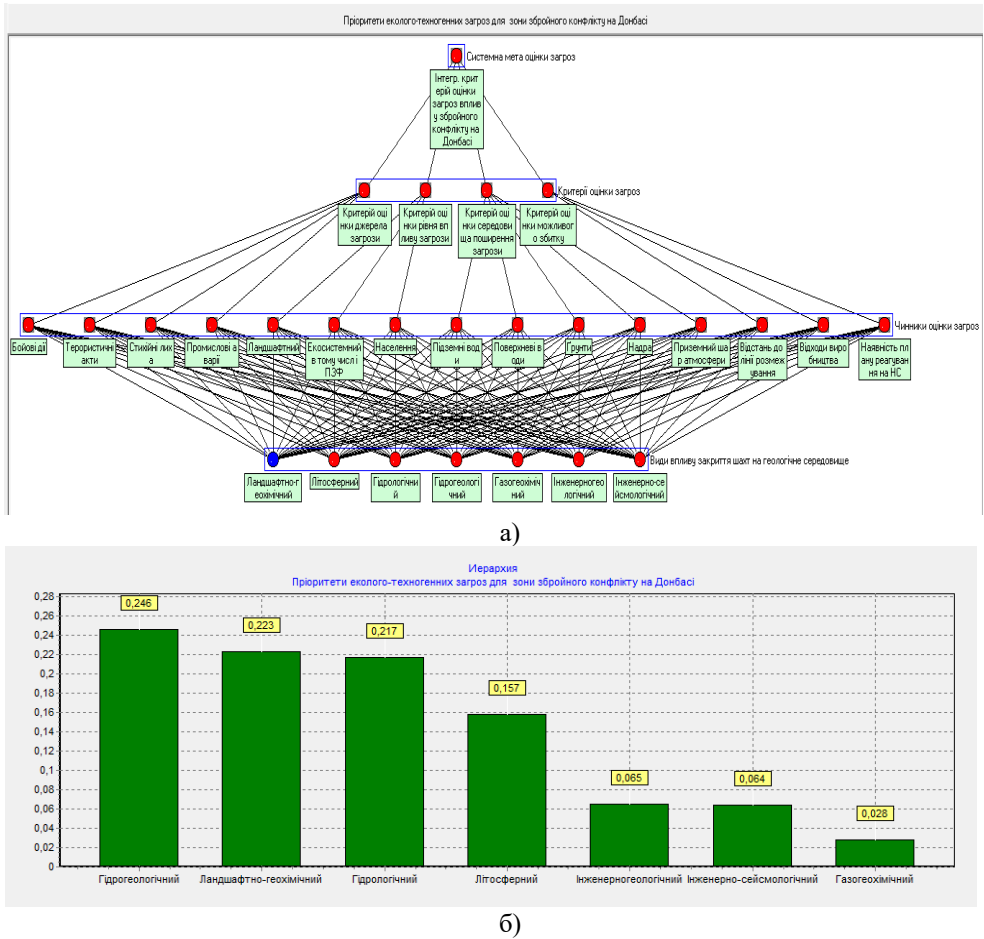


Рис. 1 – Ієрархічна система критеріїв і чинників для оцінювання рівнів впливу закриття шахт на геологічне середовище (а) та результати оцінювання (б)

Варто вже тепер взяти до уваги, що більшість процесів, пов'язаних з некерованим затопленням гірничошахтного простору численних шахт і так званих "копанок" (до 2500 об'єктів), матиме ланцюговий і навіть синергічний характер.

Як приклад можна навести такі послідовності [1, 2]:

– втрата енергопостачання – затоплення насосних установок шахт – зупинка гірничо-добувних робіт – некероване піднімання рівня води до денної поверхні – підтоплення (затоплення) ПНО (ОКІ);

– руйнування інженерно-технологічного комплексу шахти – розвиток небезпечних деформацій вуглепородного масиву (геологічного середовища) шахтного поля – небезпечний вплив на прилеглі міста й селища (просідання, зсуви, руйнування інженерних, водопровідно-каналізаційних і теплоенергетичних мереж тощо).

Тому, інтегруючи думки провідних фахівців-екологів України (акад. В. М. Шестопалова, акад. В.І. Лялька, проф. В.Я. Шевчука, проф. В.С. Мішенка, проф. А.Б. Качинського, чл.-кор. НАНУ О.М. Трофимчука, проф. М.М. Коржнева, д.т.н. С.М. Чумаченка, проф. Г.І. Рудька,

проф. О.І. Бондаря та ін.), можна дійти однозначного висновку, що на сьогодні потрібний соціо-еколого-економічний імператив у розвитку Донбасу як найкритичнішого регіону в державі.

Оцінки складу й динаміки додаткових просторових змін екологічного стану ГС Донбасу, виконані протягом збройного протистояння (2014–2018 рр.), свідчать про початок його довгострокового переходу в новий еколого-геологічний стан унаслідок провідного впливу зменшення шахтного водовідливу (перериви енергопостачання, виведення з експлуатації нерентабельних шахт, аварійні прориви вод із затоплених шахт і т.ін.) і регіонального підвищення рівнів підземних (грунтових) вод.

Подібний аналіз гірничо-геологічних умов відновлення шахт Донбасу в післявоєнний період (1944–1951 рр.), коли шахтний фонд регіону був у 2,5–3,0 рази меншим за площею та глибиною, дав змогу виявити такі впливові чинники змін еколого-геологічного стану регіону:

1) зменшення міцності порід та ускладнення гірничо-геологічних умов видобутку вугілля в зонах впливу затоплених виробок;

2) погіршення захисних параметрів міжшахтних породних ціликів та протифільтраційних перемичок;

3) збільшення ділянок деформацій поверхні, забруднення підземних вод і підтоплення земель у наближених до шахт містах і селищах.

Таким чином, розроблення нової моделі соціально-економічного та екологічно-збалансованого розвитку Донбасу після закінчення військового конфлікту є новим складним геополітичним і науково-методичним завданням, успішне розв'язання якого можливе тільки за умов досконалого знання нових закономірностей формування геологічного середовища та природно-техногенних геосистем "техногенний об'єкт – навколишнє середовище".

Висновки

Зважаючи на зростання за умов продовження збройного конфлікту загрози збільшення руйнівних територіальних змін життєзабезпечуючих складових навколишнього середовища Донбасу (біорізноманіття, гідросфера, приземна атмосфера, геологічне середовище) насамперед унаслідок розвитку процесу некерованого (аварійного) затоплення шахт і ризику втрати природно-ресурсного потенціалу для його майбутнього екологічно збалансованого розвитку, вважаємо за потрібне рекомендувати:

1. Терміново створити при Адміністрації Президента України Міжнародну експертно-аналітичну раду з фахівців наукових, адміністративних і природоохоронних установ обох сторін конфлікту для оцінки природно-техногенних загроз безпеці життєдіяльності некерованого (аварійного) затоплення вугледобувних шахт і ризиків необоротних втрат промислово-територіальних комплексів, руйнування систем та об'єктів критичної інфраструктури – тепло-, водо- та енергопостачання, транспортних мереж, нафто-, газо-, продуктопроводів і т. ін.

2. Виконати комплексний екологічний аудит зони впливу військового конфлікту та прилеглих територій з визначенням переліку та стану природних ресурсів (земельних, водних, мінерально-сировинних, біотичних та ін.) як основи екологічно збалансованого розвитку регіону.

3. Розпочати комплекс науково-дослідних робіт з обґрунтування гранично-допустимих змін довкілля та техногенних навантажень за умов реструктуризації Донбасу.

4. Терміново організувати роботи, залучивши інститути НАН України, ДСНС та Міністерства екології і природних ресурсів, з відновлення екологічного моніторингу зони впливу військових дій на прилеглі території із застосуванням матеріалів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), контактного моніторингу та математичного моделювання можливих сценаріїв розвитку ситуації на Донбасі.

5. Провести перемовини щодо унеможливлення воєнно-техногенного впливу на системи водовідливу та вентиляції шахт, щоб запобігти катастрофічним порушенням умов функціонування об'єктів критичної інфраструктури (систем енерго-, тепло- та водопостачання, залізниці, нафтогазопроводів, руйнівних деформацій і підтоплення житлових і промислових об'єктів денної поверхні тощо).

6. Розробити державну програму з розвитку систем підземного водопостачання на базі захищених від поверхневого забруднення розвіданих запасів підземних вод.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Піріков О.В. Індикатори та системи сталого розвитку: теорія та практика / О.В. Піріков // Ефективна економіка. – 2013. – № 11. – С. 42–51.
2. Рудько Г.І., Бондар О.І., Яковлев Є.О., Єрмаков В.М. Екологічна безпека вугільних родовищ України. – Київ: БукРек, 2016. – 608 с.
3. Яковлев Є.О. Асиміляційний потенціал геологічного середовища гірничо-добувних регіонів України як провідний показник екологічних проблем надрокористування // Мінеральні ресурси України. – № 4. – 2015. – С. 37–43.
4. Яковлев Є., Чумаченко С. Екологічні загрози у Донбасі, Україна. Посольства Великої Британії і Канади, Центр Гуманітарного Діалогу (Женева). – 2017. – 60 с.
5. Чумаченко С.М. Методика комплексного оперативного експертного оцінювання військово-техногенних загроз в зоні проведення операції Об'єднаних сил / С.М. Чумаченко, Є.В. Морщ, А.В. Михайлова, А.С. Парталян // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – 2020. – №1 (9). – С. 23–33.
6. Луньова О.В. Наукові основи управління екологічною безпекою промислових комплексів вуглевидобувних підприємств / О.В. Луньова // Екологічні науки. – 2020. – № 1 (28) – С. 50–59.
7. Луньова О.В. До питання оцінки екологічних небезпек динаміки затоплення шахт Центрального району Донбасу / О.В. Луньова // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2019. – № 2 (45). – С. 93–103
8. Єрмаков В.М. Вплив вуглевидобувних підприємств на рівень екологічної безпеки техноосистем Донбасу / В.М. Єрмаков, О.В. Луньова // Матеріали XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми екологічної безпеки» (2–4 жовтня 2019 р. м. Кременчук). – Кременчук. – 2019. – С. 137–142.
9. Lunova O. Potential territorial risk in the eastern Ukraine / O. Lunova, V. Yermakov, D. Averin // Journal of Geology, Geography and Geoecology. – 2019. – Vol. 28(3). – P. 600–609.

Стаття надійшла до редакції 10.12.2020 і прийнята до друку після рецензування 08.04.2021

REFERENCES

1. Pyrikov, O.V. (2013). Indicators ta systemy stalogo rozvytku: teoria ta practica [Indicators and systems of sustainable development: theory and practice]. *Efektivna ekonomyka*, 11, 42-51 (in Ukrainian).
2. Rudko, G.I., Bondar, O.I., Yakovlev, Ye.O., & Yermakov, V.M. (2016). *Ecologichna bezpeka vugilnyh rodovishch Ukrainy* [Ecological safety of coal deposits of Ukraine]. Kyiv: BukRek.
3. Yakovlev, Ye. O. (2015). Asimilyciyniy potential geologichnogo seredovyscha girnychodobuvnyh regioniv Ukrainy yak providnyy pokaznyk ecolochnyh problem nadrokorystuvanya [Assimilation potential of the geological environment of mining regions of Ukraine as a leading indicator of environmental problems of subsoil use]. *Mineralni resursy Ukrainy*, 4, 37-43 (in Ukrainian).
4. Yakovlev, Ye., & Chumachenko, S. (2017). *Ecologichni zagrozy u Donbasi, Ukraina* [Environmental threats in Donbass, Ukraine]. Posolstva Canada, Velikobritaniya, Centr Humanitarnogo Dialogu (Zheneva) (in Ukrainian).
5. Chumachenko, S.M., Morshch, Ye.V., Mykhaylova, A.V., & Partalyan, A.S. (2020). Metodyka kompleksnoho operatyvnoho ekspertnoho otsynuvannya viys'kovo-tekhnohenykh zahroz v zoni provedennya operatsiyi Ob'yednanykh syl [Methods of comprehensive operational expert assessment of military-man-made threats in the area of the Joint force operation]. *Naukovyy visnyk*, 1 (9), 23-33 (in Ukrainian).
6. Lunova, O.V. (2020). Naukovi osnovi upravlinnya ekologichnoyu bezpekoyu promislovih kompleksiv vuglevidobuvnyh pidpriemstv [Scientific bases of management of ecological safety of industrial complexes of coal mining enterprises]. *Ekologichni nauki*, 1 (28), 50-59 (in Ukrainian).
7. Lunova, O.V. (2019). Do pitannya ocinki ekologichnih nebezpek dinamiki zatoplennya shaht Central'nogo rajonu Donbasu [On the issue of environmental hazard assessment of the dynamics of flooding of mines in the Central district of Donbass]. *Visti Donec'kogo girnichogo institutu*, 2 (45), 93-103 (in Ukrainian).
8. Yermakov, V.M., & Lunova, O.V. (2019). Vpliv vuglevidobuvnyh pidpriemstv na riven' ekologichnoy bezpeki tekhnоекосистем Donbasu [The impact of coal mining enterprises on the level of ecological safety of technical ecosystems of Donbass]. In *XVII Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferenciya «Problemi ekologichnoi bezpeki»*, (pp. 137-142) (in Ukrainian).
9. Lunova, O., Yermakov, V., & Averin, D. (2019). Potential territorial risk in the eastern Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28, 600-609 (in Ukrainian).

The article was received 10.12.2020 and was accepted after revision 08.04.2021

Пиріков Олександр Валерійович

кандидат технічних наук, доцент, експерт ГО «Фундація розвитку екологічних та енергетичних ринків»

Адреса робоча: 03150, м. Київ, вул. Антоновича, буд. 131

e-mail: 0506463222av@gmail.com

Чумаченко Сергій Миколайович

доктор технічних наук, с.н.с., завідувач кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій

Адреса робоча: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68

ORCID ID 0000-0002-8894-4262, **e-mail:** sergiy23.chumachenko@gmail.com

Яковлев Євгеній Олександрович

доктор технічних наук, головний науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID 0000-0001-6934-618X, **e-mail:** yakovlevhydro@gmail.com

УДК 628.35

Oleksandr Ya. Oliynyk, Corresponding member of NASU, D.S. (Technical), Professor, Chief of the Department of Applied Hydrodynamics

Sergiy V. Telyma, PhD, Senior Research Associate
ORCID ID 0000-0003-0109-0696, *e-mail*: sertelyma@gmail.com

Yuriy I. Kalugin, PhD, Senior Research Associate
e-mail: forkalugin@ukr.net

Yevheniy O. Oliynyk, Principal engineer

Institute of Hydromechanics of NASU, Kyiv, Ukraine

SUBSTANTIATION OF THE CALCULATION METHODS OF THE NITROGEN REMOVING (NITRIFICATION) IN BIOREACTORS WITH USING ON THE BIOFILM MODELS

***Abstract.** The mathematic model and calculations of the waste waters cleaning parameters from the compounds ammonium nitrogen (nitrification) in bioreactors with additional using in theirs volume the fixed biocenosis as the biofilm are presented. The valuation of the different influence factors on the waste waters cleaning parameters is given. The kinetics of reaction according to Monod nonlinear equation is used that allow to calculate the nitrogen concentrations on the external and in the interior biofilm surfaces and to evaluate the efficiency of the biofilm work of the given thickness relative to penetration character of the nitrogen pollutions in it. As showed the biofilm thickness and the flow in it are decreasing as the tearing off velocity of the biomass from its surface is increasing where as at increasing of the nitrogen concentrations these parameters are increasing. At this the substrate flow and the penetration depth into the biofilm are the functions of the substrate concentration on the biofilm surface, velocity of the reaction within it and the diffusive mass transfer. As a main parameter for evaluation of the oxygen influence for control of the process of ammonium oxidation to nitrite the relation of the concentrations oxygen to ammonium nitrogen is proposed. The specific examples and calculations have showed the given relation may be better alternative for control of the nitrification processes in reactor in comparison with oxygen concentration.*

***Key words:** model; cleaning; nitrogen compounds; biofilm; bioreactor; oxygen; concentration*

О.Я. Олійник, С.В. Телима, Ю.І. Калугін, Є.О. Олійник

Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ВИЛУЧЕННЯ АЗОТУ (НІТРИФІКАЦІЯ) В БІОРЕАКТОРАХ З ВИКОРИСТАННЯМ БІОПЛІВКОВИХ МОДЕЛЕЙ

***Анотація.** Наведена математична модель і розрахунки параметрів очистки стічних вод від сполук амонійного азоту (нітрифікація) в біореакторах з додатковим облаштуванням в їх об'ємі закріпленого біоценозу у вигляді біоплівки. Дана оцінка впливу різних факторів на параметри очистки.*

© О.Я. Олійник, С.В. Телима, Ю.І. Калугін, Є.О. Олійник, 2021

ISSN: 2411-4049. Екологічна безпека та природокористування, № 2 (38), 2021

В моделі використовується кінетика реакцій згідно з нелінійним рівнянням Моно, що дозволяє проводити розрахунки з визначення концентрацій азоту на зовнішній та внутрішній поверхнях біоплівки та оцінювати ефективність дії біоплівки заданої товщини по характеру проникнення в ній забруднень азоту. Показано, що товщина біоплівки і потік всередині неї зменшуються із збільшенням швидкості відриву біомаси з її поверхні, тоді як із збільшенням концентрації азоту ці характеристики зростають. При цьому потік субстрату та глибина проникнення в біоплівку є функціями концентрації субстрату на поверхні біоплівки, швидкості реакції всередині біоплівки і дифузійного масопереносу. У якості основного параметра для оцінки впливу кисню, який контролює процес окислення амонію до нітритів, пропонується використання відношення концентрації кисню до амонійного азоту. Як показали конкретні приклади і розрахунки, дане відношення може бути кращою альтернативою контролю за нітрифікацією в реакторі у порівнянні з концентрацією кисню.

Ключові слова: модель; очистка; сполуки азоту; біоплівка; біореактор; кисень; концентрація

DOI: 10.32347/2411-4049.2021.2.18-38

Вступ

Відомо, що одними із основних забруднюючих речовин, які входять до складу господарсько-побутових і їм подібних за складом стічних вод, являються сполуки азоту переважно амонійної форми ($N-NH_4^+$).

Згідно з існуючими нормативними вимогами ці води перед скиданням у різні водойми підлягають з різних причин значному очищенню. В практиці очищення стічних вод від сполук азоту, як і забруднень органічного походження, найбільшого поширення здобули біологічні методи очистки. В класичній схемі такої очистки основною складовою є біореактор-аеротенк. В аеротенку відбувається вилучення (біоокислення) сорбованих на плаваючих пластівцях активованого мулу забруднень, який в даному випадку складається з автотрофних мікроорганізмів, завислих або розчинних у воді. Слід відмітити, що останнім часом, особливо в зв'язку із посиленням нормативних вимог, така очистка не забезпечує необхідний рівень і якість вилучення азотних забруднень зваженим (плаваючим) біоценозом і виникає необхідність у їх додатковій очистці. Як показав проведений аналіз, ефективність вилучення забруднень азоту в аеротенку можна значно підвищити, якщо поряд зі зваженим біоценозом (активним мулом) забезпечити в об'ємі аеротенка додаткове завантаження (різні сорбенти, пристрої, насадки тощо), на поверхні якого утворюється біоплівка з високою концентрацією мікроорганізмів. На думку спеціалістів, така комбінована біологічна очистка стічних вод в спорудах із закріпленим біоценозом (біоплівкою) має ряд значних суттєвих технологічних переваг і може широко використовуватись на практиці при вилученні забруднень різного походження.

В загальному випадку вилучення амонійного азоту $N-NH_4^+$ складається із декількох процесів, а саме: процесу окислення амонію до нітритів $N-NO_2$ (перша стадія нітрифікації) та окислення нітритів $N-NO_2$ до нітратів $N-NO_3$ (друга стадія нітрифікації) та із майже анаеробного процесу денітрифікації – відновлення зазначених сполук азоту до молекулярного азоту N_2 .

В даній роботі запропоновано математичну модель, в якій розглянута перша стадія нітрифікації по вилученню амонійного азоту $N-NH_4^+$. Таке вилучення

відбувається анаеробними бактеріями *Nitrosomonas* в умовах достатнього забезпечення процесу очистки киснем.

Для одержання інженерних оцінок та їх аналізу розглянуто біореактор-аеротенк – змішувач, в якому вилучення азоту NH_4^+ відбувається зваженим (активованим мулом) із закріпленим біоценозом у вигляді біоплівки з високою концентрацією мікроорганізмів, яка утворюється на поверхні додатково облаштованого в аеротенку завантаження.

Мета досліджень

Мета досліджень полягає у розробці математичної моделі та методів розрахунку, в яких вилучення азоту N відбувається за реакцією нульового порядку і більш точною нелінійною реакцією згідно з відомим рівнянням Моно для умов достатнього забезпечення процесу очистки киснем.

Виклад основних результатів

У попередніх роботах нами був проведений аналіз і відзначені особливості сумісної біологічної очистки стічних вод від органічних забруднень (O_3) і сполук азоту (N) різним біоценозом (мікроорганізмами), який формується у вигляді біоплівки на поверхні елементів завантаження в різних біореакторах, зокрема в аеротенках і затоплених фільтрах [1–4]. Було встановлено, що при достатньому забезпеченні сумісної аеробної очистки киснем практично вилучення азоту N відбувається тільки тоді, коли майже повністю відбулось вилучення O_3 в біоплівці більш активними гетеротрофними мікроорганізмами. Як показали результати проведеного аналізу, вилучення O_3 і N можна розглядати окремо в дві стадії, а саме: спочатку відбувається вилучення O_3 без нітрифікації, а на другій стадії оптимізується тільки процес нітрифікації. Наприклад, встановлено [3], що при концентрації O_3 десь більше 30 мг/л вилучення азоту зовсім не відбувається. При незначному часі перехідного періоду від першої до другої стадії відбувається майже повне вилучення залишків O_3 і деяке можливе початкове незначне вилучення N , яке в практичних розрахунках можна не враховувати. Тому при аналізі і розробці методики сумісного вилучення O_3 і N в біореакторах використовувались результати досліджень, одержані для випадку окремого вилучення O_3 і N в обох зазначених стадіях.

Нагадаємо, що азот присутній у багатьох стічних водах переважно у вигляді амонію NH_4^+ і його присутність у воді є небажаною з різних причин [5, 6]. Для вилучення амонію часто використовують біологічні процеси нітрифікації – денітрифікації перетворення амонію в молекулярний азот. Відомо, що амоній в процесі нітрифікації окислюється до нітрату NO_3 через нітрит NO_2 , а далі нітрат переходить в молекулярний азот через денітрифікацію. Відповідно до вирішення поставлених задач сумісного вилучення O_3 і N в даній роботі розглянуто і вивчено процес, що відбувається при першій стадії нітрифікації, а саме: вилучення амонійного азоту $N - \text{NH}_4^+$ із стічних вод. Особливості протікання цього процесу, що відбувається під дією автотрофних бактерій (*Nitrosomonas*), достатньо широко висвітлені в спеціальній літературі [6–9].

Так як в цих випадках вилучення O_3 і N відбувається в аеробних умовах, тобто при споживанні кисню, то необхідно в системах аерації забезпечити такий кисневий режим в реакторі, при якому швидкість біологічної очистки не повинна лімітуватись кількістю кисню, який знаходиться в реакторі. Методика розрахунку параметрів вилучення O_3 в біореакторах (аеротенках, краплинних і затоплених фільтрах) із закріпленням біоценозом (біоплівкою) досить предметно і ґрунтовно розроблена на підставі реалізації загальних математичних біоплівкових моделей. При цьому враховані технологічні, гідродинамічні, біологічні та інші особливості формування і реалізації математичних моделей з біоплівкою, в тому числі із врахуванням кисневого режиму [10, 11].

Загальна математична модель вилучення азоту N , як і органічних забруднень O_3 , складається із системи рівнянь матеріального балансу, записаних відносно зміни концентрацій азоту N і кисню O_2 у стічній воді, що очищається в біореакторі, біоплівці і рідинній плівці пограничного шару. При цьому вилучення азоту N в системі біореактор з біоплівкою відбувається переважно закріпленням біоценозом, хоча, як буде сказано нижче, може частково вилучатись і зваженим біоценозом (переважно активним мулом), який знаходиться в об'ємі рідини в біореакторі. Оцінка впливу цього біоценозу була, зокрема, одержана при розрахунках вилучення O_3 зваженим і закріпленням біоценозом в аеротенках і наведена в роботі [12]. Так як вилучення азоту N відбувається переважно тільки біоплівкою, то було розглянуто наступні біоплівкові моделі (рівняння матеріального балансу):

а) в умовах елементів можливого завантаження, на якому формується біоплівка в біореакторах-аеротенках і краплинних біофільтрах [11]:

$$D_N \frac{\partial^2 N}{\partial Z^2} - R_N = 0, \quad (1)$$

б) в умовах завантаження із сферичних зерен (гранул) в затоплених фільтрах або гранул (зерен) інших форм (деякі рекомендації наведені в роботі [10]):

$$D_N \left(\frac{\partial^2 N}{\partial r^2} + \frac{2\partial N}{\partial r} \right) - R_N = 0. \quad (2)$$

В загальному випадку швидкість вилучення N відбувається за реакцією

$$R_N = k_N \frac{N}{K_{Nm} + N} \frac{C}{K_{cm} + C} - X_N f_N, \quad (3)$$

де $k_N = \frac{\mu_{\max N}}{Y_N}$, $f_N = f_i \cdot f_{PH} \cdot f_C$. Позначення прийнятих величин в рівняннях наведені в роботах [1–4]. В подальшому для практичних розрахунків будуть розглянуті найбільш поширені випадки, коли вилучення азоту N відбувається за реакцією нульового порядку і більш точною нелінійною

реакцією згідно з відомим рівнянням Моно, а також при достатньому забезпеченні процесу киснем $\left(\frac{C}{K_{cm} + C} \approx 1 \right)$.

Тобто маємо

$$R_{NO} = k_N X_N = w_N, \quad (4)$$

$$R_N = w_N N / (K_{Nm} + N) . \quad (5)$$

Оскільки на практиці концентрація азоту буде значно більша, ніж параметр півнасичення $N \gg K_{Nm}$, то при його вилученні можна приймати кінетику нульового порядку (4). При вирішенні рівняння (1) при реакції R_{N_0} нульового порядку в залежності від проникнення азоту в біоплівку необхідно розглядати два можливі випадки (рис. 1). У першому випадку, який відповідає повному проникненню азоту в біоплівку ($\beta_N \geq 1$), рішення рівняння (1) виконується при наступних граничних умовах:

при $z = 0, \quad -D_N \frac{dL_N}{dz} = K_N (N_e - N|_{z=0}) = I_N \quad (6)$

при $z = \delta, \quad \frac{dN}{dz} = 0,$

де I_N – потік (транспорт) N на поверхню біоплівки із об'єму рідини (реактора) через рідинну плівку (пограничний шар).

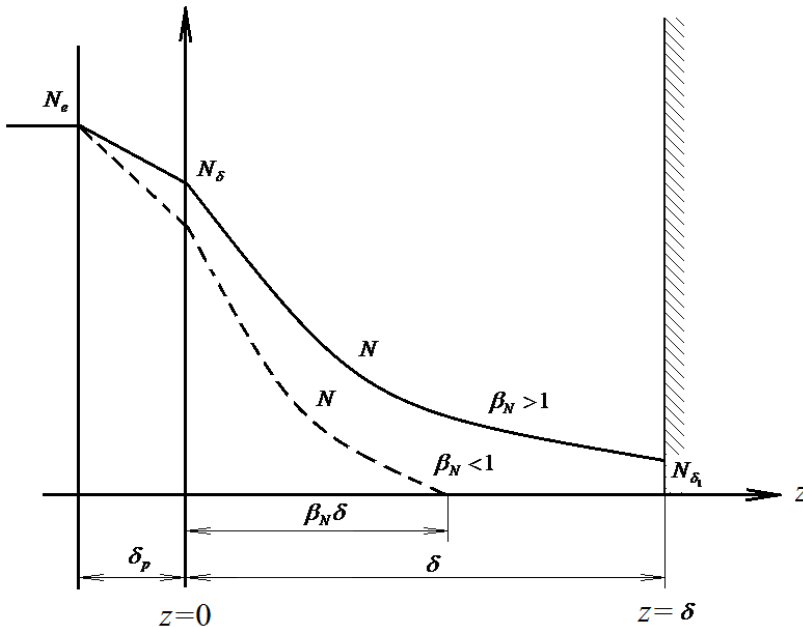


Рис. 1 – Схеми повного ($\beta_N > 1$) і неповного ($\beta_N < 1$) проникнення (пенетрації) азоту N в біоплівці при реакції нульового порядку

Зазначимо, що в багатьох існуючих роботах, зокрема в [1], профілі зміни концентрацій всередині біоплівки, як ОЗ, так і N, розраховані за умови, що концентрація на поверхні біоплівки N_δ приймається рівною концентраціям забруднень в об'ємі рідини N_e . Проте, навіть при повному перемішуванні в біореакторах, має місце утворення пограничного шару (рідинної плівки), процеси масопереносу молекулярною дифузією D через який потрібно враховувати в біоплівкових моделях. Деякі питання, пов'язані з формуванням пограничного шару і необхідності його врахування (в умовах плоскої і неплоскої поверхні біоплівки), розглянуті в роботах [1, 13]. Окремі питання і рекомендації з визначення параметрів пограничного шару, зокрема його товщини δ_p і коефіцієнта масопереносу $K_N = \frac{D_m}{\delta_p}$, наведені в роботах [1, 13].

В результаті рішення рівняння (1) при граничних умовах (6) одержимо наступну залежність для визначення зміни концентрації N в біоплівці.

$$N(z) = N_e - \frac{w_N}{D_N} \left(\frac{\delta D_N}{K_N} + \delta z - \frac{z^2}{2} \right). \quad (7)$$

Значення концентрації N_δ на поверхні біоплівки буде складати:

$$N_\delta = N_e - \frac{w_N \delta}{K_N}. \quad (8)$$

З урахуванням рівняння (8) рівняння (7) можна записати у вигляді

$$N(z) = N_\delta - \left(\delta z - \frac{z^2}{2} \right) \frac{w_N}{D_N}, \quad (9)$$

яке для подальшого аналізу із врахуванням проведеного обґрунтування можна записати у наступному вигляді:

$$N(z) = N_\delta \left[1 - \left(\frac{2z}{\delta \beta_N^2} - \frac{z^2}{\delta^2 \beta^2} \right) \right], \quad (10)$$

де

$$\beta_N = \sqrt{\frac{2N_\delta D_N}{w_N \delta^2}} \quad \text{або} \quad \beta_N \delta = \sqrt{\frac{2N_\delta D_N}{w_N}}. \quad (11)$$

Зазначимо, що в даному випадку зміни концентрації в біоплівці і значення коефіцієнта буде ($\beta_N > 1$).

Визначимо також значення концентрації N на виході із біоплівки $\left(z = \delta, \frac{z}{\delta} = 1 \right)$

$$N_{\delta 1} = N_{\delta} - \frac{w_N}{2D_N} \delta^2. \quad (12)$$

У випадку, коли спостерігається часткове проникнення азоту N в біоплівку, тобто замінюється на ділянці $z = \beta_N \delta < 1$ (рис. 1), приймаються граничні умови $\frac{\partial L_N}{\partial z} = 0$ і $L_N = 0$. У випадку граничної умови $\frac{\partial L_N}{\partial z} = 0$ при $z = \beta_N \delta$ рішення задач з визначення зміни концентрації N в біоплівці можна одержати із попереднього рішення, прийнявши в ньому замість товщини біоплівки δ її ділянку товщиною $\beta_N \delta < 1$ (рис. 1). Зокрема, в цьому випадку маємо:

$$N(z) = N_{\delta} - \left(z\beta_N \delta - \frac{z^2}{2} \right) \frac{w_N}{D_N}, \quad (13)$$

$$N_{\delta} = N_e - \frac{w_N \beta_N \delta}{K_L}. \quad (14)$$

У випадку граничної умови $N = 0$ при $z = \beta_N \delta = 0$ при рішенні рівняння (1) одержимо:

$$N(z) = \frac{w_N}{2D_N} z^2 - \left(\frac{N_{\delta}}{\beta_N \delta} + \frac{w_N}{2D_N} \beta_N \delta \right) z + N_{\delta}, \quad (15)$$

або

$$N(z) = N_{\delta} \left(1 - \frac{2z}{\beta_N \delta} + \frac{z^2}{(\beta_N \delta)^2} \right), \quad (16)$$

де

$$N_{\delta} = \frac{N_e - w_N \beta_N \delta}{\left(1 - \frac{D_N}{\beta_N \delta K_N} \right)}. \quad (17)$$

Якщо відношення $\frac{D_N}{\beta_N \delta K_N} \ll 1$, то в обох випадках значення β_N для визначення N_{δ} можна знаходити за залежністю (8).

Згідно з рівнянням (6), потік в біоплівку при $\beta_N \geq 1$ буде складати:

$$I_N = w_N \delta, \quad (18)$$

а у другому випадку при $\beta_N < 1$ буде :

$$I_N = \beta_N \delta w_N. \quad (19)$$

Враховуючи, що згідно з (11) параметр β_N залежить від концентрації, то залежність (19) можна записати у вигляді:

$$I_N = \sqrt{2D_N w_N} \cdot \sqrt{N_\delta}, \quad (20)$$

тобто одержати відому залежність половинного порядку для потоку азоту від концентрації N_δ .

Таким чином, відношення потоків для реакцій нульового порядку для частково проникної біоплівки (19) і для повністю проникної біоплівки (18) будуть визначатись через параметр β_N . На основі проведеного додаткового математичного обґрунтування для обох випадків ($\beta_N < 1$ і $\beta_N > 1$) їх значення можна визначати за залежністю (11). В якості прикладу для визначення концентрації по товщині біоплівки для різних значень β_N

наводяться графіки $\frac{N}{N_{\delta_0}} = f(\bar{z}, \beta_N)$ (рис. 2), де $N_\delta = N_{\delta_0}$.

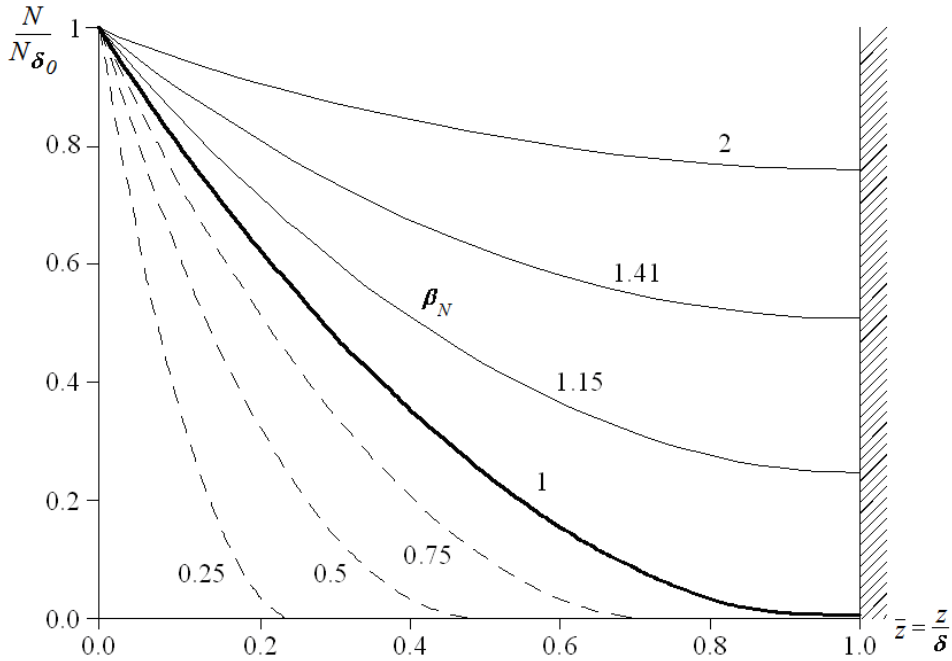


Рис. 2 – Профілі концентрації N при кінетиці реакції нульового порядку всередині біоплівки для різних значень $\beta_N < 1$ і $\beta_N > 1$

Представлені на рис. 2 графіки побудовані при постійній товщині біоплівки δ , проте відповідають кожному значенню концентрації N_e в об'ємі біореактора, від якої залежить концентрація на поверхні біоплівки N_δ . Таким чином, в даному випадку параметр β_N залежить від концентрації N_e і це потрібно враховувати при його визначенні. Із рис. 2 також слідує, що перехід від часткового проникнення концентрації N в біоплівці до її повного проникнення відбувається при $\beta_N \approx 1$, що наближено відповідає значенню концентрації на поверхні біоплівки:

$$N_{\delta_{\min}} = \frac{\delta^2 w_N}{2D_N}. \quad (21)$$

В загальному випадку з достатнім обґрунтуванням в спеціальній літературі при вилученні сполук азоту N , як і органічних забруднень, пропонується переважно використовувати в моделях кінетику реакцій, яка описується відомим нелінійним рівнянням Моно (5). Тому розглянемо рішення рівняння (1) в умовах нелінійної реакції R_N згідно з рівнянням Моно (5), які в безрозмірній формі і прийнятих граничних умовах будуть мати наступний вигляд:

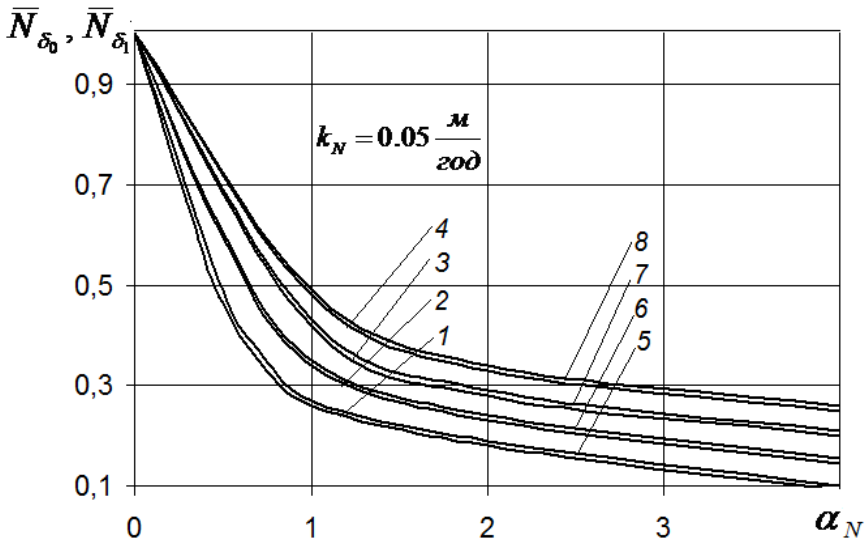
$$\frac{d^2 \bar{N}}{d\bar{z}^2} - \alpha_N \frac{\bar{N}}{\bar{K}_{m_N} + \bar{N}} = 0, \quad (22)$$

$$\text{при } \bar{z} = 0, \quad -\frac{d\bar{N}}{d\bar{z}} = \beta(1 - \bar{N});$$

$$\text{при } \bar{z} = 1, \quad \frac{d\bar{N}}{d\bar{z}} = 0.$$

$$\text{Тут } \bar{z} = \frac{z}{\delta}, \quad \bar{N} = \frac{N}{N_e}, \quad \bar{K}_{m_N} = \frac{K_{m_N}}{N_e}, \quad \alpha_N = \frac{\mu_m X_N \delta^2}{Y_N D_N N_e}, \quad \beta = \frac{K_N \delta}{D_N}.$$

В результаті рішення рівняння (22) чисельними методами на основі розробленої програми побудовані розрахункові графіки для визначення концентрацій N на зовнішній поверхні біоплівки $N_{z=0} = N_{\delta_0}$ ($z = 0$) і на внутрішній поверхні біоплівки $N_{z=\delta} = N_{\delta_1}$ ($z = \delta$) (рис. 3).



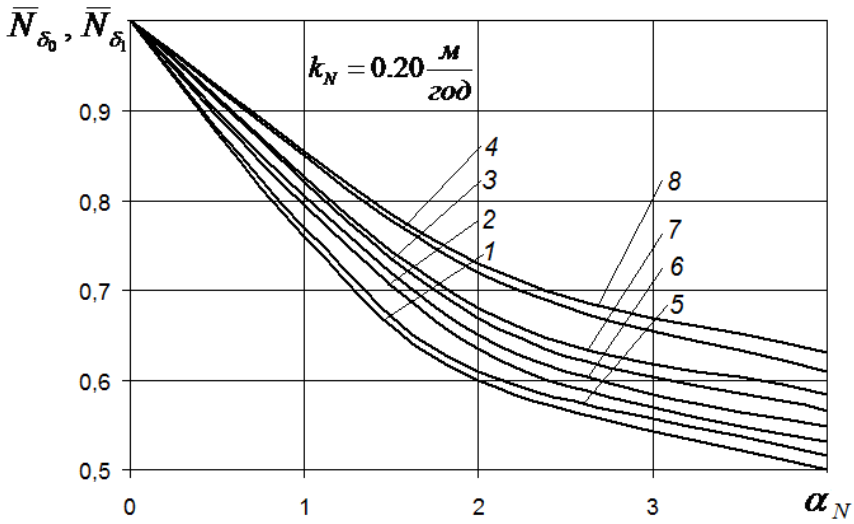
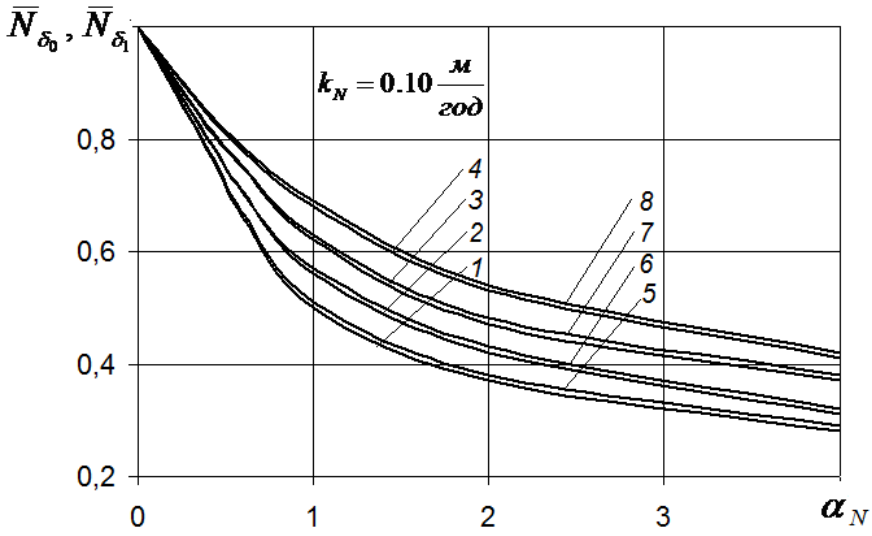


Рис. 3 – Графіки для визначення концентрацій на зовнішній $\bar{N}_{\delta_0} = \frac{N_{\delta_0}}{N_e}$ і внутрішній $\bar{N}_{\delta_1} = \frac{N_{\delta_1}}{N_e}$ поверхнях біоплівки відповідно для різних відношень

$$\bar{K}_{m_N} = \frac{K_{m_N}}{N_e}. \text{ Для концентрацій } \bar{N}_{\delta_1} \text{ (при } \bar{z} = \frac{z}{\delta} = 1):$$

$$1 - \bar{K}_{m_N} = 0,017, 2 - \bar{K}_{m_N} = 0,067, 3 - \bar{K}_{m_N} = 0,167, 4 - \bar{K}_{m_N} = 0,333;$$

для концентрацій \bar{N}_{δ_0} (при $\bar{z} = 0$):

$$5 - \bar{K}_{m_N} = 0,017, 6 - \bar{K}_{m_N} = 0,067, 7 - \bar{K}_{m_N} = 0,167, 8 - \bar{K}_{m_N} = 0,333.$$

В цьому випадку загальна залежність (6) для визначення потоку в біоплівку I_N буде мати вигляд:

$$I_N = K_N N_e (1 - A_N), \quad A_N = \frac{N_{\delta_0}}{N_e}. \quad (23)$$

Для зручності подальших розрахунків, використовуючи в моделі безрозмірні одиниці і параметри, залежність для потоку можна представити у вигляді:

$$I_N = \bar{I} \lambda, \quad (24)$$

$$\bar{I} = \beta_{N_p} (1 - A_N), \quad (25)$$

де $\lambda = \frac{D_N}{\delta} N_e$, $\beta_{N_p} = \frac{K_N \delta}{D_N}$.

В результаті проведеного аналізу для визначення потоку в біоплівку \bar{I}_N маємо

$$\bar{I}_N = \sqrt{2} \alpha_N \times \sqrt{\bar{N}_{\delta_0} - \bar{N}_{\delta_1} - \bar{K}_{mN} \ln\left(\frac{N_{\delta_0} + N_{\delta_1}}{N_{\delta_1} + K_{mN}}\right)}, \quad (26)$$

а також наступне рівняння, яке зв'язує концентрації \bar{N}_{δ_0} і \bar{N}_{δ_1} на зовнішній і внутрішній поверхнях біоплівки:

$$\bar{N}_{\delta_0} = \bar{N}_{\delta_1} + \bar{K}_{mN} \ln\left(\frac{\bar{N}_{\delta_0} + \bar{K}_{mN}}{\bar{N}_{\delta_1} + \bar{K}_{mN}}\right) + \eta_N (1 - \bar{N}_{\delta_0})^2, \quad (27)$$

де $\eta_N = \frac{\beta_N^2}{2\alpha_N} = \frac{K_N^2 N_e}{2D_N w_N}$, $w_N = \frac{\mu_m X_N}{Y_N}$.

На основі використання одержаних рішень для реакцій першого і нульового порядків запропоновано наближені методи розрахунку необхідних параметрів згідно з рівнянням Моно. Так, в роботах [14, 15] для визначення концентрації N в біоплівці, зокрема на зовнішній поверхні N_{δ_0} , можна використати запропонований ітераційний метод. Зміст і послідовність використання цього методу при розрахунку вилучення органічних забруднень наведені в роботах [14, 15]. В роботах [13, 16] потік органічних забруднень через біоплівку у випадку кінетики реакцій за рівнянням Моно досить обґрунтовано пропонується брати як середньозважену величину I_c , одержану від потоків при вилученні органічних забруднень на основі реакцій нульового і першого порядків. Зазначимо, що обґрунтування цього методу виконано при умові неврахування пограничного шару. В роботі [15] замість потоків I розглянута спроба використання цього методу при визначенні концентрації органічних забруднень на поверхні біоплівки.

Для обґрунтування можливості використання середньозваженого методу вилучення амонійного азоту N біоплівкою за реакцією Моно з врахуванням впливу пограничного шару на основі реакцій нульового і першого порядків розглянемо наступні рівняння:

а) для потоку I_{cp}

$$I_{cp} = \gamma_0 I_0 + (1 - \gamma_1) I_1, \quad (28)$$

б) для концентрації N_δ

$$N_{\delta_0} = \gamma_0 N_\delta^0 + (1 - \gamma_1) N_\delta^1, \quad (29)$$

де $\gamma_0 = \frac{N_\delta^0}{K_{mN} + N_\delta^0}$, $\gamma_1 = \frac{N_\delta^1}{K_{mN} + N_\delta^1}$.

Параметри для реакції нульового порядку I_0 , N_δ^0 визначаються відповідно за залежностями (18), (14), а I_1 , N_δ^1 – параметри реакції першого порядку, визначаються за наступними залежностями:

$$I_1 = K_N N_e \frac{\lambda \operatorname{sh}(\sqrt{\alpha})}{\operatorname{ch}(\sqrt{\alpha}) + \lambda \operatorname{sh}(\sqrt{\alpha})} = D_N \frac{\operatorname{th}(\sqrt{\alpha})}{\alpha_0} N_\delta^1, \quad (30)$$

$$N_\delta^1 = N_e A, \quad A = \frac{\operatorname{ch}(\sqrt{\alpha})}{\operatorname{ch}(\sqrt{\alpha}) + \lambda \operatorname{sh}(\sqrt{\alpha})}, \quad (31)$$

$$\alpha = \frac{k\delta^2}{D_N}, \quad \lambda = \frac{\sqrt{kD_N}}{K_N}, \quad k = \frac{\mu_m X_N}{K_{mN} Y}, \quad \alpha_0 = \sqrt{\frac{D_N}{k}}.$$

Для визначення параметра A в роботі [15] наведено розрахунковий графік $A(\varphi, \lambda)$, де $\varphi = 2\sqrt{\alpha}$. Однією із переваг використання в практичних розрахунках залежності (28), крім простоти, є можливість оцінити вплив кожного фактора (складової) на загальний потік.

Розрахунки з використанням графіків на рис. 3 і наведених залежностей дозволяють оцінити роботу біоплівки заданої товщини δ за характером проникнення в ній забруднень азоту N . Крім того, вони дозволяють при заданих параметрах N_{δ_0} , N_{δ_1} , а також I_0 , I_1 визначити необхідну активну товщину біоплівки δ , від якої залежить ефективність вилучення азоту N . При цьому в умовах вилучення одного субстрату N автотрофними мікроорганізмами (процес нітрифікації) формується однорідна гомогенна структура активної біоплівки товщиною δ . Проте, слід відзначити, що на формування біоплівки впливають різні процеси і параметри, які згідно з роботами [1, 13] можна враховувати в даному випадку на основі реалізації загального рівняння виду:

$$\frac{d\delta}{dt} = \int_0^{\delta} \frac{\mu_m N}{K_{mN} + N} dz - b_s \delta - u_{ds}. \quad (32)$$

В прийнятих моделях біоплівки при розрахунках приймається товщина біоплівки постійною ($\delta = const$), тобто для її визначення рівняння (32) вирішується в стаціонарних умовах при $\frac{d\delta}{dt} = 0$. В окремих випадках пропонується використовувати більш спрощене рівняння виду:

$$\frac{Y_N}{X_N} I_N - b_s \delta - u_{ds} = 0 \quad (33)$$

або рівняння загального балансу біомаси

$$Y_N I_N - b X_N \delta = 0, \quad (34)$$

де $b = b_s + b_d$ при $u_{ds} = b_d \delta$, b_s і b_d – відповідно відомі коефіцієнти розпаду біомаси біоплівки, а u_{ds} – швидкість відриву біомаси з поверхні біоплівки [1, 13].

Якщо прийняти для реакції нульового порядку значення потоку I_N за формулою (18), то на підставі рішення рівняння (34) одержимо наступне:

$$\text{при } u_{ds} = k_d \delta^2 \quad \delta = \frac{\mu_m - b}{k_d}. \quad (35)$$

У формулі (35) прийнято: μ_m , доб⁻¹; b , доб⁻¹; k_d , 1/(доб м); δ , м. При врахуванні потоку в рівнянні (34), визначеному за рівнянням Моно, швидкість відриву всередині біоплівки приймається також за формулою (34). Проведений аналіз показав, що у всіх випадках товщина біоплівки і потік зменшуються зі збільшенням швидкості відриву, тоді як зі збільшенням концентрації азоту ці характеристики збільшуються. Так, в роботі [7] на підставі одержаних результатів теоретичних і експериментальних досліджень встановлено, що при збільшенні концентрації амонію в секціях реактора кількість азоту змінювалась від $N = 2,27$ мг/л NH_3 до $N = 4,99$ мг/л, а товщина біоплівки – від 27 до 90 мкм. При цьому було визначено, що для стабілізації роботи біоплівки в стаціонарному режимі потрібно відносно значний час (декілька діб). В роботі [3] при дослідженні вилучення амонійного азоту N концентрацією $N = 30$ мг/л стаціонарні умови формування товщини біоплівки наступали наближено після 15 діб і її товщина складала $\delta = 200$ мкм, не змінюючись далі у часі. На основі проведених розрахунків можна зробити висновки, що збільшення товщини біоплівки збільшує потік азоту тільки у тому випадку, коли концентрація азоту N на поверхні біоплівки N_s досить значна і тому азот може проникати до основи біоплівки.

На рис. 4 в якості прикладу на основі вирішення чисельними методами рівняння (32), побудовані розрахункові графіки для визначення товщини біоплівки δ в залежності від зміни концентрації в реакторі N_e , параметра b , а також при прийнятих значеннях вихідних параметрів, рекомендованих

в роботах [1, 16]: $\mu_m = 0,95 \text{ доб}^{-1}$; $Y_N = 0,22 \frac{\text{гХПК}}{\text{гN}}$; $K_{mN} = 1 \frac{\text{гN}}{\text{м}^3}$; $X = 10000 \frac{\text{гХПК}}{\text{м}^3}$;
 $K_N = 0,10 \text{ м/год}$; $\delta_{\min} = 10 \text{ мкм}$; $D_N = 1,70 \cdot 10^{-24} \text{ м}^2/\text{доба}$.

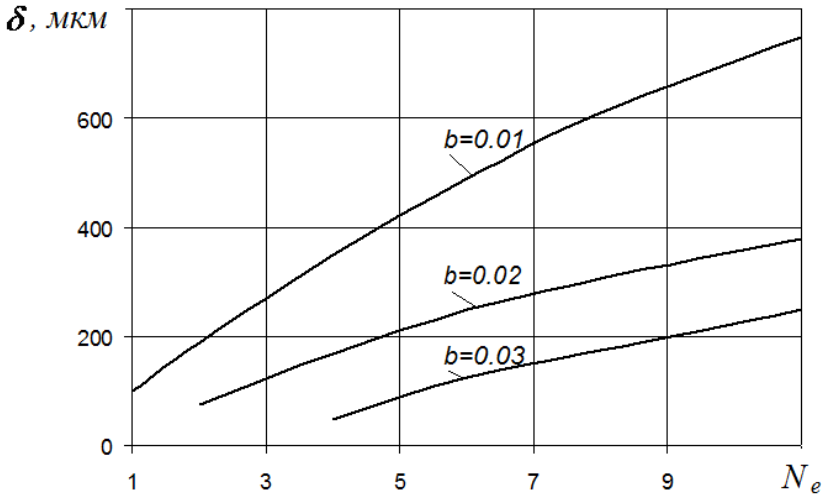


Рис. 4 – Графіки для визначення активної товщини біоплівки δ в стаціонарних умовах при різних значеннях b , год^{-1}

Як вже зазначалось вище, вилучення азоту біоплівкою відбувається в аеробних умовах при забезпеченні кисню в необхідній достатній кількості. Для росту і життєдіяльності мікроорганізмів необхідно забезпечити безперебійне постачання кисню і контролювати його споживання в кількості, яка необхідна для підтримки кінетики реакцій з високою швидкістю утилізації N при даних умовах аеробного процесу. Для оцінки і аналізу кисневого режиму в біореакторах в загальному випадку для опису процесів, які відбуваються при вилученні сполук N , необхідно будувати складні для реалізації математичні моделі. Нижче, на підставі проведеного аналізу, наведені деякі рекомендації, які дозволяють обґрунтовувати параметри кисневого режиму в практичних розрахунках. Так, для реакцій розглянемо найбільш поширений на практиці випадок, коли вилучення N в біоплівці приймається за реакцією нульового порядку (4), і так як маємо $K_{mc} \ll C_N$, то окислення також відбувається за реакцією нульового порядку. Таким чином, в цьому випадку для реакцій маємо наступні рівняння (36.1) і (36.2)

$$R_N = w_N = \frac{\mu_{\max N} X_N}{Y_N}, \quad (36.1)$$

$$R_C = \alpha_1 R_N + \alpha_2 b_C X_N. \quad (36.2)$$

В результаті рішення наступного рівняння відносно концентрації кисню в біоплівці C :

$$D_C \frac{d^2 C}{dz^2} - R_C = 0 \quad (37)$$

при граничних умовах

$$-D_c \frac{dC}{dz} = K_C(C_e - C_\delta) = I_C \text{ при } z = 0, \quad (38)$$

$$\frac{dC}{dz} = 0 \text{ при } z = \delta,$$

одержимо наступне рівняння для визначення концентрації C_δ при реакції нульового порядку:

$$C_\delta = C_e - \frac{w_c \delta}{K_C}, \quad (39)$$

а для потоку I_C згідно з рівнянням (38) маємо:

$$I_C = w_c \delta, \quad (40)$$

де $w_c = \alpha_1 R_N + \alpha_2 b_c X_N$.

Нагадаємо, що витрата кисню на утилізацію (самоокислення) відмираючого біоценозу в біоплівці враховується параметром $\alpha_2 b_c X_N$.

В загальному випадку значення потоку кисню, який поступає в біоплівку, визначається по рівнянню (38). Проте, для реакції нульового порядку при неврахуванні процесів, які визначаються параметром b_c , тобто при $b_c = 0$, для визначення потоку I_C можна скористатись відношенням [1]:

$$\frac{I_N}{\gamma_N} = \frac{I_C}{\gamma_C}, \quad (41)$$

тобто для визначення потоку I_C маємо

$$I_C = \frac{\gamma_C}{\gamma_N} I_N, \quad I_N = \frac{\gamma_N}{\gamma_C} I_C, \quad (42)$$

де стехіометричні коефіцієнти для кисню γ_C і азоту будуть

$$\gamma_C = \frac{4,57 - Y_N}{Y_N}, \quad \gamma_N = \frac{1}{Y_N}, \quad Y_N \approx 0,22.$$

Так, в цьому випадку для визначення потоків I_C і I_N маємо:

$$I_C = (4,57 - Y_N) I_N, \quad I_N = \frac{I_C}{4,57 - Y_N}, \quad (43)$$

тобто у даному випадку (при $b_c \approx 0$) значення α_1 буде складати:

$$\alpha_1 = (\alpha_N - Y_N), \quad \alpha_N = 4,57 \frac{zO_2}{zN} \quad (44)$$

Оскільки вилучення азоту у біоплівці в аеробних умовах контролюється проникненням кисню, то порівняння процесів penetрації в біоплівку забруднень і кисню є найбільш важливим результатом кінетичних досліджень в біоплівках, що дозволяє визначати, який із них буде лімітувати процес утилізації субстрату (азоту). Як зазначалось вище, азот може бути присутній по всій товщині біоплівки, але не може бути вилучений на ділянці, куди не може проникнути кисень, тобто розчинений кисень повинен бути забезпечений в достатній кількості по всій товщині біоплівки. При цьому, як буде показано нижче, швидкість (лімітування) буде визначатись тим субстратом, який проникає в біоплівку на меншу глибину penetрації. В літературі для різних кінетик реакцій з використанням стехіометричних коефіцієнтів обґрунтовано і запропоновано ряд критеріїв. Так, в роботі [1] запропоновано наступні критерії в умовах кінетики реакції нульового порядку. При цьому передбачається, що перетворення в біоплівці згідно з рівнянням (36) обмежуються тільки масообміном, тобто в (36) приймається $b_N = 0$:

а) азот потенційно обмежує процес, але кисень повністю проникає в біоплівку:

$$\frac{N_\delta}{C_\delta} > \frac{1}{\alpha_1} \frac{D_C}{D_N}, \quad (45)$$

б) кисень потенційно обмежений, але азот повністю проникає в біоплівку:

$$\frac{N_\delta}{C_\delta} < \frac{1}{\alpha_1} \frac{D_C}{D_N}. \quad (46)$$

Зіставлення значень потоків I_N і I_C дозволяє також визначати, який із субстратів лімітує конверсійні процеси всередині біоплівки. В якості прикладу в [1], в таблицях, наведені дані відносно глибин penetрації ($\beta_N \delta$) і потоків I_N , одержані при розрахунках для умов кінетики нульового порядку.

Таблиця 1 – Розрахунки лімітуючого компоненту при нітрифікації [1]

Азот	NH_4
D_N	$149 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{доба}$
Кисень	O_2
D_C	$175 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{доба}$
α	$4,57 \frac{zO_2}{zN}$
Y_N	$0,22 \frac{zXPK}{zN}$
Рівняння (46)	$\frac{N_\delta}{C_\delta} > 0,27 \frac{zN}{zO_2}$
Розрахунок при $C_\delta = 8 \frac{\text{мг}O_2}{\text{л}}$	$2,2 \frac{\text{мг}N}{\text{л}}$

Таблиця 2 – Глибини penetрації і потік субстрату, визначені з використанням рівнянь кінетики нульового порядку

C_{δ} , г/м ³	глибини пенетрації, $\beta_C \delta$, мк т	I_{C, O_2} , г/м ² доба	N_{δ} , г/м ³	глибини пенетрації, $\beta_N \delta$, мк т	I_{N, NH_4} , гN/м ² доба
1	42	7,9	1	79	3,4
3	73	13,8	5	177	7,7
5	95	17,8	15	307	13,3
8	120	22,5	70	664	28,7

Так як вилучення субстратів в біореакторах з біоплівкою обмежується масообміном, то потік субстрату і глибина проникнення в біоплівку являються функцією концентрації субстрату на поверхні біоплівки, швидкості реакцій всередині біоплівки і дифузійного масопереносу. В табл. 2 наводяться значення потоків I і глибин проникнення ($\beta_N \delta$) для амонію і кисню при умові кінетики нульових реакцій вилучення азоту і частково проникної біоплівки ($\beta_N \delta$). Із таблиці слідує, що в більшості концентрацій амонію його вилучення обмежується киснем. Крім того, penetрація кисню в біоплівку складає тільки декілька сотень мкм. Тому в роботі [1] в результаті проведеного аналізу робиться висновок, що біоплівки із збільшенням по товщині в основному непридатні для аеробних процесів в них.

У загальному випадку найбільш обґрунтоване рішення цього питання, а саме, який із субстратів є лімітуючим, буде визначатись на основі співвідношення побудованих в біоплівці кривих змін концентрацій N і C і, зокрема, глибини їх проникнення в біоплівку. Цей підхід дозволяє визначати, на якій ділянці по товщині біоплівки і який із субстратів може лімітувати процес вилучення азоту. Зміну концентрації C в біоплівці можна одержати в результаті рішення рівняння (37) при граничних умовах (38), як це зроблено у випадку визначення зміни концентрації азоту N . Для оцінки впливу кисню на вилучення азоту можна також скористатись результатами досліджень, які наведені в спеціальній літературі, зокрема в [5, 17, 18]. Так, в роботі [17] наведені теоретичні і експериментальні дослідження з великою концентрацією амонію в стічній воді біореактора ($250, 500 \frac{мг N - NH_4^+}{л}$) при вилученні

амонію біоплівкою із врахуванням пограничного шару і впливу розчиненого кисню на процес утилізації амонію. В результаті аналізу і оцінки одержаних результатів цих досліджень встановлено наступне:

а) в якості основного параметра при оцінці впливу кисню, який контролює процес окислення амонію до нітритів, було обґрунтовано і запропоновано відношення $O_2/N - NH_4$. На конкретних прикладах показано, що цей параметр може бути кращою альтернативою контролю при нітрифікації в реакторі у порівнянні з концентрацією кисню.

б) в цілому було визначено, що на всій ділянці біоплівки кисень є основним параметром, який контролює і лімітує процес нітрифікації в біоплівці і його кількість залежить від потоку амонію, який надходить в біоплівку. Якщо значення даного відношення в різних точках становить від 0.05 до 0.1, то

відбувається окислення (конверсія) близько 80% поступаючого амонію в нітриту. В цілому, робиться висновок про доцільність його використання в практичних розрахунках.

в) проведений порівняльний аналіз показав, що результати теоретичних досліджень в широкому об'ємі співпадають з даними експериментів. Так як в подальшому ці результати можуть бути використані при розробці інженерних методів розрахунку, то нижче наведено значення деяких основних вихідних параметрів, які були прийняті при проведенні зазначеного порівняльного аналізу. Так, в результаті проведених дослідів за розробленою методикою середня активна товщина біоплівки була визначена рівною $\delta = 102$ мкм при наступних значеннях основних параметрів: коефіцієнти масопереносу через рідинну плівку – амонію $K_N = 0,038 \text{ г/г} \cdot \text{год}^{-1}$ і кисню $K_C = \frac{K_N \delta}{D_C} \approx 0,55$;

ефективний коефіцієнт дифузії кисню в біоплівці $D_C = 0,85 D_{bO_2}$; $D_{bO_2} = 7,54 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{год}$, $D_N = 0,83 D_{bN}$; $D_{bN} = 7,04 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{год}$.

У випадку наявності у стічній воді токсичних та інших речовин швидкість реакції може суттєво зменшуватись за рахунок інгібуючого (тормозного) їх впливу [1, 5, 8]. При цьому, в загальному випадку вплив різних речовин можна враховувати шляхом використання для опису процесу біоокислення замість рівняння Моно відоме рівняння Халдейна, а також інші рівняння кінетик реакцій. В роботі [5] наведені конкретні дані, які дозволяють оцінити інгібуючий вплив різних металів та інших речовин на процеси нітрифікації.

Для одержання практичних методів розрахунку процесів і механізмів, які відбуваються в різних біореакторах при вилученні амонійного азоту N із стічних вод на основі побудови і реалізації запропонованих математичних моделей, розглянемо у якості прикладу для умов достатнього забезпечення процесів вилучення азоту N киснем загальну балансову математичну модель вилучення азоту N в біореакторі-змішувачі, яка має наступний вигляд:

$$W_P \frac{dN_e}{dt} = Q_e(N_0 - N_e) - F_{\delta n} I_N - R_e W_P, \quad (47)$$

Для практичних розрахунків, якщо вилучення азоту N відбувається тільки біоплівкою, рівняння (47) можна значно спростити до вигляду :

$$N_0 - N_e - F_{\delta n} T_e I_N = 0, \quad (48)$$

де $F_{\delta n} = \frac{F_{\delta l}}{W_e}$, $T_e = \frac{W_P}{Q_e}$, $I_N = K_N(N_e - N_{\delta})$.

Звідси, при відомих (заданих) концентраціях N у стічних водах, які надходять в біореактор N_0 , і в очищених стічних водах N_e тривалість реакції T_e буде складати:

$$T_e = \frac{N_0 - N_e}{F_{\delta n} I_N}, \quad (49)$$

де $F_{\delta n}$ – питома площа поверхні біоплівки в біореакторі.

Таким чином, запропонована методика значно спрощує практичні розрахунки при зменшеній кількості вхідних параметрів.

Висновки

Запропоновано методи розрахунку вилучення органічних забруднень і амонійного азоту біоплівкою, які одержані на підставі реалізації побудованих і реалізованих математичних біоплівкових моделей і є достатньо обґрунтованими, і можуть бути використані при розробці відповідних положень і рекомендацій при оцінці сумісної очистки стічних вод в різних біореакторах.

Результати вирішення методичних задач біоочистки чисельними методами, представлені у вигляді графічних матеріалів та спрощених аналітичних залежностей, дозволяють суттєво спростити практичні розрахунки при прогнозуванні процесів очистки стічних вод та проектуванні відповідних очисних споруд.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Henze M., M van Loosdrecht M.E., Ekama G.A., Brdjanovic D. Biological Wastewater Treatment. IWA Publishing, London, 2008. – 511 p.
2. Олейник А.Я., Тетеря А.И. Особенности моделирования процессов удаления органических загрязнений из сточных вод на установках малой производительности. // Прикладная гидромеханика. К., ИГМ НАНУ, 2001, т.3. (75) № 4. – С. 2–27.
3. Lee M.W., Park J.M. One-dimensional mixed-culture biofilm model considering different space occupancies of particulate components. Water Res., 2007, no. 4. – P. 4317–4328.
4. Person F., Wik T., Sorensson F., Hermanson M. Distribution and activity of ammonium bacteria in a large-scale trickling filter. Water Res., 2002. No.36. – P. 1439–1448.
5. Henze M., Harremoës P., Jansen C., Arwin E. Wastewater Treatment. Springer, Berlin, New York, 2002. – 430 p.
6. Gujer W. Nitrification and me – A subjective review. Water Res., no.44, 2010. – P. 1–19.
7. Vayenas D.V., Palvou S., Lyberatos G. Development of a dynamic model describing nitrification in trickling filters. Water Res., 1997, vol. 31, no.5. – P.1135–1147.
8. Beyenal H., Tanyalac A.A. A mathematical model for hollow fiber biofilm reactors. The Chemical Eng. Journal, 1994, no.56. – P. 53–59.
9. Steyer J.-P., Delgenes I.P. Modeling and control of nitrite accumulation in nitrifying biofilm reactor. Biochem. Engin. Journal, 24, 2005. – P. 173–183.
10. Олійник О.Я., Маслун Г.С. Моделювання кисневого режиму в біореакторах при очистці стічних вод. Доповіді НАНУ, № 10, 2010. – С. 52–56.
11. Айрапетян Г.С., Телима С.В., Олійник О.Я. Моделювання кисневого режиму в біореакторах-аеротенках при очистці стічних вод від органічних забруднень. Доповіді НАНУ, № 6, 2017. – С. 21–27.
12. Олійник О.Я., Айрапетян Г.С. Підвищення ефективності біологічного очищення стічних вод в аеротенках за рахунок зваженого і закріпленого біоценозу. Науковий вісник будівництва, Харків, ХНУБА, 2015, № 3 (81). – С. 106–109.
13. Wanner O., Ebert N.I., Rittman B.E. Mathematical modeling of biofilms. Scientific and Technical report, 2006, no.18. – 208 p.
14. Олейник А.Я., Василенко Т.В., Рибаченко С.А., Хамад Ихаб Ахмад. Моделирование процессов доочистки хозяйственных сточных вод на фильтрах. Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. Київ, КНУБА, 2006. вип. 7 – С. 85–97.

15. Олійник О.Я., Колпакова О.А. Моделивання і розрахунки біологічної очистки стічних вод на краплинних біофільтрах. Екологічна безпека та природокористування. К., КНУБА, вип. 16, 2014. – С. 68–86.
16. Perez M., Piccioreanu C., van Loosdrecht M. Modeling biofilm and floss diffusion processes based on analytical solution of reaction – diffusion equations. *Water Res.*, 2005, vol. 39. – P. 1311–1323.
17. Lachner S., Terada A., Horn H., Henze M., Stets B. Nitrification performance in membrane – aerated biofilm reactors differ from conventional biofilm systems. *Water Research*, vol.44, 2010. – P. 6073–6084.
18. Mosquera-Corral A., de Kreuk M.K., Heijnen I.I., van Loosdrecht M.C.M. Effects of oxygen concentration on N-removal in an aerobic granular sludge reactor. *Water Res.*, vol. 39, 2005. – P. 2676–2686.

Стаття надійшла до редакції 21.01.2021 і прийнята до друку після рецензування 28.04.2021

REFERENCES

1. Henze, M., M van Loosdrecht, M.E., Ekama, G.A., & Brdjanovic, D. (2008). *Biological Wastewater Treatment*. London: IWA Publishing.
2. Oleinyk, A.Ya., & Teterja, A.I. (2001). The peculiarities of the modeling of the removing on the organic pollutants from the waste waters on the constructions with a small productivity. *Applied Hydromechanics*, 3 (75) (4), 2-27 (in Russian).
3. Lee, M.W., & Park, J.M. (2007). One-dimensional mixed-culture biofilm model considering different space occupancies of particulate components. *Water Res.*, 4, 4317-4328.
4. Person, F., Wik, T., Sorensson, F., & Hermanson, M. (2002). Distribution and activity of ammonium bacteria in a large-scale trickling filter. *Water Res.*, 36, 1439-1448.
5. Henze, M., Harremoës, P., Jansen, C., & Arwin, E. (2002). *Wastewater Treatment*. Springer, Berlin, New York.
6. Gujer, W. (2010). Nitrification and me – A subjective review. *Water Res.*, 44, 1-19.
7. Vayenas, D.V., Palvou, S., & Lyberatos, G. (1997). Development of a dynamic model describing nitrification in trickling filters. *Water Res.*, 31 (5), 1135-1147.
8. Beyenal, H., & Tanyalac, A.A. (1994). A mathematical model for hollow fiber biofilm reactors. *The Chemical Eng. Journal*, 56, 53-59.
9. Steyer, J.-P., & Delgenes, I.P. (2005). Modeling and control of nitrite accumulation in nitrifying biofilm reactor. *Biochem. Engin. Journal*, 24, 173-183.
10. Oliynyk, O.Ya., & Maslun, G.S. (2010). Modeling of the oxygen regime in the bioreactors at the treatment on the waste waters. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 10, 52-56 (in Ukrainian).
11. Airapetian, T.S., Telyma, S.V., & Oliynyk, O.Ya. (2017). A modeling of the oxygen regime in bioreactors-aerotanks at the purification of waste waters from organic pollutants. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 6, 21-27. Doi: 10.15407/dopovidi2017.06.021(in Ukrainian).
12. Oliynyk, O.Ya., & Airapetian, T.S. (2015). Increasing of the efficiency of biological waste waters cleaning owing to suspended and loaded biocenoses. *Scientific Visnyk of Building*, 3 (81), 106-109 (in Ukrainian).
13. Wanner, O., Ebert, N.I., & Rittman, B.E. (2006). Mathematical modeling of biofilms. *Scientific and Technical report*, 18.
14. Oliynyk, O.Ya., Vasilenko, T.V., Rybachenko, C.A., & Hamid Iha Achmad. (2006). Modeling the processes of additional treatment of the urban-communal waste waters on the filters. *The problems of the water supply, drainage and hydraulic*, 7, 85-97 (in Ukrainian).

15. Oliynyk, O.Ya., & Kolpakova, O.A. (2014). Modeling and calculations of the biological sewage treatment on trickling biofilters. *Environmental safety and natural resources*, 16, 68-86 (in Ukrainian).
16. Perez, M., Piccioreanu, C., & van Loosdrecht, M. (2005). Modelling biofilm and floss diffusion processes based on analytical solution of reaction – diffusion equations. *Water Res.*, 39, 1311-1323.
17. Lachner, S., Terada, A., Horn, H., Henze, M., & Stets, B. (2010). Nitrification performance in membrane – aerated biofilm reactors differ from conventional biofilm systems. *Water Research*, 44, 6073-6084.
18. Mosquera-Corral, A., de Kreuk, M.K., Heijnen, I.I., & van Loosdrecht, M.C.M. (2005). Effects of oxygen concentration on N-removal in an aerobic granular sludge reactor. *Water Res.*, 39, 2676-2686.

The article was received 21.01.2021 and was accepted after revision 28.04.2021

Олійник Олександр Якович

член-кореспондент Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор, завідувачий відділом прикладної гідродинаміки Інституту гідромеханіки НАН України

Адреса робоча: 03057, Україна, м. Київ, вул. М. Капніст, 8/4

Телима Сергій Васильович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту гідромеханіки НАН України

Адреса робоча: 03057, Україна, м. Київ, вул. М. Капніст, 8/4

ORCID ID 0000-0003-0109-0696, **e-mail:** sertelyma@gmail.com

Калугін Юрій Іванович

кандидат фіз.-мат наук, старший науковий співробітник Інституту гідромеханіки НАН України

Адреса робоча: 03057, Україна, м. Київ, вул. М. Капніст, 8/4

e-mail: forkalugin@ukr.net

Олійник Євген Олександрович

провідний інженер Інституту гідромеханіки НАН України

Адреса робоча: 03057, Україна, м. Київ, вул. М. Капніст, 8/4

УДК 504.62:625.8+669:67.08

Viktoriia O. Khrutba¹, D. S., Department of Ecology and Safety of Vital Functions
ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-8121-2042>, **e-mail**: Viktoriia.Khrutba@gmail.com

Julia S. Nikitchenko², PhD, Docent of Department of Environmental Management and Entrepreneurship
ORCID ID <http://orcid.org/0000-0003-1487-641X>, **e-mail**: julia_n_s@ukr.net

Lesya I. Kriukovska¹, PhD, Docent of Department of Ecology and Safety of Vital Functions
ORCID ID <https://orcid.org/0000-0001-8944-8036>, **e-mail**: krjukovska@gmail.com

Vitalina V. Lukianova¹, PhD, Docent of Department of Ecology and Safety of Vital Functions
ORCID ID <http://orcid.org/0000-0001-8964-3560>, **e-mail**: vitalina_lk@i.ua

Oksana V. Spasichenko¹, assistant of Department of Ecology and Safety of Vital Functions
ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-7809-6765>, **e-mail**: o.spasichenko@ntu.edu.ua

¹ National Transport University, Kyiv, Ukraine

² Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine

WAYS OF REDUCTION OF ENVIRONMENTAL RISKS OF SLAG HEAPS OF METALLURGICAL ENTERPRISES, UKRAINE

Abstracts. *The purpose of this work is a quantitative assessment of the level of reduction of environmental risks of slag heaps of metallurgical enterprises with the use of metallurgical slag as an alternative road construction material.*

Methods. *Quantitative analysis of the emergence of the risk of environmental hazard is carried out in accordance with the "Methodology for determining the risks and their adopted levels for the declaration of safety of objects of high danger", which determines the procedure for conducting a hazard analysis and risk assessment of high-risk objects, which is carried out through the definition of the probability of undesirable consequences of accidents on based scripts for their emergence and development. For the risk assessment, a logical-probabilistic hazard response scheme in the form of a "failure tree" is constructed and analyzed, which is a form of an ordered graphical representation of the logical-probabilistic connection of random events that results in an undesirable result. The calculation of road surface design with alternative road-building materials is carried out in accordance with the VBN V.2.3-218-186-2004 "Construction of vehicles. Non-rigid type of road clothes" taking into account the requirements of the GBN V.2.3-218-007: 2012 "Environmental requirements for highways Designing".*

Results. *To determine the main causes of environmental hazards in the dumps of metallurgical combines and the nature of their impact on the environment, a tree of problems has been constructed that allows us to determine the main causes of a high level of environmental hazard and the emergence of hazardous situations, namely, the large volumes of metallurgical waste stored on the territory of dumps. For the dumps around the steel mills in Mariupol a "tree of failure" was built and the probability of occurrence of an ecologically dangerous situation or an accident which is connected with places of storage of metallurgical deposits of PJSC "Azovstal Iron and Steel Works" and PJSC "Mariupol Iron and Steel Works named after Ilyich" is calculated. The risk of the risk of storing slags in the dumps of metallurgical combines of the occurrence of the main event is 0.636. The main*

environmental hazards are the amount of slag and slag dust in the dump area. Design of road clothing with the use of metallurgical slags. The content of metallurgical slag in the proposed designs of the DO reaches 25 ... 32%. The use of metallurgical slags, which are low-toxic waste, that is, waste of Class IV hazard, in road construction will reduce the level of existing environmental risk, provided the metallurgical slags of consumer properties.

Scientific novelty. As a result of the performed research, an effective approach to reduce the environmental risks of slag heats of steel mills was identified through the use of large volumes of slag as an alternative road construction material. The design of road clothing for the construction of roads of different categories and the level of reduction of the ecological risk of the dump impact on the environment and health of the population of the region are determined.

Practical significance. The practical application of the proposed approach was made for slag heaps of the metallurgical combines of Mariupol (Ukraine). The level of ecological safety of the region by reducing the amount of metallurgical slags can be increased by 27-30%, which will allow the company to obtain a total ecological and economic effect in the amount of 1.22 million UAH.

Key words: metallurgical slag; dumps of metallurgical combines; environmental risks; construction of road clothes

В.О. Хрутьба¹, Ю.С. Нікітченко², Л.І. Крюковська¹, В.В. Лук'янова¹,
О.В. Спасіченко¹

¹ Національний транспортний університет, Київ, Україна

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ШЛАКОВИХ ВІДВАЛІВ МЕТАЛУРГІЙНИХ КОМБІНАТІВ, УКРАЇНА

Анотація. Метою цієї роботи є кількісна оцінка рівня зниження екологічних ризиків шлакових відвалів металургійних підприємств при використанні металургійних шлаків як альтернативного дорожньо-будівельного матеріалу.

Методика. Кількісний аналіз виникнення ризику екологічної небезпеки здійснюється за "Методикою визначення ризиків і їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки", яка визначає порядок проведення аналізу безпеки та оцінки ризику об'єктів підвищеної небезпеки, що здійснюється через визначення ймовірності небажаних наслідків аварій на основі сценаріїв їх виникнення та розвитку. Для оцінки ризику побудована та проаналізована логіко-ймовірнісна схема виникнення небезпеки у вигляді "дерева відмов", яке є формою упорядкованого графічного зображення логіко-ймовірнісного зв'язку випадкових подій, що призводять до небажаного результату. Розрахунок конструкції дорожнього одягу (КДО) з альтернативними дорожньо-будівельними матеріалами здійснюємо згідно з ВБН В.2.3-218-186-2004 "Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу" з урахуванням вимог ГБН В.2.3-218-007:2012 "Екологічні вимоги до автомобільних доріг. Проектування".

Результати. Для визначення основних причин екологічних небезпек у відвалах металургійних комбінатів та характеру їх впливу на довкілля побудовано дерево проблем, що дозволяє визначити основні причини високого рівня екологічної небезпеки та виникнення небезпечних ситуацій, а саме великі обсяги металургійних відходів, що зберігаються на території відвалів. Для відвалів навколо металургійних комбінатів м. Маріуполя побудовано "дерево

відмов" та розраховано ймовірність виникнення екологічно-небезпечної ситуації або аварії, які пов'язані з місцями зберігання шлаків металургійних ПрАТ "Металургійний комбінат Азовсталь" та ПрАТ "Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча". Ризик небезпеки збереження шлаків у відвалах металургійних комбінатів виникнення головної події становить 0,636. Основними факторами, що створюють екологічну небезпеку, є наявний обсяг шлаків та шлакового пилу на території відвалу. Розроблено конструкції дорожнього одягу з використанням металургійних шлаків. Вміст металургійного шлаку в запропонованих конструкціях ДО досягає 25...32%. Використання металургійних шлаків, які є малотоксичними відходами, тобто відходами IV класу небезпеки, у дорожньому будівництві дозволить знизити рівень наявного екологічного ризику за умови надання металургійним шлакам споживчих властивостей.

Наукова новизна. В результаті виконаних досліджень було визначено ефективний підхід зниження екологічних ризиків шлакових відвалів металургійних комбінатів за рахунок використання великих обсягів шлаків як альтернативного дорожньо-будівельного матеріалу. Визначено конструкцію дорожнього одягу для будівництва доріг різної категорії та рівень зниження екологічного ризику впливу відвалу на довкілля та здоров'я населення регіону.

Практична значущість. Практичне застосування запропонованого підходу здійснено для шлакових відвалів металургійних комбінатів м. Маріуполя (Україна). Рівень екологічної безпеки регіону за рахунок зменшення обсягу металургійних шлаків може бути підвищений на 27–30%, що дозволить підприємству одержати сумарний еколого-економічний ефект у сумі 1,22 млн грн.

Ключові слова: металургійні шлаки; відвали металургійних комбінатів; екологічні ризики; конструкція дорожнього одягу

DOI: 10.32347/2411-4049.2021.2.39-54

Постановка проблеми

Україна, за даними World Steel Association, зберігає провідне місце по виробництву металопродукції і традиційно займає 11–12 місця в світовому рейтингу [1, 2].

Виробництво металопрокату в Україні сьогодні забезпечується об'єднанням підприємств "Укрметалургпром", головною метою якого є створення сприятливих умов для ефективної роботи та стабільного розвитку гірничо-металургійного комплексу України. За оперативними даними [3], за 12 місяців 2018 р. українськими металургами вироблено: залізородного концентрату 60,32 млн т; агломерату 31,68 млн т; коксу 10,83 млн т; чавуну 20,56 млн т; сталі 21,1 млн т; прокату 18,36 млн т; трубної продукції 1,1 млн т.

В той самий час, металургійне виробництво є одним із найбільших забруднювачів навколишнього середовища. Підприємства чорної металургії генерують близько 15% всіх промислових викидів в атмосферу пилу, 8–10% – викидів діоксиду сірки, 10–15% – загального обсягу споживання води. Викиди від стаціонарних джерел таких підприємств досягають 38% від загальної кількості забруднюючих речовин в Україні. До цього слід додати величезну кількість твердих промислових відходів (шлаків, шлаків тощо) [4, 5]. Відходи металургії утворюються вже на стадії видобутку руди. Існуючі технології не можуть забезпечити ефективну переробку природних ресурсів, внаслідок чого понад 90% їх потрапляє у відходи. Площі, які займають кар'єри, розрізи,

відвали, хвостосховища, шлаконакопичувачі, терикони, сміттєзвалища, складають понад 10% від загальної території України. За даними В.Д. Рудь, І.В. Савюк, Л.М. Самчук, Ю.С. Повстяна [6, 7], на металургійних підприємствах України накопичено понад 240 млн т шлаків.

Шлакові відвали відходів чорної та кольорової металургії, гірничо-збагачувальних комбінатів завдають серйозної шкоди довкіллю і здоров'ю людини. Вони займають величезні площі, забруднюють токсичними сполуками ґрунти, водний і повітряний басейни, підвищують собівартість готової продукції підприємств із-за значних витрат на їх транспортування, розміщення і зберігання. В той самий час, відходи металургійних виробництв можуть бути використані як сировина і матеріали для будівництва або капітального ремонту доріг, що зможе суттєво зменшити рівень екологічних ризиків їх негативного впливу на довкілля та здоров'я людини. Отже, визначення шляхів зниження екологічних ризиків шлакових відвалів металургійних комбінатів є дуже актуальним.

За сучасних умов інтенсифікація темпів дорожнього будівництва потребує пошуку альтернативних аналогів природним будівельним матеріалам. До них відносять і шлакові матеріали, які є відходами металургійного виробництва. Застосування металургійних шлаків як заміника природних будівельних матеріалів у дорожньому будівництві є одним з основних напрямків зниження матеріаломісткості цього масового багатотоннажного виробництва [8].

Таким чином, актуальним та перспективним є напрям зниження рівня екологічних ризиків шлакових відвалів металургійних комбінатів за рахунок їх використання у дорожньому будівництві, що передбачає суттєве зменшення кількості шлаків у відвалах, отже, зниження їх впливу на довкілля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанню підвищення рівня екологічної безпеки при поводженні з відходами металургійних підприємств присвячено багато наукових досліджень.

Екологічні наслідки впливу шлакових відвалів на довкілля досліджуються в роботах багатьох науковців. Більшість шлаків містять домішки токсичних елементів, таких як As, Pb, Cd, Co, Cr або Ni та ін. (В.С. Лесовик, М.С. Агеева, А.В. Іванов). Однак, оскільки ці речовини можуть вимиватися зі шлаків, то екологічні ризики не завжди можливо виключити [9].

Ефективні методи управління відходами металургійного виробництва представлено в дослідженнях Т.Г. Данилової [10]. Автором досліджено вплив компонентів шлаку на здоров'я населення, що проживає в зонах шлакових відвалів та працюючих на промислових підприємствах, зайнятих на виробництвах з обслуговування відходів металургійного виробництва, систематизовані види захворювань у залежності від впливу компонентів у шлаку. Визначено межі екологічного ризику для ефективного управління ним.

В дослідженнях Ю.Т. Котова, Ф.С. Разкевич, К.В. Гончарова проведено аналіз утворення відходів металургійного виробництва і розробка методів їх повторного використання на ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг" [11]. В роботах [12, 13] проаналізовано екологічні ризики та екологічну небезпеку впливу шлакових відвалів на навколишнє середовище, запропоновано метод переробки, який дає змогу зменшувати нагромадження їх та, відповідно, підвищувати рівень екологічної безпеки об'єкта, регіону. В [14] визначено

показники екологічної безпеки проектів використання відходів як дорожньо-будівельного матеріалу.

Проте, подальшого дослідження потребує питання визначення рівня зменшення екологічного ризику для відвалів металургійних комбінатів при використанні великих їх обсягів як альтернативного дорожньо-будівельного матеріалу.

Мета статті

Метою цієї роботи є кількісна оцінка рівня зниження екологічних ризиків шлакових відвалів металургійних підприємств при використанні металургійних шлаків як альтернативного дорожньо-будівельного матеріалу. Практичне застосування запропонованого підходу здійснено для шлакових відвалів металургійних комбінатів м. Маріуполя (Україна).

Методика дослідження

Найбільш розвинутими методами оцінки впливу підприємства на довкілля є: економічний аналіз природоохоронної діяльності; еколого-економічні методи досліджень; оцінка технологічних змін у виробництві; аналіз альтернативної вартості природоохоронних заходів; витрати, що пов'язані з вартістю відновлення здоров'я та лікування [15]. Критерії "екологічного ризику" оцінюють екологічну безпеку через ймовірність виникнення аварії і величину збитку. Для кількісного аналізу виникнення ризику екологічної небезпеки можна використати "Методику визначення ризиків і їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки" [16], яка визначає порядок проведення аналізу небезпеки та оцінки ризику об'єктів підвищеної небезпеки. Методика полягає у визначенні ймовірності небажаних наслідків аварій на основі сценаріїв їх виникнення та розвитку. Критерії "екологічного ризику" оцінюють екологічну безпеку через ймовірність виникнення аварії і величину збитку. Оцінка ризику може виконуватися побудовою та аналізом логіко-ймовірнісної схеми виникнення небезпеки у вигляді "дерева відмов", яке є формою упорядкованого графічного зображення логіко-ймовірнісного зв'язку випадкових подій, що призводять до небажаного результату. Базисні події поєднуються між собою логічними елементами, які інформують про результат події. "І" – вихідна подія відбувається, якщо всі вхідні події трапляються одночасно. "АБО" – вихідна подія відбувається, якщо трапляється будь-яка з вхідних подій. Вираз для визначення ймовірності настання головної події в разі логічного символу "І" має вигляд:

$$P_I = P_{II} P_{III} \cdot \quad (1)$$

Якщо вхідні події поєднуються знаком "АБО", то результуюча подія можлива, коли відбудеться хоча б одна (будь-яка) з вхідних подій. Вираз для визначення ймовірності настання головної події в разі логічного символу "АБО":

$$P_I = 1 - (1 - P_{II})(1 - P_{III}). \quad (2)$$

Розрахунок конструкцій дорожнього одягу (КДО) з альтернативними дорожньо-будівельними матеріалами здійснюємо згідно з ВБН В.2.3-218-186-2004 "Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу" [17] з урахуванням вимог ГБН В.2.3-218-007:2012 "Екологічні вимоги до автомобільних доріг. Проектування" [18].

Результати та їх обговорення

У більшості відвалів металургійних комбінатів шлакові відходи складаються переважно без спеціальної обробки і, найчастіше, займають до 40% території підприємства. Шкідливий вплив здійснюється на здоров'я як населення прилеглих територій, так і працівників підприємства. Вплив на здоров'я працюючих пов'язаний з утворенням газів та парів летких легкоплавких компонентів, гарячого пилу тощо. Вплив на здоров'я населення пов'язаний з впливом гарячого пилу, летких компонентів і газів при зливі шлаку у відвал, постійною газацією відвалу, систематичним подрібненням шлаку, виділенням пилу, вторинною газацією. Все це викликає захворювання дихальних шляхів і очей [14].

Шлаки, вивезені у відвали, не тільки займають великі території культурних земель, але і є причиною забруднення повітряного і водного басейнів. Здійснюється постійний вплив процесів вітрової ерозії, розмивання поверхні відвалу опадами, попадання шкідливих речовин в поверхневий пригрунтовий шар, в ґрунтові води, водоймища тощо.

При хімічному вивітрюванні шлакових мінералів, у тому числі сульфідів і нітридів, у водному середовищі відбувається різке підвищення рН, з'являються такі сполуки, як сірководень, нітрити, нітрати, можливо, аміак, деякі метали, вміст яких у водному середовищі лімітується екологічними нормативами. Скрізь, де є металургійні шлаки, у водоймах накопичуються води з надзвичайно високою концентрацією сульфідів, які іноді прориваються в струмки і річки, в результаті рукотворних паводків, що призводить до сильного забруднення та виникнення техногенних аварій. Кисень у воді витрачається на окислення сульфідів, вміст кисню в даних сульфідних водоймах стає рівним нулю, і це призводить до загибелі живих організмів [19].

Основні види впливу відходів металургійних підприємств на НС наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні впливи шлакових відвалів на довкілля

Ґрунти та ландшафт	Водоймища та ґрунтові води	Атмосфера	Фізичні	Соціальні
Порушення ландшафту, порушення рівноваги геологічного, фізичного та механічного стану	Зміна гідрологічного режиму прилеглих територій	Пило-газове забруднення атмосфери	Шумовий та вібраційний вплив на флору і фауну прилеглих територій	Створення підвищеної небезпеки на здоров'я населення, що проживає в зонах шлакових відвалів
Хімічне і радіаційне забруднення ґрунтів та вод, вимивання та видування шкідливих компонентів				

Дерево проблем, яке визначає основні причини екологічних небезпек у відвалах металургійних комбінатів та характеризує їх вплив на довкілля (рис. 1), дозволяє встановити, що основною причиною високого рівня екологічної небезпеки та виникнення небезпечних ситуацій є великі обсяги металургійних відходів, які зберігаються на території відвалів.

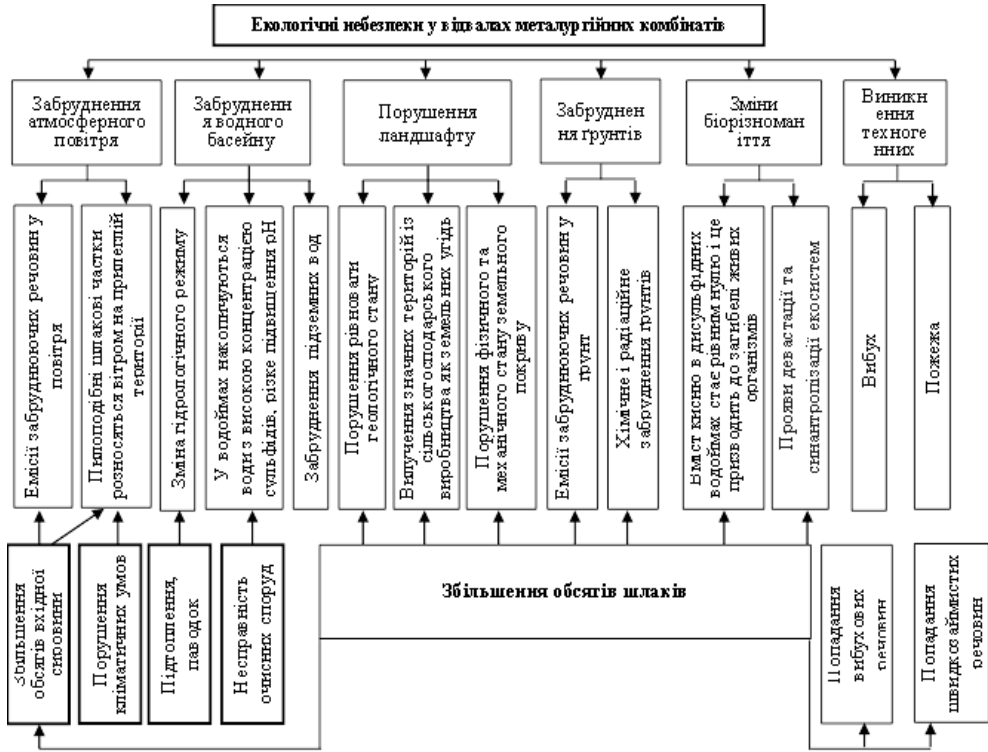


Рис. 1 – Дерево проблем впливу відвалів металургійних шлаків на навколишнє середовище

Для оцінки очікуваного ризику в роботі використовували фрагмент розробленого "дерева подій". Для відвалів навколо металургійних комбінатів м. Маріуполя побудовано "дерево відмов", як графічне зображення логіко-ймовірнісного зв'язку випадкових подій, що призводять до небажаного результату (рис. 2). Розрахунок локальних екологічних ризиків від збереження шлаків у відвалах здійснювався на основі статистичних даних Департаменту екології та природних ресурсів Донецької обласної державної адміністрації [20]. Об'єктами екологічної небезпеки в м. Маріуполь, які загрожують національній безпеці, економіці, здоров'ю або безпеці життєдіяльності населення, визнано ПрАТ "Металургійний комбінат Азовсталь" та ПрАТ "Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча". Ці підприємства є основними накопичувачами промислових відходів.

Станом на 31.12.2017 загальний обсяг накопичених відходів ПрАТ "Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча" складав 35 856,73 тис. т, а ПрАТ "Металургійний комбінат Азовсталь" – 45 722,64 тис. т. 39% всіх відходів ПрАТ "Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча" припадає на шлаки доменні, з яких 3864,81 тис. т

зберігається на підприємстві, а 14 069,48 тис. т – у місцях зберігання відходів. Шлаки доменні ПрАТ "Металургійний комбінат Азовсталь" складають 64% всіх відходів підприємства, а саме 29 317,82 тис. т, які зберігаються у місцях видалення відходів.

Характеристика місць видалення відходів ПрАТ "Металургійний комбінат Азовсталь" та ПрАТ "Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча" представлена в табл. 2.

Таким чином, загальна кількість фактично накопичених відходів станом на 01.01.2018 від діяльності ПрАТ "Металургійний комбінат Азовсталь" та ПрАТ "Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча" становить 91 142,1 тис. т. Ці відходи займають площу 281,39 га. Отже, на 1 га знаходиться 323,9 тис. т відходів. Рівень утилізації відходів за 2017 рік складає 22,4% від утворених. Загальна кількість доменних шлаків 43 387,3 тис. т, що складає 47,6% від загальної кількості відходів. Шлаки доменні займають площу 134 га.

Таблиця 2 – Характеристика місць видалення відходів металургійних комбінатів м. Маріуполя

№ з/п	Назва місця видалення відходів (за наявності), місце розташування	Режим функціонування	Координати об'єкта (формат WGS84)		Фактично накопичено на 1.01.2018, тис. т	Фактична площа, га
			географічна широта	географічна довгота		
ПрАТ "Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча"						
1	Грековата. на північ від с. Приморське	Діюче	47.203481	37.669196	28722,35	177,4 4
2	Старо-Кримський кар'єр	Закрите	47.174766	37.506243	2240,60	7,2
3	Шламонакопичувач №1 цеху холодної прокатки	Діюче	47.180159	37.544554	1523,175	12
4	Шламонакопичувач №2 цеху холодної прокатки	Закрите	47.178522	37.549647	60,00	1,8
ПрАТ "Металургійний комбінат Азовсталь"						
5	Склади (відвали) у південно-східній частині комбінату	Діюче	47.090497	37.613877	29802,47	49,8
6	Звалище промислов. відходів на території комбінату	Діюче	47.094171	37.612577	5154,73	14,4
7	Шламонакопичувач в акваторії Азовського моря	Діюче	47.089047	37.599855	1600,47	56
8	Золонкопичувач в акваторії Азовського моря	Діюче	47.083478	37.589046	9536,00	53,5
9	Акваторія захисної дамби	Законсервов.	47,084894	37,607615	12331,80	79,19
10	Накопичувач хімічних відходів	Закрите	47.188446	37.674731	170,50	7,5
Загалом					91142,1	281,39

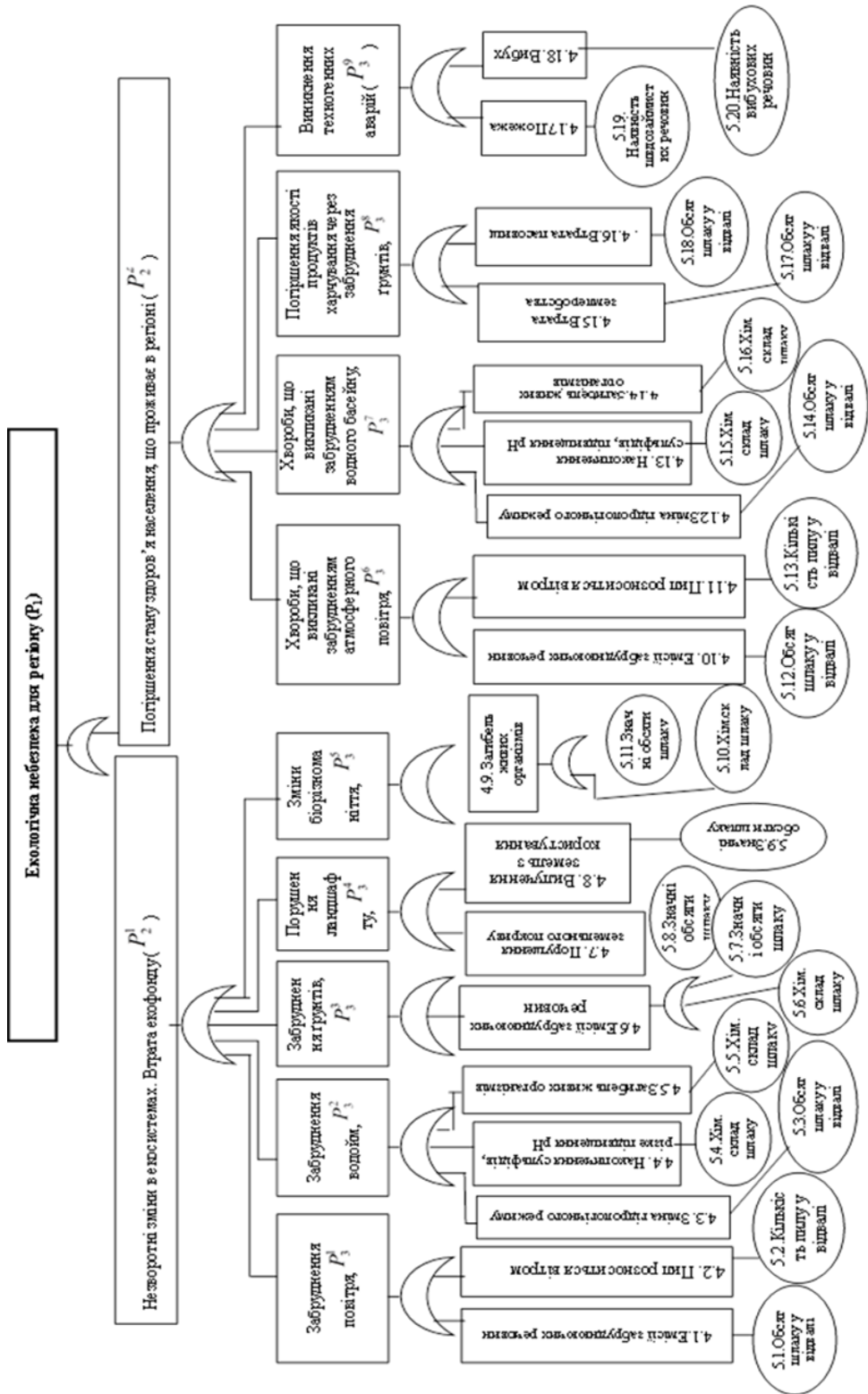


Рис. 2 – Логічний вираз “дерева відмов” для визначення рівня екологічного ризику впливу відвалів металургійних шлаків м. Маріуполь

Полігони для зберігання відходів металургійних комбінатів ПрАТ "Металургійний комбінат Азовсталь" та ПрАТ "Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча" розташовані поблизу зон проживання населення м. Маріуполя (0,5 км від житлового масиву "Найденівка", 1,65 км від ж/м "Слободка"). Відстань до Азовського моря від місць видалення відходів – 0,04–0,6 км. До гирла р. Кальміус – 1,0–1,5 км. До р. Кальчик – 0,17 км. Річки та озера, які знаходяться поблизу шлакосховищ, забруднені і перетворені в сховища із забрудненою водою, в якій концентрація сульфідів досягає 1 г/л.

Все це створює значні ризики та небезпеки для здоров'я людей та навколишнього середовища. Для кількісної оцінки ризику було складено логічний вираз у вигляді "дерева відмов", що пов'язує ймовірність головної події з ймовірностями основних подій (рис. 2).

Позначимо головну подію, яка характеризує рівень екологічного ризику та небезпеки від впливу відвалів металургійних комбінатів для регіону, як P_1 . Подіями другого рівня є незворотні зміни в екосистемах і втрата екофонду (P_2^1) та погіршення стану здоров'я населення, що проживає в регіоні (P_2^2). Небезпека наявна від кожної з цих подій. Отже, в логічній схемі використовується оператор "АБО". Ймовірність виникнення подій третього рівня позначаємо як $P_3^1 - P_3^9$. Кожна з них може викликати одну з подій другого рівня. Позначимо події четвертого рівня як $P_4^1 - P_4^{18}$ (4.1 – 4.18). П'ятого – $P_5^1 - P_5^{20}$ (5.1 – 5.20). Нумери подій представлені в "дереві відмов" – рис. 2.

Логіка всіх подій передбачає використання в логічній схемі оператора "АБО". Для розрахунку ймовірності виникнення головної події – небезпечної ситуації з високим рівнем екологічної небезпеки у відвалах металургійних комбінатів використовували формули (1–2).

На основі зібраних даних про ймовірність реалізації елементарних подій у "дереві відмов" для логіко-ймовірнісної моделі відмов, отриманої в процесі аналізу (рис. 2), було розраховано ймовірність виникнення екологічно небезпечної ситуації або аварії, пов'язаної з місцями зберігання шлаків металургійних ПрАТ "Металургійний комбінат Азовсталь" та ПрАТ "Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча".

Для початкових подій п'ятого рівня необхідно визначити ймовірність їх реалізації. Для цих цілей використовуємо інформацію, що міститься в технічній документації та базах даних металургійних комбінатів, у довідковій чи нормативній літературі та статистичних даних щодо охорони праці Маріупольської міської ради та Департаменту екології та природних ресурсів Донецької обласної державної адміністрації. Ймовірність реалізації початкових подій п'ятого рівня представлена множиною:

$$P_5^i = (0,06; 0,089; 0,025; 0,035; 0,105; 0,084; 0,042; 0,051; 0,042; 0,072; 0,098; 0,074; 0,008; 0,006; 0,035; 0,036; 0,027; 0,045; 0,036; 0,03), \\ i = 1, 20.$$

Визначення ймовірності виникнення подій четвертого рівня:

$$P_4^1 = P_5^1 = 0,06; P_4^2 = P_5^2 = 0,089; P_4^3 = P_5^3 = 0,025; \\ P_4^4 = P_5^4 = 0,035; P_4^5 = P_5^5 = 0,105; P_4^6 = 1 - (1 - P_5^6)(1 - P_5^7) = 0,122; \\ P_4^7 = P_5^8 = 0,051;$$

$$P_4^8 = P_5^9 = 0,042; P_4^9 = 1 - (1 - P_5^{10})(1 - P_5^{11}) = 0,163; P_4^{10} = P_5^{12} = 0,074;$$

$$P_4^{11} = P_5^{13} = 0,008; P_4^{12} = P_5^{14} = 0,006;$$

$$P_4^{13} = P_5^{15} = 0,035; P_4^{14} = P_5^{16} = 0,036; P_4^{15} = P_5^{17} = 0,027; P_4^{16} = P_5^{18} = 0,045;$$

$$P_4^{17} = P_5^{19} = 0,036; P_4^{18} = P_5^{20} = 0,03.$$

Розрахунок ймовірності виникнення подій третього рівня:

$$P_3^1 = 1 - (1 - P_4^1)(1 - P_4^2) = 0,144; \quad P_3^2 = 1 - (1 - P_4^3)(1 - P_4^4)(1 - P_4^5) = 0,138;$$

$$P_3^3 = P_3^6 = 0,122; \quad P_3^4 = 1 - (1 - P_4^7)(1 - P_4^8) = 0,91;$$

$$P_3^5 = P_3^9 = 0,163; \quad P_3^6 = 1 - (1 - P_4^{10})(1 - P_4^{11}) = 0,81;$$

$$P_3^7 = 1 - (1 - P_4^{12})(1 - P_4^{13})(1 - P_4^{14}) = 0,075; \quad P_3^8 = 1 - (1 - P_4^{15})(1 - P_4^{16}) = 0,071;$$

$$P_3^9 = 1 - (1 - P_4^{17})(1 - P_4^{18}) = 0,065.$$

Розрахунок ймовірності виникнення подій другого рівня:

$$P_2^1 = 1 - (1 - P_3^1)(1 - P_3^2)(1 - P_3^3)(1 - P_3^4)(1 - P_3^5) = 0,507;$$

$$P_2^2 = 1 - (1 - P_3^6)(1 - P_3^7)(1 - P_3^8)(1 - P_3^9) = 0,262.$$

Ймовірність виникнення головної події становить $P_1^1 = 1 - (1 - P_2^1)(1 - P_2^2) = 0,636.$

Узагальнення результатів досліджень [22, 23] показали, що для всіх металургійних комбінатів шлакові матеріали зможуть забезпечити необхідну якість дорожнього матеріалу та необхідний модуль пружності 350–450 МПа. Це дозволяє використовувати цей матеріал в КДО. Заміна природного матеріалу на відходи металургійних комбінатів не знижує міцнісні характеристики дорожнього полотна.

Для впровадження одержаних результатів та проектування конструкції дорожнього одягу з альтернативним дорожньо-будівельним матеріалом обрано ділянку дороги I категорії на 173,1–199,4 км траси Київ–Одеса довжиною 26 км з 4 смугами руху (рис. 3). Дорога проходить у V–III дорожньо-кліматичній зоні. Термін експлуатації дорожнього одягу 11 років.

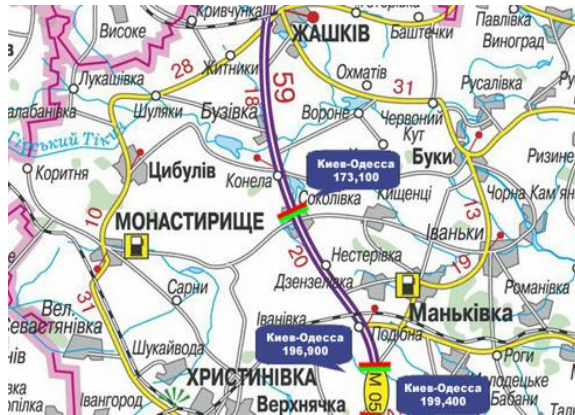


Рис. 3 – Схема АД "Київ–Одеса"

Запропонована КДО з використанням в основі в основі шлакового щебеню має такий склад (табл. 3).

Таблиця 3 – КДО з використанням в основі шлакового щебеню

№ п/п	Матеріал, що використовується для КДО	Розмір шару, см
1	Асфальтобетон щільний на бітумі БНД – 40/60	9
2	Асфальтобетон пористий на бітумі БНД – 60/90	6
3	Асфальтобетон пористий на бітумі БНД – 90/130	7
4	Гравійно-піщана суміш неоптимального складу, укріплена цементом I класу міцності	14
5	Щебінь шлаковий	20
6	Щебінь рядовий гранітний фракції 0–70	10

Результати розрахунку конструкцій дорожнього одягу показали, що запропонована конструкція відповідає вимогам ВБН В.2.3-218-186-2004 [18], тобто є міцною і може бути застосована при будівництві. Розрахунки показують, що вміст металургійного шлаку в запропонованих КДО досягає 25...32%. Для доріг I категорії можна використати 30%–32% металургійних шлаків в КДО, для доріг II категорії – 27%–29% та для доріг III категорії – 25%–26% (рис. 4). При цьому, під час будівництва 1 км дороги з використанням металургійних шлаків як заміника природних матеріалів у КДО може звільнитись $15,5 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ обсягу шлакового відвалу. Для всієї досліджуваної дороги цей обсяг складає $2,68 \cdot 10^6$ – $3,09 \cdot 10^6 \text{ м}^3$. В цьому випадку рівень екологічного ризику буде визначатись ймовірністю виникнення головної події і дорівнювати 0,4452–0,4643. Рівень екологічної безпеки регіону за рахунок зменшення обсягу металургійних шлаків може бути підвищений на 27–30%, що дозволить підприємству одержати сумарний еколого-економічний ефект у сумі 1,22 млн грн.

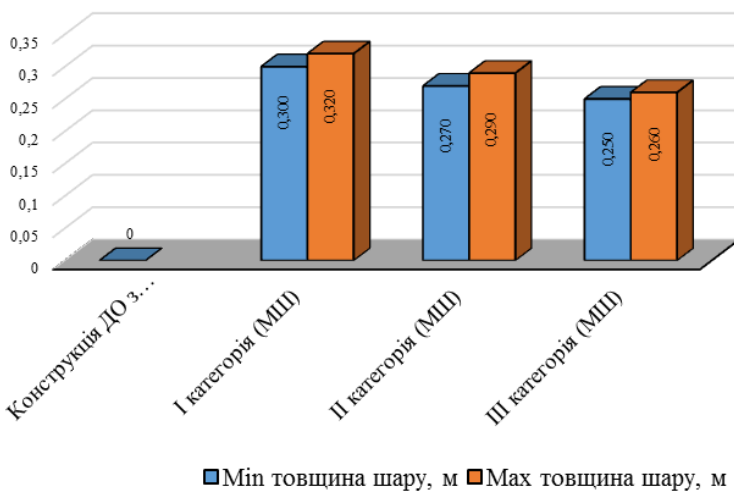


Рис. 4 – Порівняльний аналіз екологічного критерію при заміні природних матеріалів металургійними шлаками для різних категорій доріг

Висновки

Таким чином, на основі зібраних даних про імовірність реалізації елементарних подій у "дереві відмов" для логіко-ймовірнісної моделі відмов, отриманої в процесі аналізу, розраховано ймовірність виникнення екологічно небезпечної ситуації або аварії, пов'язаної з місцями зберігання шлаків металургійних ПрАТ "Металургійний комбінат Азовсталь" та ПрАТ "Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча". Ризик небезпеки збереження шлаків у відвалах металургійних комбінатів виникнення головної події становить 0,636. Основними факторами, що створюють екологічну небезпеку, є наявний обсяг шлаків та шлакового пилу на території відвалу. Розроблено конструкції дорожнього одягу з використанням металургійних шлаків. Вміст металургійного шлаку в запропонованих КДО досягає 25...32%. Використання металургійних шлаків, які є малотоксичними відходами, тобто відходами IV класу небезпеки, у дорожньому будівництві дозволить знизити рівень наявного екологічного ризику за умови надання металургійним шлакам споживчих властивостей. Рівень екологічної безпеки регіону за рахунок зменшення обсягу металургійних шлаків може бути підвищений на 27–30%, що дозволить підприємству одержати сумарний еколого-економічний ефект у сумі 1,22 млн грн.

Назва і номер проекту

Дослідження були виконані в рамках науково-дослідних тематик: "Розробка технологій поводження з відходами в транспортно-дорожньому комплексі", реєстраційний номер 0107U009610, 2010 р. та "Удосконалення та розробка методів екологічної безпеки та безпеки життєдіяльності" реєстраційний номер 0118U001109, 2017–2018 рр.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. World Steel Association. Режим доступу: <https://www.worldsteel.org/>
2. World Steel in Figures 2018 now available. Режим доступу: <https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2018/world-steel-in-figures-2018.html>
3. Укрметалургпром. Аналітичні дані. Режим доступу: <http://www.ukrmetprom.org/analitichni-dani/>
4. Фещенко О. Л. Оцінка впливу діяльності металургійних підприємств на навколишнє природне середовище України / О. Л. Фещенко, Н. В. Каменева // Інвестиції: практика та досвід. – 2016. – № 2. – С. 28–32. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ipd_2016_2_8.
5. Большина Е.П. Экология металлургического производства: учебн. пособ. / Е.П. Большина. – Новотроицк: НФ НИТУ "МИСиС", 2012. – 155 с.
6. Рудь В. Аналіз кількості утворених відходів машинобудування та металургії на території України / В. Рудь, І. Савюк, Л. Самчук, Ю. Повстяна // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2015. – № 3. – С. 130–136. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tstub_2015_3_20.
7. Н.Н. Рулев, В.Я. Королев, В.В. Лукьянова, О.В. Кравченко / Ультрафлокуляция – как метод повышения эффективности процесса извлечения тонкодисперсного угля из хвостов обогащения // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2010. – Вип. 40(81). – С. 119–125. – Режим доступу: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/152981>
8. Крюковська Л.І., Хрутьба В.О. Математичне моделювання властивостей металургійних шлаків як дорожньо-будівельного матеріалу / Л.І. Крюковська,

- В.О. Хрутьба // Науково-технічний збірник "Автомобільні дороги і дорожнє будівництво" – 2017. – Вип. 100. – С. 97–104. – Режим доступу: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/100/097-104.pdf
9. Лесовик В.С. Гранулированные шлаки в производстве композиционных вяжущих / В.С. Лесовик, М.С. Агеева, А.В. Иванов. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 29–32.
10. Данилова Т.Г. Підвищення екологічної безпеки при поводженні з відходами металургійного виробництва. – Дис...канд.техн.наук: 21.06.01 – "Екологічна безпека". – Приазовський технічний ун-т, Маріуполь, 2004 – 200 с.
11. Котов Ю.Т. Аналіз утворення відходів металургійного виробництва і розробка методів їх повторного використання на ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг" / Ю.Т. Котов, Ф.С. Разкевич, К.В. Гончарова // Гірничий вісник. – 2012. – Вип. 95. – С. 232–236. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/girvi_2012_95_63
12. Єгоров К.В. Аналіз відходів металургійного виробництва. Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра. 2010, С. 193–196. Режим доступу: http://www.fhotm.kpi.ua/sworks/05/egorov_article_2010.pdf
13. Каут О.В. Галузь чорної металургії як середовище виникнення ризиків / О.В. Каут // Стратегічні пріоритети. – 2015. – № 2. – С. 79–86. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sra_2015_2_12.
14. Хрутьба В.О. Вайганг Г.О., Крюковська Л.І. Визначення показників екологічної безпеки проектів використання відходів як дорожньо-будівельного матеріалу Науковий журнал "Технічний аудит та резерви виробництва", № 4, 2015, С. 64–71. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.47724
15. Мальований М.С., Шмандій В.М., Харламова О.В. і ін. Аналіз та систематизація існуючих методів оцінювання ступеня екологічної небезпеки // Екологічна безпека. – 2013. – No 1(15). – С. 37–44 – Режим доступу: [http://www.kdu.edu.ua/EKB_jurnal/2013_1\(15\)/Pdf/37.pdf](http://www.kdu.edu.ua/EKB_jurnal/2013_1(15)/Pdf/37.pdf)
16. Методика визначення ризиків і їх прийнятих рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0637203-02>
17. ВБН В.2.3-218-186-2004 Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу. Режим доступу: https://dnaop.com/html/40602/doc%D0%92%D0%91%D0%9D_%D0%92.2.3-218-186-2004
18. ГБН В.2.3-218-007:2012 Екологічні вимоги до автомобільних доріг. Проектування. Київ. Державне Агентство автомобільних доріг України. (Укравтодор). 2012. – 46 с. – Режим доступу: <http://kbu.org.ua/assets/app/documents/dbn2/122.1..pdf>
19. Делеган-Кокайко С.В., Слабкий Г.О., Лук'янова В.В., Анпілова Є.С. Вплив сміттєзвалищ на показники захворюваності сільського населення та поширеності серед нього хвороб. – Ecological safety and natural resources. – К., 2020. – №2 (34) – С. 43–52. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.2.43-52>
20. Department of Ecology and Natural Resources of Donetsk Regional State Administration <http://ecology.donoda.gov.ua/>
21. Екологічний паспорт Донецької області Донецька обласна державна військово-цивільна адміністрація. 2017 р. – 196 с. <http://ecology.donoda.gov.ua/stan-dovkillya/ekologichnij-pasport/>
22. Крюковська Л.І. До оцінювання властивостей дорожнього одягу з використанням в конструкції альтернативних матеріалів / Л.І. Крюковська // Вісник Національного транспортного університету. – 2010. – № 20. – С. 233–237. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu_2010_20_42.
23. Хрутьба В.О. Систематизація конструкцій дорожнього одягу нежорсткого типу з використанням альтернативних матеріалів / В.О. Хрутьба, Л.І. Крюковська // Вісник Національного транспортного університету. – 2012. – № 25. – С. 400–404.

Стаття надійшла до редакції 05.03.2021 і прийнята до друку після рецензування 24.05.2021

REFERENCES

1. World Steel Association. Retrieved from: <https://www.worldsteel.org/>
2. World Steel in Figures 2018 now available. Retrieved from: https://www.worldsteel.org/media_centre/press-releases/2018/world-steel-in-figures-2018.html
3. Ukrmetallurgprom. Analytical data. Retrieved from: <http://www.ukrmetprom.org/analitichni-dani/> (in Ukrainian).
4. Feshhenko, O., & Kameneva, N. (2016). Assessment of the impact of the activities of metallurgical enterprises on the environment in Ukraine. *Investytsiyyi: praktyka ta dosvid*, 2, 28-32. http://nbuv.gov.ua/UJRN/ipd_2016_2_8 (in Ukrainian).
5. Bolshina, E.P. (2012). *Ecology of metallurgical production: a manual*. Novotroitsk: NF NITU "MISiS" (in Russian).
6. Rud', V., Saviuk, I., Samchuk, L., & Povstyana, Y. (2015). Analysis of the amount of generated waste of mechanical engineering and metallurgy on the territory of Ukraine. *Visnyk Ternopil's'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu*, 79, 3, 130-136. http://nbuv.gov.ua/UJRN/tstub_2015_3_20 (in Ukrainian).
7. Rulyov, N.N., Korolyov, B.Y., Lukianova, V.V., & Kravtchenko, O.V. (2010). Ultraflocculation – as a method of increasing the efficiency of the process of extracting finely dispersed coal from the tailings. *Zbagachennyya korisnykh kopalin: Nauk.-tekhn. zb.*, 40 (81), 119-125. <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/152981> (in Russian).
8. Khrutba, V.A., & Kriukovska, L.I. (2017). Mathematical modeling of properties of metallurgical slags as road-building material. *Scientific and technical journal "Automobile roads and road construction"*, 100, 97-104. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/100/097-104.pdf (in Ukrainian).
9. Lesovik, V.S., Agaev, M.S., & Ivanov, A.V. (2011). Granulated slags in the production of composite binders. *Vestnik BSTU them. Im. Shukhov*, 3, 29-32 (in Russian).
10. Danilova, T. G. (2004). *Increase of ecological safety at handling of metallurgical waste*. (dissertation). Priazovsky Technical University, Mariupol, Ukraine (in Ukrainian).
11. Kotov, Yu.T., Razkevich, F.S., & Goncharova, K.V. (2012). Analysis of the formation of waste metallurgical production and development of methods for their re-use at PJSC "ArcelorMittal Krivoy Rog". *Mining Bulletin*, 95, 232-236. http://nbuv.gov.ua/UJRN/girvi_2012_95_63 (in Ukrainian).
12. Egorov K.V. (2010) Metallurgical Waste Analysis. *Special Metallurgy: Yesterday, Today, Tomorrow*, 193-196. http://www.fhotm.kpi.ua/sworks/05/egorov_article_2010.pdf
13. Kaut, O.V. (2015). Steel industry as a lane environment. *Strategic priorities*, 2 (35), 79-86. http://nbuv.gov.ua/UJRN/spa_2015_2_12 (in Ukrainian).
14. Khrutba, V., Weigang, G., & Krukovskaja, L. (2015). Determining the indicators of environmental safety of projects using waste as a road construction material. *Technology audit and production reserves*, 4/4 (24), 64-71. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.47724 (in Ukrainian).
15. Malovanyy, M., Shmandiy, V., Kharlamova, O., Chelyadin, L., & Sakalova, G. (2013). Analysis and systematization of existent methods of degree of ecological danger. *Ecological safety*, 1 (15), 37-44. [http://www.kdu.edu.ua/EKB_jurnal/2013_1\(15\)/Pdf/37.pdf](http://www.kdu.edu.ua/EKB_jurnal/2013_1(15)/Pdf/37.pdf) (in Ukrainian).
16. Methodology for determining the risks and their adopted levels for declaring the safety of high-risk objects. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0637203-02>
17. VBN B.2.3-218-186-2004 Constructions of transport. Non-rigid type of road clothes. Retrieved from: https://dnaop.com/html/40602/doc-%D0%92%D0%91%D0%9D_%D0%92.2.3-218-186-2004
18. GBN B.2.3-218-007:2012. (2012). Ecological requirements for highways. Designing. Kiev. State Agency of Motor Roads of Ukraine. (Ukravtodor). <http://kbu.org.ua/assets/app/documents/dbn2/122.1..pdf>

19. Delegan-Kokayko, S.V., Slabkiy, G.O., Lukianova, V.V., & Anpilova, E.S. (2020). Influencing smittusvalisch on indicators of sickness of the Silskoe population and the wideness of the middle ailment. *Ecological safety and natural resources*, 2 (34), 43-52. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.2.43-52> (in Ukrainian).
20. Department of Ecology and Natural Resources of Donetsk Regional State Administration Retrieved from: <http://ecology.donoda.gov.ua/>
21. Ecological passport of Donetsk region. (2017). Donetsk Regional State Military and Civil Administration. Retrieved from: <http://ecology.donoda.gov.ua/stan-dovkilliya/ekologichnij-pasport/>
22. Kriukovska, L.I. (2010). To evaluate the properties of road clothing with the use of alternative materials. *Visnuk of the National Transport University*, 20, 233-237. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu_2010_20_42. (in Ukrainian).
23. Khrutba, V.A., & Kriukovska, L.I. (2012). Systematic design of non-rigid type of road cloths using alternative materials. *Visnuk of the National Transport University*, 25, 400-404 http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu_2012_25_77 (in Ukrainian).

The article was received 05.03.2021 and was accepted after revision 24.05.2021

Хрутьба Вікторія Олександрівна

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та безпеки життєдіяльності Національного транспортного університету

Адреса робоча: 01010 Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1

ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-8121-2042>, **e-mail:** Viktoriia.Khrutba@gmail.com

Нікітченко Юлія Станіславівна

кандидат технічних наук, доцент кафедри екологічного менеджменту та підприємництва Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Адреса робоча: 03054 Київ, вул. Васильківська, 90а

ORCID ID <http://orcid.org/0000-0003-1487-641X>, **e-mail:** julia_n_s@ukr.net

Крюковська Леся Іванівна

кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та безпеки життєдіяльності Національного транспортного університету

Адреса робоча: 01010 Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0001-8944-8036>, **e-mail:** krjukovska@gmail.com

Лук'янова Віталіна Віталіївна

кандидат хімічних наук, доцент кафедри екології та безпеки життєдіяльності Національного транспортного університету

Адреса робоча: 01010 Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1

ORCID ID <http://orcid.org/0000-0001-8964-3560>, **e-mail:** vitalina_lk@i.ua

Спасіченко Оксана Вікторівна

асистент кафедри екології та безпеки життєдіяльності Національного транспортного університету

Адреса робоча: 01010 Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-7809-6765>, **e-mail:** o.spasichenko@ntu.edu.ua

UDK 628.4.08

Vitalii Ishchenko, PhD, head of the Department of Ecology and Environmental Safety, ORCID: 0000-0002-8464-1096, *e-mail*: ischenko.v.a@vntu.edu.ua

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine

ASSESSMENT OF SPENT BATTERIES STREAMS IN UKRAINE

Abstract. *The goal of this study is the analysis of quantitative parameters and dynamics of spent batteries generation in Ukraine and mass balance assessment of their streams. The assessment used statistical data from international trade organizations and the State Statistics Service of Ukraine on the number of produced, imported, exported batteries, and spent batteries generated. Analysis of statistics on spent batteries generation in the world shows a significant difference in quantity, which is due to different ways of spent batteries management and approaches to counting. The estimated mass of batteries sold in Ukraine is about 20 thousand tons per year. The weight of household batteries (excluding car batteries) is estimated as 4.5-7 thousand tons per year (110-170 grams per year per person) and corresponds to the data of some EU countries. Among household batteries, alkaline and lithium-ion batteries are the most common. Study of batteries quantity in the waste has shown a significant data divergence between the expected mass of batteries in the waste and official statistics. This is probably due to the low efficiency of the waste accounting system. In recent years, there is a trend of reducing the mass of batteries placed on the market and reducing their share in the waste (but such trends are not a case for household batteries). According to unofficial data, the weight of the collected spent household batteries is 2-3 tons per year or 0,05-0,08 grams per year per 1 person. The level of spent batteries collection (including car batteries) is estimated at 19%, and household batteries – only 0.1% that is much lower than in the EU countries. About 75–80% of spent batteries (99% of spent household batteries) are not accounted in waste streams. Besides, batteries in the waste of electrical and electronic equipment remain unaccounted.*

The scientific novelty of the study is the development of mass balance of spent batteries in Ukraine, which will ensure more efficient management of their flows. The practical value of the paper includes assessment of spent batteries volume in Ukraine for further analysis of the possibilities of their recycling.

Key words: *batteries; waste; spent batteries; waste management; mass balance*

DOI: 10.32347/2411-4049.2021.2.55-63

Introduction

Efficient household waste management is very important for the environment. However, in many countries (including Ukraine), hazardous household waste is not separated from other categories of household waste despite many years implementing of legislation and waste management processes, as well as information campaigns around the world. Therefore, hazardous household waste (e.g. batteries, fluorescent lamps and many others) accumulates mainly at landfills causing big environmental risks if these landfills are not constructed and do not operate in accordance with environmental requirements. Among hazardous household waste, batteries account for the largest share (excluding waste electrical and electronic equipment if considering them as a separate category). According to reference data [1], batteries and accumulators constitute about 0.25% of all household waste mass

and about 50% of hazardous components of household waste. Different types of batteries contain compounds of zinc, manganese, mercury, copper, lead, cadmium, nickel, and acids [2]. In Ukraine, the main component in hazardous household waste is also batteries – about 25% [3]. In Poland, about 6000 tons of spent household batteries are generated annually [4]. In 2018, less than half of spent batteries (47.4%) were collected in EU countries [5]. Denmark, one of the leaders in waste management, still has 39% of batteries collected together with other household waste [6]. Other countries have much worse performance. The accumulation of this waste at landfills can lead primarily to the environmental pollution by heavy metals. For example, authors from the United States [7] have found lead and chromium in majority of spent batteries, despite the contrary information from the manufacturers. Moreover, the authors [8] have determined that the permissible heavy metals content in many spent batteries has been exceeded. The goal of this paper study is the analysis of quantitative parameters and dynamics of spent batteries generation in Ukraine and mass balance assessment of their streams.

Methodology of research

In order to assess the generation of spent batteries, the literature, UN statistical data on the sale, import and export of batteries [9], and data from the State Statistics Service of Ukraine on waste generation [13] were analysed.

The complexity of waste batteries estimating volume is explained by 3 main factors: 1) the accounting systems exists only for spent batteries generated in products manufacturing; 2) lack of efficient separate collection of household batteries; 3) lack of relevant research.

Research results are likely to be significantly underestimated due to the large amount of unaccounted waste. Statistical information is provided by waste-generating companies. Therefore, the reliability of the data is under the question in case of insufficient control.

Research results

Analysis of statistical data on spent batteries generation in the world

The data on spent batteries quantity in different countries often differ in large scale. This is due to the presence/absence of special schemes for the collection of such waste, and different efficiency of data accounting. For example, the authors [6] have determined the content of spent batteries in household waste in Denmark at 0.02–0.06% that corresponds to an average of 208 grams (9 pcs) of batteries per year per household. This is 39% of all generated waste batteries. Thus, the total number of spent batteries can be estimated at 0.1% of household waste weight. However, it should be noted that every municipality in Denmark has an access to special waste collection points. Therefore, majority of spent batteries are collected separately with relatively little share in residual household waste. A study [10] conducted in Germany also has shown an average 0.04% of spent batteries in household waste. In Poland, as of 2004, only 6.5% of batteries (12.2 g/year per person) were collected separately [4]. Accordingly, about 190 g/year of batteries remained in the mixed waste. However, as of 2018, the level of spent batteries collection has risen to 80% [5], which is one of the highest in the EU. The content of spent batteries in household waste in China (250 g/year per person) [11] are much higher.

In general, according to the European Association of Portable Batteries [5], the average weight of batteries placed on the markets of EU countries, after a slight decrease in 2010-2013, continues to grow and was 453 g/year per person in 2018.

Assessment of volumes of batteries and accumulators placed on the market in Ukraine

The difficulty of processing statistical data is due to the fact that there is only information on the total mass of batteries and accumulators produced in Ukraine. The data also include car batteries accounting for the main share of production. Car batteries are not included in household waste.

Some part of household batteries on the Ukrainian market are imported. According to the UN [9], Ukraine annually imports about 4000 tons of household batteries. Most of them are manganese batteries (over 2000 t/year) and lithium-ion batteries (the number is constantly increasing, currently – more than 1000 t/year). The data on batteries placed on the Ukrainian market in 2016-2018 are given in the Table 1. However, these data include only batteries imported as separate products and do not take into account the batteries in the goods (e.g. household appliances, electronic devices, toys, etc.). Therefore, the total import of batteries is probably much higher than shown in the Table 1.

Table 1 – Weight and number of batteries imported in Ukraine, 2016-2018

Type of battery (code)	2016		2017		2018	
	Weight, tons	Number, thous. pcs.	Weight, tons	Number, thous. pcs.	Weight, tons	Number, thous. pcs.
Alkaline batteries (850610)	2220	N/a	2072	116592	1939	109917
Mercury batteries (850630)	0	0	0,07	0,2	0,04	0.072
Zinc-silver batteries (850640)	0,3	527	0,48	532	0,63	484
Lithium batteries (850650)	42	11758	46	7733	76	11018
Zinc-air batteries (850660)	1,6	1186	1,9	1380	2,3	1586
Other types of primary batteries (850680)	1000	56233	912	53237	1200	65961
Lead-acid accumulators (850710)	19495	1897	20565	2120	13252	876
Nickel-cadmium accumulators (850730)	30	139	16	62	28	63
Nickel-iron accumulators (850740)	26	39	10	30	17	18
Nickel-metalhydride accumulators (850750)	36	1360	42	1506	27	748
Lithium-ion accumulators (850760)	409	3633	799	6344	1371	11555
Other types of accumulators (850780)	13	211	20	206	45	278
Total	23273	76983	24485	189742	17958	202504
Total excl. lead-acid accumulators	3778		3920		4706	

Besides, some batteries are manufactured in Ukraine, but data on their weight or quantity are not available. The weight can be estimated through the cost of the batteries produced. For example, the total cost of batteries and accumulators produced in Ukraine in 2018 was UAH 2.837 billion. At the same time, the value of batteries exported was UAH 625 million. Thus, Ukrainian batteries and accumulators with cost of UAH 2.212 billion remained on the market. At the UN base [9], the weight of exported batteries and accumulators in 2018 amounted to 25 429 tons. Making appropriate comparisons, we obtain the estimated weight of Ukrainian batteries and accumulators on the domestic market of about 89 998 tons. Taking into account imported batteries and accumulators, their total weight in 2018 was 106 016 tons. Most of this weight is accounted for car batteries, but exact data are unknown since Ukrainian statistics contains only aggregate information on batteries and accumulators. Relevant calculations were also made for 2016 and 2017 (see Table 2).

Table 2 – The estimated weight of batteries place on Ukrainian market, 2016-2018

Year	Batteries and accumulators produced in Ukraine, mio UAH	Batteries and accumulators exported from Ukraine		Batteries and accumulators remained on the market	
		mio UAH	tons*	mio UAH	tons*
2016	1954	624	691**	1330	45025
2017	2413	764	25864	1649	55824
2018	2837	625	25429	2212	89998

*estimated data

**the data on weight of some types of batteries and accumulators are not available

The data listed in the Table 2 also include lead-acid car batteries, which do not belong to household batteries as was mentioned above. Therefore, it is necessary to assess the weight of Ukrainian batteries remained on the Ukrainian market without taking into account lead-acid batteries. In 2018, 25 429 tons of batteries were exported from Ukraine, while the share of household batteries is about 1.5% (373 tons) according to [9]. If we assume the share of household batteries as 1.5% among batteries produced in Ukraine (due to the lack of other data), then the residual weight of Ukrainian batteries on the Ukrainian market excluding lead-acid batteries is 1350 tons (1.5% of 89 998 tons). Along with imported household batteries (see Table 1), the total weight of the batteries is 6056 tons. Similar calculations were also done for 2016 and 2017. The results are presented in the Table 3.

Table 3 – Calculation of the weight of batteries placed on Ukrainian market

Year	Batteries exported from Ukraine, tons	Batteries exported from Ukraine (excl. lead-acid accumulators), tons (%)	Ukrainian batteries remained, tons	Ukrainian batteries remained (excl. lead-acid accumulators), tons	Batteries imported, tons	Total weight batteries placed on Ukrainian market, tons
2016	691	53 (7,7)	45025	3453	3778	7231
2017	25864	230 (0,9)	55824	496	3920	4416
2018	25429	373 (1,5)	89998	1350	4706	6056

Besides, if we assume that the majority of lithium-ion batteries (especially by weight) on the market are car batteries, they can also be excluded from the calculation. Then, the weight of household batteries in Ukraine account for about 6000 tons/year (see Table 4).

Table 4 – Calculation of the weight of household batteries placed on Ukrainian market (excluding lithium-ion accumulators)

Year	Batteries exported from Ukraine, tons	Batteries exported from Ukraine (excl. car batteries), tons (%)	Ukrainian batteries remained, tons	Ukrainian batteries remained (excl. car batteries), tons	Batteries imported, tons	Total weight batteries placed on Ukrainian market, tons
2016	691	48 (6,9)	45025	3127	3778	6905
2017	25864	227 (0,87)	55824	490	3920	4410
2018	25429	369 (1,45)	89998	1306	4706	6012

From the data in Table 4, one can conclude that the share of household batteries in Ukraine ranges from 110 to 170 g/year per person in recent years (Fig. 1). For comparison, in some EU countries (Romania, Bulgaria, Greece, Croatia), the weight of household batteries placed on the market is about the same, although the EU average value is much higher – 453 g/year per person [5].

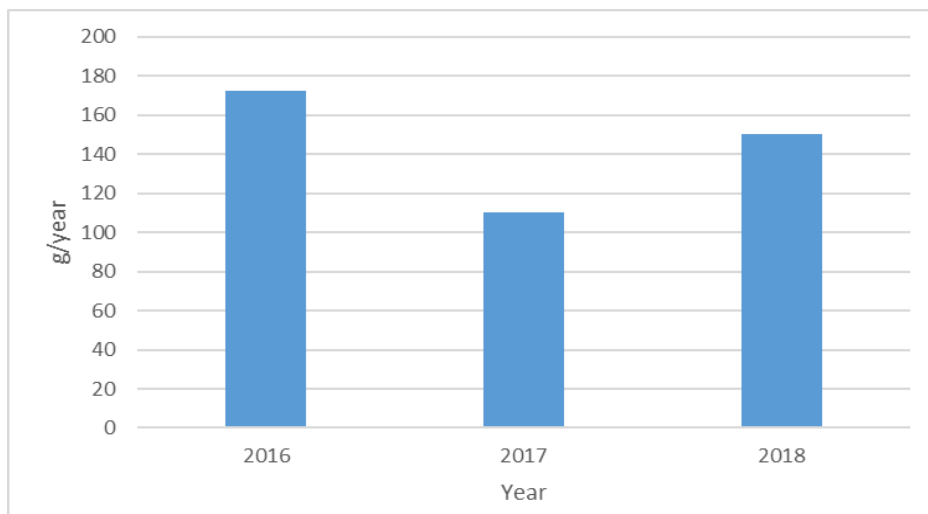


Fig. 1 – Unit weight of household batteries in Ukraine, g/year per 1 person

Among the batteries, alkaline and lithium-ion types constitute the majority (excluding car batteries), their weight in 2018 was 40% and 29%, respectively. For comparison, in Japan, the largest share goes to alkaline and zinc batteries – 77% and 20%, respectively [12].

Spent batteries generation in Ukraine

According to official statistics [13], about 4000-4500 t/year of spent batteries and accumulators are generated in Ukraine (see Tables 5–7, no data available for 2016).

Table 5 – Weight of spent batteries in waste, 2017

Type of batteries	Weight, tons
<i>Waste of batteries manufacturing</i>	1315
Nickel-iron accumulators	0,2
Lead-acid accumulators	1273.9
Alkaline accumulators, incl. nickel-cadmium	1
Other accumulators	39.9
<i>Waste of car exploitation</i>	3260.8
Lead batteries	1806.9
Nickel-cadmium batteries	55.5
Alkaline batteries	74.9
Other batteries and accumulators	480
Waste electrolyte from batteries and accumulators	843.5
<i>Batteries in household waste</i>	7.2
Total	4583

Table 6 – Weight of spent batteries in waste, 2018

Type of batteries	Weight, tons
<i>Waste of batteries manufacturing</i>	924.7
Nickel-iron accumulators	0.1
Lead-acid accumulators	897
Alkaline accumulators, incl. nickel-cadmium	6.4
Other accumulators	21.2
<i>Waste of car exploitation</i>	3664.3
Lead batteries	1777.8
Nickel-cadmium batteries	59.9
Alkaline batteries	58.7
Other batteries and accumulators	572.2
Waste electrolyte from batteries and accumulators	1195.7
<i>Batteries in household waste</i>	11.4
Total	4596

Table 7 – Weight of spent batteries in waste, 2019

Type of batteries	Weight, tons
<i>Waste of batteries manufacturing</i>	795.2
Nickel-iron accumulators	0.5
Lead-acid accumulators	754.1
Alkaline accumulators, incl. nickel-cadmium	10.4
Other accumulators	30.2
<i>Waste of car exploitation</i>	3444.1
Lead batteries	1687
Nickel-cadmium batteries	71.5
Alkaline batteries	47.4
Other batteries and accumulators	517.1
Waste electrolyte from batteries and accumulators	1121.1
<i>Batteries in household waste</i>	11.4
Total	4246

In general, there is a correlation between the weight of batteries placed on the market and weight of batteries in waste. Thus, there was reducing of the total number of batteries placed on the market and reducing of their weight in waste in recent years (although, this is not a case for household batteries). A more detailed comparison is

difficult to make since the data on the number of batteries placed on the market and those contained in the waste are presented for different categories of batteries.

Comparing the data from the Table 1 to the data on waste generation, it can be concluded that about 75–80% of batteries are not taken into account in waste streams, and for household batteries this figure reaches 99% (i.e. batteries in household waste are mostly not taken into account in official statistics). Besides, batteries in the waste electrical and electronic equipment remain unaccounted for [14]. For example, in [6] it was determined that about 20% of all spent batteries are found in electrical and electronic equipment. According to [10], the share of spent batteries in e-waste is about 1%. According to research [12], in Japan, the average weight of batteries in small electronic equipment is 4.6%. A large number of used equipment remains unaccounted for. Besides, a lot of old equipment is imported into Ukraine illegally. The absence of electronic waste separate collection and relevant collection points does not allow to assess the electronic waste flow from households (and batteries inside as well). These facts confirm the low coverage of spent battery streams by official statistics in Ukraine.

There is no official statistics on separately collected spent household batteries in Ukraine. According to non-governmental and private organizations collecting spent batteries, their annual weight is 2-3 tons per year (or 0.05-0.08 g/year per 1 person). For comparison, EU countries have 210 g/year of collected spent batteries per 1 person. Even taking into account the smaller number of batteries sold in Ukraine, the difference is very large. This confirms the discordance between the actual number of spent batteries in the waste and official data.

The collection rate of spent batteries is also an important indicator. According to the methodology [15] it can be calculated by the formula:

$$N = W/M, \quad (1)$$

where W is the weight of collected batteries, t/year, M is average weight of batteries placed on the market in previous 3 years, t/year.

Thus, taking into account the data in the Tables 1–7, in 2019 the collection rate of spent batteries in Ukraine was about 19% by weight in 2019. However, this data was achieved primarily due to the well-established system of car batteries collection. For household batteries, according to unofficial data, the collection rate is much lower – 0.1%. This is due to the lack of organized system of spent household batteries collection, which is provided only by the public and private initiatives. At the same time, the collection rate in the EU ranges from 26 to 70%.

Conclusions

According to the research results, the collection rate of spent household batteries in Ukraine is very low – less than 1%. This is a logical consequence of the lack of an efficient system of spent household batteries collection. Such a system exists only for car batteries providing the total collection rate at 19%. The unit weight of household batteries in Ukraine ranges from 110 to 170 g/year per 1 person in recent years corresponding to the data from Eastern and Southern Europe. Among household batteries, alkaline and lithium-ion constitute the majority. Therefore, the data on the number of batteries placed on the Ukrainian market are adequate. The weight of household batteries in waste is about 11 t/year according to official data.

This figure is definitely underestimated since non-governmental organisations report 2-3 thousand t/year of collected household batteries. This is probably due to the low efficiency of the waste accounting system. About 75-80% of batteries (99% of household batteries) are not taken into account in waste streams. The main obstacles to the correct assessment of spent battery streams are the low level of monitoring of their generation and collection, which leads to incorrect data.

REFERENCES

1. Ishchenko, V., Pohrebennyk, V., Kochan, R., Mitryasova, O., & Zawislak, S. (2019). Assessment of hazardous household waste generation in Eastern Europe. In *19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2019*, June 30 – July 6, 2019, vol. 19, iss. 6, 559-566.
2. Ishchenko, V., Pohrebennyk, V., Kozak, Y., Kochanek, A., & Politylo, R. (2016). Assessment of batteries influence on living organisms by bioindication method. In *16th International Multidisciplinary Geoconference SGEM 2016*. Book 5. Ecology, Economics, Education and Legislation. SGEM2016 Conference Proceedings, June 28 – July 6, 2016, vol. II, 85-92.
3. Ishchenko, V., Pohrebennyk, V., Borowik, B., Falat, P., & Shaikhanova, A. (2018). Toxic substances in hazardous household waste. In *International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2018*, vol. 18, is. 4.2. SGEM2018 Conference Proceedings, July 2 – July 8, 223-230.
4. Rogulski, Z., & Czerwiński, A. (2006). Used batteries collection and recycling in Poland. *Journal of Power Sources*, 159 (1), 454-458.
5. European Portable Battery Association (2013). The collection of waste portable batteries in Europe in view of the achievability of the collection targets set by Batteries Directive 2006/66/EC. European Portable Battery Association, Brussels (updated in 2020).
6. Bigum, M., Petersen, C., Christensen, T. H., & Scheutz, C. (2013). WEEE and portable batteries in residual household waste: Quantification and characterisation of misplaced waste. *Waste management*, 33 (11), 2372-2380.
7. Barrett, H. A., Ferraro, A., Burnette, C., Meyer, A., & Krekeler, M. P. (2012). An investigation of heavy metal content from disposable batteries of non-US origin from Butler County, Ohio: An environmental assessment of a segment of a waste stream. *Journal of Power Sources*, 206, 414-420.
8. Recknagel, S., Radant, H., & Kohlmeyer, R. (2014). Survey of mercury, cadmium and lead content of household batteries. *Waste management*, 34 (1), 156-161.
9. UN Comtrade Database. Retrieved from: <https://comtrade.un.org/data/>
10. Dimitrakakis, E., Janz, A., Bilitewski, B., & Gidakos, E. (2009). Small WEEE: determining recyclables and hazardous substances in plastics. *Journal of hazardous materials*, 161 (2-3), 913-919.
11. Gu, B., Zhu, W., Wang, H., Zhang, R., Liu, M., Chen, Y., Wu, Y., Yang, X., He, S., Cheng, R., Yang, J. & Bi, J. (2014). Household hazardous waste quantification, characterization and management in China's cities: A case study of Suzhou. *Waste management*, 34 (11), 2414-2423.
12. Terazono, A., Oguchi, M., Iino, S., & Mogi, S. (2015). Battery collection in municipal waste management in Japan: challenges for hazardous substance control and safety. *Waste Management*, 39, 246-257.
13. Utvorennia vidkhodiv za klasyfikatsiinymy uhrupovanniamy derzhavnoho klasyfikatora vidkhodiv. Derzhavna sluzhba statystryky Ukrainy. Retrieved from: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (in Ukrainian)
14. Ishchenko, V., Pohrebennyk, V., Kochanek, A., & Hlavatska, L. (2019). Waste electrical and electronic equipment management in Ukraine. In *Proceedings of International Conference on Geosciences*, March 26-29, 2019, Athens, Greece, book 3, vol. 1, 197-204.

15. Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council of 6th September 2006 on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC OJ 266/1.

The article was received 10.02.2021 and was accepted after revision 17.05.2021

В.А. Іщенко

ОЦІНЮВАННЯ ПОТОКІВ ВІДПРАЦЬОВАНИХ БАТАРЕЙ В УКРАЇНІ

Анотація. Метою дослідження є проведення аналізу кількісних показників та динаміки утворення відпрацьованих батарей в Україні та оцінювання матеріального балансу їх потоків. Для проведення оцінювання використовувались статистичні дані міжнародних торговельних організацій і Державної служби статистики України щодо кількості вироблених, імпортованих і експортованих батарей, а також утворення відпрацьованих батарей. Аналіз статистичних даних утворення відпрацьованих батарей у країнах світу показує значну розбіжність у кількісних показниках, що пов'язано із різними способами поводження з такими відходами і підходами до ведення обліку. У роботі оцінена маса батарей, які продаються в Україні (близько 20 тис. тон щорічно). При цьому маса побутових батарей (без врахування автомобільних акумуляторів) оцінена в 4,5–7 тис. тон/рік (110-170 г/рік на 1 людину), що відповідає показникам окремих країн ЄС. Серед побутових батарей найбільше представлені лужні і літій-іонні. Дослідження кількості батарей у відходах показало значну розбіжність очікуваної маси батарей у відходах і офіційних статистичних даних, що, ймовірно, пов'язано із низькою ефективністю системи обліку відходів. В останні роки спостерігається тенденція до зменшення загальної кількості батарей на ринку і зменшення їх маси у відходах (хоча, наприклад, для побутових батарей такі тенденції відсутні). За неофіційними даними, маса зібраних відпрацьованих побутових батарей становить 2-3 т/рік або 0,05-0,08 г/рік на 1 людину. Рівень збирання батарей (із врахуванням автомобільних акумуляторів) оцінено в 19%, а побутових батарей – 0,1%, що є значно нижчим за показники країн ЄС. Близько 75–80% батарей (99% побутових батарей) не враховується в потоках відходів. Крім того, залишаються необлікованими батареї у складі відходів електричного та електронного обладнання.

Наукова новизна дослідження полягає у розробленні масового балансу відпрацьованих батарей в Україні, що дозволить більш ефективно управляти їх потоками. Практична цінність роботи включає оцінювання обсягів утворення відпрацьованих батарей в Україні для подальшого аналізу можливостей їх утилізації використання як ресурсу.

Ключові слова: батареї; відходи; відпрацьовані батареї; поводження з відходами; матеріальний баланс

Іщенко Віталій Анатолійович

кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри екології та екологічної безпеки Вінницького національного технічного університету

Адреса робоча: 21021 Україна, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95

ORCID: 0000-0002-8464-1096, **e-mail:** ischenko.v.a@vntu.edu.ua

ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ NATURAL RESOURCES

УДК 504.064.2

Tetiana I. Kryvomaz, Dr, Professor of Department of Labour and Environment Protection
ORCID ID: 0000-0001-7426-8745, *e-mail*: ecol@i.ua

Antonina M. Savchenko, senior lecturer
e-mail: asav2509@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

THE ADAPTATION OF CITY DEVELOPMENT SECTORS TO CLIMATE CHANGE

Abstract. *As a result of global climate change, the duration of hot periods and the intensity of natural hydrometeorological phenomena are increasing, the precipitation regime is changing, which, combined with increasing urbanization, poses a serious threat to social stability, economic and environmental safety of the urban population and environment. Reducing the vulnerability of cities to climate change involves measures to increase adaptation capacity, reduce risks and vulnerabilities, increase the capacity to cope with emergencies and benefit from climate change. Reducing the impact of the urban environment on climate change requires a comprehensive strategic action plan for each sector of urban development.*

Key words: *climate change; cities; sustainable development; risks; environmental safety*

Т.І. Кривомаз, А.М. Савченко

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

АДАПТАЦІЯ СЕКТОРІВ МІСЬКОГО РОЗВИТКУ ДО КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

Анотація. *В результаті глобальних кліматичних змін зростає тривалість спекотних періодів та інтенсивність стихійних гідрометеорологічних явищ, змінюється режим випадання опадів, що у поєднанні з підвищенням темпів урбанізації представляє серйозну загрозу соціальній стабільності, економічній та екологічній безпеці міського населення та середовища. Зменшення вразливості міст до кліматичних змін передбачає заходи, спрямовані на підвищення адаптаційного потенціалу, зниження ризиків та ступеня чутливості, збільшення потенціалу для подолання надзвичайних подій та отримання вигоди внаслідок кліматичних змін. Зниження впливу урбанізованого середовища на кліматичні зміни потребує комплексного стратегічного плану заходів для кожного сектору міського розвитку.*

Ключові слова: *кліматичні зміни; урбанізовані території; сектори міського розвитку; екологічна безпека*

DOI: 10.32347/2411-4049.2021.2.64-78

© Т.І. Кривомаз, А.М. Савченко, 2021

ISSN: 2411-4049. Екологічна безпека та природокористування, № 2 (38), 2021

Вступ

Проблему глобальних кліматичних змін досліджують вже третє століття. Після відкриття парникового ефекту та обґрунтування взаємозв'язку з викидами CO₂ і підвищенням температури з'явилися припущення, що потепління вийде за рамки звичайних погодних коливань, почнеться зміщення кліматичних зон, збільшиться площа посушливих районів, льодовикові щити почнуть танути, що призведе до затоплення великих ділянок суші [24]. На жаль, більшість з цих прогнозів вже реалізувались і продовжують втілюватись у життя. За даними вимірювань супутників GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment), Гренландія і Антарктика втрачають масу приблизно 100 км² на рік і швидкість їх танення зростає з кожним роком [16]. Згідно з кліматичними сценаріями, у цьому столітті рівень Світового океану підніметься на 1 метр, а якщо продовжувати використовувати викопне паливо, то показники можуть досягти 5 метрів [21]. Внаслідок кліматичних змін багато місць проживання людей може бути повністю втрачено в результаті підвищення рівня океану. На даний момент близько 150 мільйонів людей проживають на суші, яка до 2050 року опиниться під водою [15]. Вже сьогодні кліматичні зміни активізували переселення людей, яких називають «кліматичними біженцями». Міграція населення досягла рекордних показників, і останнім часом люди частіше покидають свої домівки через кліматичну кризу, ніж через ескалацію військових конфліктів [25].

В результаті глобальних кліматичних змін зростає тривалість спекотних та посушливих періодів, повторюваність хвиль тепла, інтенсивність стихійних гідрометеорологічних явищ, а також змінюється тривалість залягання стійкого снігового покриву та режим випадіння опадів [10]. Всього 50 років тому такі аномалії поширювалися на 0,2–0,3% поверхні суші, а в останні роки вони зросли в 25–50 разів, охоплюючи приблизно 10% суші [19]. За оцінками ООН частота повеней на території більшої частини Європи зростає в 10 разів [25]. Кліматичні сценарії, розраховані за максимальними показниками, припускають підвищення температури на 4–7°C на більшій частині земної кулі до 2100 року [11].

Згідно з проєкцією на основі RCP-сценаріїв, до 2050 року середня температура в Україні може зрости на 1,5–2°C, а середня кількість опадів до 2030 року може збільшитися на 7% із значними коливаннями, в залежності від регіону, наприклад, на півдні України у серпні опадів може стати на 20% менше, а в січні на заході – на 26% більше [10]. Внаслідок кліматичних змін в окремих регіонах України почастішають повені та підтоплення, а на півдні України невеликі річки можуть пересохнути до 2050 року.

Міста суттєво впливають на кліматичні зміни, оскільки вони споживають 78% світової енергії і виробляють понад 60% викидів парникових газів, хоча при цьому вони займають менше 2% поверхні Землі [25]. Водночас температурні зміни та стихійні гідрометеорологічні явища призводять до значних економічних та соціальних наслідків в урбанізованому середовищі, особливо в зв'язку з повенями, зсувами та аномальним підвищенням температури. Кліматичні зміни у поєднанні з підвищенням темпів урбанізації представляють дедалі більшу загрозу для світової економіки, населення і збалансованого розвитку [14]. На фоні аномальних кліматичних подій та погіршення стану довкілля спостерігається підвищення вразливості населення

міст в результаті демографічних, технологічних і соціально-економічних трансформацій урбанізованих територій. Зростаючі темпи урбанізації у поєднанні з кліматичними змінами представляють серйозну загрозу соціальній стабільності, економічній та екологічній безпеці України, що зумовлює необхідність формування комплексних стратегій адаптації міст.

Постановка завдання

Метою дослідження є аналіз взаємозв'язків кліматичних змін з функціонуванням секторів міського розвитку. В узгодженні з метою сформульовано такі цілі:

- проаналізувати негативні наслідки аномальних кліматичних подій та стихійних гідрометеорологічних явищ для міського населення та середовища;
- визначити вплив секторів міського розвитку на кліматичні зміни;
- обґрунтувати ключові заходи адаптації міст до кліматичних ризиків;
- встановити шляхи зменшення негативного впливу міст на зміну клімату.

Результати досліджень

В Україні за останні десятиріччя надзвичайні ситуації природного характеру поступово переходять від об'єктового та місцевого рівня до регіонального та державного рівня [3]. Зростання об'ємів збитків та масштабів процесів деградації урбанізованих територій пов'язано з динамікою, частотою повторюваності та інтенсивністю проявів надзвичайних ситуацій метеорологічного, гідрологічного, геологічного характеру та пожеж у містах України [4]. Серед основних негативних наслідків кліматичних змін для міст відзначають тепловий стрес, підтоплення, зменшення площ та порушення видового складу міських зелених зон, стихійні гідрометеорологічні явища, зменшення кількості та погіршення якості питної води, зростання кількості інфекційних захворювань та алергійних проявів, порушення нормального функціонування енергетичних систем міста [13]. Кліматичні зміни прямо чи опосередковано впливають на кожен із секторів міського розвитку. Згідно зі «Стратегією розвитку міста Києва» виділяють такі сектори: адміністративні послуги, безпека та цивільний захист, екополітика та охорона довкілля, житлово-комунальне господарство, інвестиції, історична та архітектурна спадщина, культура, освіта, охорона здоров'я та здоровий спосіб життя, промисловість та розвиток підприємництва, публічний простір, ринок праці, розбудова міста і земельні відносини, соціальна підтримка та допомога, транспорт та міська мобільність, туризм [9]. В контексті кліматичних змін сектори міського розвитку розподіляються на п'ять категорій: 1) впливає на зміну клімату; 2) вразливий до кліматичних змін; 3) двосторонній взаємозв'язок з кліматичними змінами; 4) має опосередковане відношення до зміни клімату; 5) ніяк не пов'язаний зі змінами клімату.

Рівень викидів на міських територіях залежить від значної кількості взаємопов'язаних факторів: 1) географічна ситуація, що включає місцеві кліматичні показники; 2) розподіл природних ресурсів для життєдіяльності та виробництва; 3) типи економічної діяльності, що здійснюється на міських територіях; 4) демографічні показники, які враховують склад, соціальний стан

та моделі поведінки населення; 5) форма та щільність міських територій, що визначає вразливість населення до зміни клімату та впливає на схеми використання енергії; 6) можливість використання відновлюваних джерел енергії [7]. Для розробки заходів з адаптації необхідно проводити моніторинг викидів парникових газів (ПГ) згідно з Міжнародним протоколом аналізу викидів ПГ для місцевих органів влади та Міжнародним стандартом визначення викидів ПГ для міст [8]. Розробка концепції оцінки ризиків внаслідок зміни клімату вимагає суттєвої кількості детальної інформації та технічних знань для побудови статистичних, кліматичних, гідрологічних, економічних моделей для конкретних міських територій. Підвищення рівня екологічної безпеки міського середовища передбачає зменшення вразливості забудованих територій до негативного впливу небезпечних природних явищ, викликаних зміною клімату.

Розбудова міста і земельні відносини. В процесі планування міської забудови слід здійснювати картування зон високого кліматичного ризику і категорично забороняти нове будівництво на таких територіях, щоб уникнути збитків від надзвичайних явищ. Всі документи, які стосуються планування розбудови міст та земельних відносин, повинні містити розділ «Адаптація до зміни клімату». Доцільно залучати кліматичних експертів до вдосконалення законодавчої бази та державних будівельних норм з урахуванням змін кліматологічних показників та правил захисту будівель від екстремальних погодних умов. Плани міського землекористування повинні передбачати ефективну систему дренажу, враховувати шляхи циркуляції дощової води для зменшення ризиків затоплення. Для запобігання зсувам, обвалам, осипам, просіданню ґрунту внаслідок повеней та геологічних надзвичайних ситуацій рекомендують озеленення схилів рослинністю з розгалуженою кореневою системою. Для зменшення ефекту теплового острова та підвищення об'ємів депонування вуглецю штучні поверхні у місті замінюють зеленим покривом. Рослини також використовують для захисту підземних водоносних пластів. Історична та архітектурна спадщина міст потребує особливого захисту.

Публічний простір. Для протистояння кліматичним ризикам публічний міський простір потребує більшої інтеграції природних об'єктів в урбаністичні території. Розгалужена міська зелена інфраструктура забезпечує захист від спеки і повеней. Зелені зони знижують локальну температуру повітря і сприяють зниженню ризиків теплового стресу та виникнення островів тепла. Засаджені рослинами території служать ефективною дренажною системою під час проливних дощів на відміну від поширених у містах штучних водонепроникних поверхонь, які посилюють ризик підтоплення. Для спекотних періодів рекомендують створити карти прохолодних зон та використовувати громадські будівлі у якості місць для охолодження. Пом'якшенню теплового режиму у місті сприяють природні водойми, штучні системи поливу, рамки охолоджувального обприскування, фонтани, бювети.

Житлово-комунальне господарство. Пошкодження та руйнування об'єктів житлово-комунального господарства внаслідок стихійних лих та кліматичних процесів завдає матеріальних та фінансових збитків, а також може представляти загрозу життю та здоров'ю людей. Також прогнозованим наслідком кліматичних змін стане дефіцит чистої питної води. Більшість міст України потребує модернізації систем водопостачання та каналізації з дренажною системою для відновлення та розподілу дощової води після

сильних опадів. Збереження дощової води та сніжних опадів у резервуарах дозволяє регулювати стоки, очищувати їх шляхом фільтрації з подальшим використанням для технічних потреб і для виробництва електроенергії. Також для збору дощової води застосовують «блакитні» дахи, з яких накопичена вода використовується для змиву в туалетах, поливу та інших технічних потреб. Раціональне поводження з відходами не тільки сприяє чистоті міського середовища, але й мінімізує викиди ПГ. Високим ступенем кліматозалежності житлово-комунального міського господарства характеризуються системи опалення та кондиціонування. Стандарти кліматичного дизайну для захисту від перегріву враховують орієнтацію будівель у просторі, сучасні системи теплоізоляції і вентиляції, достатнє надходження свіжого повітря природним шляхом, засоби для затінення, використання світлих матеріалів. Енергоефективні конструкції та сонячні панелі встановлюють у багатьох містах світу на адміністративних, громадських та житлових будинках. «Зелені» дахи та фасади покращують ізоляцію будівель під час спеки та холоду, очищують повітря, утримують дощову воду, зменшують пил і шум, підтримують міське біорізноманіття та приносять естетичну насолоду.

Транспорт та міська мобільність. Транспортна система міст здійснює вагомий внесок у викиди ПГ, особливо внаслідок використання застарілих моделей автомобілів, тому транспортні засоби потребують контролю та оновлення. Для транспортної інфраструктури особливо небезпечним є збільшення обсягів опадів та зміна температури, внаслідок яких не тільки руйнуються дороги, але й зростає смертність від дорожньо-транспортних аварій. Для запобігання деформації дорожнього покриття при екстремальних температурах використовують асфальтовий бетон або бетон для автомобільних доріг із спеціалізованих вуглеводневих сумішей підвищеної міцності та еластичності. Також дорожній матеріал повинен ефективно поглинати або відштовхувати воду на випадок сильних дощів, а розміри дренажних систем навколо транспортних шляхів необхідно збільшувати. У зимовий період проти ковзання й обледеніння доріг рекомендують використовувати несоляні сполуки, наприклад форміат калію. Міський підземний транспорт потребує модернізації систем вентиляції та додаткового захисту від паводків.

Екополітика та охорона довкілля. Заходи охорони довкілля на урбанізованих територіях включають захист біорізноманіття, ландшафтів, геологічного розмаїття і зеленої інфраструктури. Згідно з оцінкою Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (IPCC), 20–50% видів живих істот можуть зникнути до кінця століття. Натомість прогнозується поширення інвазивних видів рослин і тварин, зокрема шкідників і алергенів. Тому для озеленення міських територій обирають ті види рослин, які краще пристосовуються до кліматичних змін, але при цьому слід уникати використання інвазивних видів. Для відновлення деградованих та забруднених територій насаджують та розширюють захисні лісосмуги навколо міст. Озеленення стабілізує ґрунт, покращує водний баланс, захищає підземні води і знижує залежність від дощу. Покращення навколишнього природного середовища урбанізованих територій передбачає збільшення об'єктів природно-заповідного фонду, створення міграційних коридорів для тварин, які вимушені змінювати середовище існування під впливом кліматичних змін та антропогенного навантаження. Основами ґрунтової та успішної адаптації до

кліматичних змін є політична воля, наукові дослідження та оцінка, а також різноманітний набір практичних заходів, до яких необхідно залучати всіх зацікавлених осіб.

Охорона здоров'я та здоровий спосіб життя. Кліматичні зміни безпосередньо впливають на здоров'я людей і посилюють існуючі проблеми охорони здоров'я. Важливим чинником для оцінки вразливості міста до кліматичних змін є структура міського населення. За фізіологічними показниками до групи найбільшого ризику входять люди похилого віку та діти, а також хворі з респіраторними проблемами, важкими та хронічними захворюваннями. Під впливом несприятливих кліматичних факторів зростає кількість смертей від ішемічної хвороби серця, діабету, суїцидів, убивств, порушень психіки [26]. Ризики смертності від серцево-судинних, ендокринних і метаболічних порушень зростають з підвищенням середньодобової максимальної температури на кожен 1°C [1]. За прогнозами Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), у період з 2030 по 2050 рр. зміна клімату спричинить 250 тис. передчасних смертей у світі щорічно, викликаних переважно серцево-судинними захворюваннями, недостатнім харчуванням, кишковими інфекціями та прямими негативними впливами аномально високих температур на організм [12]. Під впливом спеки збільшується число хвороб, які передаються через воду, та створюються умови для поширення небезпечних патогенних мікроорганізмів, збудників кишкових інфекцій та виникнення харчових отруєнь. Кліматичні зміни впливають на розширення ареалу інфекційних збудників та паразитів, що обумовлює збільшення частоти дизентерії, черевного тифу, гепатиту А, сальмонельозу, лямбліозу, криптоспоридіозу [6]. Тому необхідне вдосконалення лабораторних процедур для виявлення чутливих до кліматичних змін патогенних мікроорганізмів. Підвищення концентрацій забруднюючих речовин у повітрі внаслідок високих температур сприяє поширенню алергій, бронхіальної астми, бронхітів та інших захворювань дихальної системи. Значимість впливу зміни клімату на здоров'я залежить від рівня адаптивності людей та міських громад до негативних змін у зовнішньому середовищі. Для населення, яке не звикло до сильної спеки, існує вища ймовірність теплового удару та респіраторних захворювань. Необхідно впровадити систему спостереження та контролю за пов'язаними з кліматом захворюваннями. Для зниження кліматичної вразливості важлива наявність належного медичного обслуговування, тому необхідна модернізація системи охорони здоров'я. Межі стійкості людського організму до кліматичного впливу можливо розширити шляхом здорового способу життя та поліпшення якості життя.

Соціальна підтримка та допомога. Соціально-економічні фактори забезпечення життєдіяльності визначають рівень стійкості як окремих людей, так і цілих соціальних груп до негативних факторів зміни клімату. До найбільш вразливих соціальних груп належать малозабезпечені верстви населення, для яких кліматичні ризики визначаються характером і сферою зайнятості, способом життя, доступом до якісного харчування та чистої питної води. Аномальна спека без кондиціонування приміщень може стати смертельною небезпекою, особливо в умовах відімкнення електроенергії та нестачі питної води. План превентивних заходів передбачає проведення моніторингу вразливих груп населення та підтримку осіб групи ризику. Негативні наслідки глобального потепління змушують людей залишати місця постійного

проживання, і за різними оцінками кількість кліматичних мігрантів до 2050 року становитиме від 25 млн до мільярда [25]. Соціальні наслідки зміни клімату для урбанізованих територій полягають у загостренні расової, гендерної та майнової нерівності [15]. У зв'язку з цим перед населенням міст, куди перемістяться кліматичні біженці, стоїть завдання створення чіткої моделі глобального гуманітарного реагування на масові переміщення в результаті природних катаклізмів. Таким чином, зміна клімату підвищує щільність населення окремих регіонів і поглиблює нерівність, що негативно впливає на життя нинішніх і майбутніх поколінь. Вирішення проблеми потребує комплексного підходу і адекватних дій у сферах розвитку інфраструктури, охорони здоров'я, освіти, протидії злочинності тощо.

Освіта. Критична ситуація обумовлює необхідність впровадження освітніх і навчальних програм та проведення інформаційних кампаній про зміну клімату. Кількісні та якісні характеристики кліматичних змін значно різняться в залежності від місцевості проживання, стану довкілля та екологічної свідомості громадян. Важливо підвищувати рівень загальної обізнаності про зміну клімату та необхідність адаптації. Актуально проведення інформаційних заходів про ефективне використання води, про небезпеку сильної спеки та тепловий стрес, які слід підкріплювати практичними рекомендаціями. Доцільно розробити спеціальні рекомендації для окремих соціальних груп, місцевих громад щодо тих кроків, які вони можуть зробити для зменшення наслідків зміни клімату. Заклади культури у співпраці з науковцями та освітянами повинні здійснювати публічні акції та заходи на кліматичну тематику. Для представників різних економічних сфер та секторів міського розвитку необхідно впровадити спеціалізовані тренінги про галузеве використання кліматичної інформації. Кліматична освіта передбачає поширення інформації щодо зміни клімату та надзвичайних погодних явищ для підвищення рівня обізнаності та створення потенціалу для проведення заходів з адаптації.

Безпека та цивільний захист. Вразливість міста до стихійних гідрометеорологічних явищ визначається ризиком виникнення перебоїв у нормальній роботі інфраструктури міста, аварійних викидів чи скидів забруднюючих речовин, руйнування об'єктів інфраструктури та людських жертв [2]. Зростання частоти випадання надмірних опадів у поєднанні з недоліками функціонування міської інфраструктури підвищують ризик підтоплення міст, тому необхідно розробити план превентивних заходів для уникнення або мінімізації негативних наслідків та надання допомоги населенню. На основі наявних даних та аналітичного моделювання необхідно сформувати карту міста з позначенням небезпечних ділянок, де можуть виникнути пожежі або статися інше стихійне лихо, пов'язане з кліматичними змінами. На випадок надзвичайних подій слід передбачити альтернативні транспортні шляхи і засоби. У періоди сильної спеки пожежну охорону та швидку допомогу необхідно переводити у стан підвищеної готовності. Вразливість міста до погіршення якості та зменшення кількості питної води визначається ризиком нестачі або втрати власних джерел водопостачання та необхідністю переходу до використання привозної води та ймовірним погіршенням здоров'я населення внаслідок незадовільних характеристик якості води [4]. Вразливість енергетичних систем міста внаслідок надзвичайних кліматичних подій визначається зростанням попиту на електроенергію,

збільшенням навантаження на енергосистему та пошкодженням енергетичних об'єктів. З урахуванням впливу кліматичних змін необхідно здійснювати моделювання майбутнього попиту на енергію та потенційних періодів його піку. Для зниження вразливості енергетичної системи міста на випадок аварійних кліматичних ситуацій необхідна наявність кількох джерел електропостачання, альтернативних джерел та автономних джерел енергії, особливо для об'єктів критичної інфраструктури [2]. Дані метеорологічних та гідрологічних станцій або постів використовують для стратегічного управління кліматичними ризиками. На їх основі доцільно створити систему оперативного оповіщення мешканців міст про небезпечні кліматичні явища.

Промисловість та розвиток підприємництва. Наявність у місті потужних промислових підприємств, що здійснюють викиди тепла в атмосферу, призводить до посилення острова тепла та підвищує ймовірність виникнення теплового стресу. Відповідні види зелених насаджень навколо таких підприємств та на їх території сприятимуть біоремедіації шкідливих викидів та допоможуть знизити техногенне навантаження на населення міста. Підприємства, що надають послуги населенню, повинні адаптувати свій графік в залежності від кліматичних умов. Для робітників, що працюють на відкритому повітрі, необхідно розробляти плани роботи з урахуванням погодних умов та забезпечувати чергування служби швидкої допомоги у періоди екстремальних кліматичних явищ. Підприємствам з високим енергоспоживанням необхідно розраховувати структуру попиту та розподілу енергії, в залежності від потреб міста та піків навантаження на електромережі. Для зниження споживання води у промисловості необхідно підвищити об'єми рециркуляції води для технічних потреб та встановити обмеження на використання води у періоди максимального навантаження на міські системи водопостачання. В залежності від категорії використання, пори року та наявних ресурсів слід використовувати різні тарифні системи для постачання води і енергії. Впровадженню ресурсозберігаючих та енергоощадних технологій сприяє економічне стимулювання через застосування субсидій, податків і штрафів.

Інвестиції. Економічні наслідки зміни клімату для міст полягають в підвищенні вразливості міських активів, вірогідності прямих збитків їх руйнування та ускладнень для виконання контрактів. Це вимагає посилення роботи щодо адаптації, розвитку відповідної власної інфраструктури, що має забезпечуватися постійним фінансуванням, у тому числі через створення екологічного фонду за кошти екологічного податку з їх подальшим використанням виключно на природоохоронні цілі. Ефективна адаптація до зміни клімату може бути реалізована на базі комплексу документів економічного спрямування, зокрема щодо оподаткування, ліцензування, субсидій, запровадження стандартів, технологій, посилення вимог до об'єктів критичної інфраструктури, фінансування науково-технічних робіт, а також підвищення обізнаності населення у питаннях зміни клімату [23]. Інвестиції у сонячні батареї та енергоефективну реконструкцію будівель для міського населення зменшують залежність та навантаження на енергомережі. Завдяки інвестиціям на ринку праці з'являються нові робочі місця. Кліматичні ризики вносять корективи щодо запланованих інвестицій у сектори міського розвитку, але водночас відкривають можливість для додаткового фінансового стимулювання.

Туризм. Для міських бюджетів вразливою виявляється туристична галузь, яка залежить від надійного функціонування транспортної інфраструктури та місцевих кліматичних показників. Кліматичні зміни вимагають розширення областей туристичного інтересу та створення нових сфер туристичних розваг з одночасним забезпеченням комфорту перебування у місті за будь-яких погодних умов. Туристична активність планується в узгодженні з іншими секторами міського розвитку для урегулювання пропускнуої здатності міст. Логістичні можливості туризму залежать від своєчасного усунення пошкоджень транспортної системи внаслідок впливу снігу, льоду та паводків.

Обговорення

Загальними підходами до вирішення проблем антропогенної зміни клімату є пом'якшення її наслідків, тобто запобігання надмірним викидам парникових газів, сприяння їх поглинанню, а також адаптація до зміни клімату. Першочерговим кроком для ефективної адаптації до зміни клімату є чітке розуміння очікуваних наслідків, уразливостей і ризиків, пов'язаних зі зміною клімату у короткостроковій, середньостроковій і довгостроковій перспективах для основних сфер життєдіяльності суспільства. Виділяють чотири типи заходів з адаптації до зміни клімату, що активно впроваджуються в багатьох країнах світу. Вони спрямовані на підвищення адаптаційного потенціалу, зниження ризиків та ступеня чутливості, збільшення потенціалу для подолання надзвичайних подій та отримання вигоди внаслідок кліматичних змін [6]:

1) **Заходи, спрямовані на зміцнення адаптаційного потенціалу** міст до зміни клімату, передбачають відповідні рішення уряду, інформаційні кампанії чи наукові дослідження, що аналізують та оцінюють існуючі ризики та загрози. Вони включають оцінку вразливості секторів міського розвитку та ризиків для населення міст, дослідження наслідків зміни клімату, аналіз витрат і вигід, картування повеней та пожеж, розроблення планів дій у випадках стихійних лих тощо.

2) **Заходи, спрямовані на зниження ризику та ступеня чутливості** населення міст до наслідків зміни клімату, мають підготовчий характер і спрямовані на зменшення потенційно небезпечних наслідків та на підвищення стійкості міст. До них залучено широке коло учасників на всіх адміністративних рівнях і в усіх соціально-економічних галузях міста. Системи раннього оповіщення про надзвичайні події, нові будівельні норми і правила для захисту будівель від екстремальних погодних умов сприяють зниженню ризиків ушкоджень та руйнувань, а також спрямовані на зниження ступеня чутливості людей, майна та природних ресурсів до дії довгострокових кліматичних змін.

3) **Заходи, спрямовані на підвищення потенціалу міст для подолання надзвичайних кліматичних подій**, застосовують під час або після стихійних лих із масштабною мобілізацією людських та фінансових ресурсів. Такі заходи розробляють і планують заздалегідь, і відповідальність за їх реалізацію покладається на адміністративні органи. Заходи включають створення «місць для охолодження» під час сильної спеки, швидку мобілізацію спеціальних бригад для розчищення доріг після ураганів та повеней, виділення коштів із спеціального фонду на випадок пожеж або інших надзвичайних ситуацій.

4) **Заходи, спрямовані на отримання вигоди**, окреслюють позитивні аспекти кліматичних змін та розкривають перспективи залучення додаткового фінансування до певних секторів міського розвитку та галузей економіки [6]. Наприклад, програми інвестування енергоефективної реконструкції житлово-комунального господарства, зелені тарифи для сонячної енергетики тощо.

Для умов України визначення таких заходів та формулювання методичних рекомендацій було здійснено в дослідженні «Оцінка вразливості до змін клімату: Україна» [8]. Включення цих заходів до стратегічних документів розвитку міст дозволить суттєво посилити стійкість урбанізованих територій до кліматичних ризиків. Необхідними умовами успішного втілення адаптаційних стратегій є обізнаність муніципальної влади щодо наслідків кліматичних змін та готовність до активного впровадження відповідних заходів, наявність інформаційної бази оцінок масштабів та ризиків, спроможність розробляти дієві стратегічні плани з адаптації, можливість залучення фінансування, високий рівень екологічної свідомості та соціальної відповідальності населення, активність громадянського суспільства. Загальна схема підготовки стратегії з адаптації до впливів зміни клімату має включати такі кроки: визначення очікуваних впливів зміни клімату і створення умов для успішного втілення адаптаційних процесів, оцінка вразливості території та секторів міського розвитку, визначення напрямків стратегії з адаптації, вибір та впровадження адаптаційних заходів. Місцеві стратегії з адаптації мають бути невід'ємною частиною будь-якої стратегії територіального розвитку при розробці місцевих планів реконструкції соціального житла, реагування на спалахи хвороб, протипаводкових заходів, розвитку систем місцевої екологічної стабільності, транспортної інфраструктури тощо.

Відповідно до рекомендацій Європейської Комісії всі політики, стратегії, плани і програми повинні враховувати повний обсяг ризиків, пов'язаних зі зміною клімату [20]. В Україні підхід до включення заходів з адаптації до стратегічних планів розвитку міст реалізується через ініціативу «Угода мерів за сталий енергетичний розвиток на місцевому рівні», що була започаткована Європейською комісією в 2008 році. На сьогодні підписантами Угоди є понад 190 міст, селищ та ОТГ, в яких проживає близько 49% населення України [12]. Відповідно до Угоди міста зобов'язуються здійснювати заходи для сприяння сталому енергетичному розвитку, пом'якшенню зміни клімату, зменшенню кількості викидів парникових газів та адаптації до наявних змін. Кожне місто-учасник має створити Базовий кадастр викидів та розробити і реалізувати План дій зі сталого енергетичного розвитку та клімату до 2030 року [6].

На виконання Паризької угоди та Плану заходів щодо виконання Концепції реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року розроблено Стратегію низьковуглецевого розвитку України до 2050 року, в якій Україна взяла на себе зобов'язання по досягненню зниження індикативного показника викидів парникових газів на 31–34% у 2050 році порівняно з 1990 роком [8]. Для зниження темпів глобального потепління до 1,5°C необхідні швидкі та широкомасштабні зміни у використанні енергетичних, земельних, міських та інфраструктурних об'єктів (включаючи транспорт і будівлі) і промислових систем [3]. Слід зазначити, що за останні роки Україна значно піднялася в рейтингу Climate Change Performance Index, увійшовши у світові ТОП-20 країн, що здійснюють значний внесок у розвиток міжнародного

кліматичного руху [19]. Міста є центрами інноваційного розвитку, що посилює відповідальність та відкриває можливості перевести процеси адаптації та підвищення стійкості до зміни клімату на якісно новий рівень.

Висновки

1. В результаті глобальних кліматичних змін зростає тривалість спекотних періодів та інтенсивність стихійних гідрометеорологічних явищ, змінюється режим випадання опадів, що у поєднанні з підвищенням темпів урбанізації представляє серйозну загрозу соціальній стабільності, економічній та екологічній безпеці міського населення та середовища.

2. Серед секторів міського розвитку транспортна інфраструктура та міська мобільність, промисловість та розвиток підприємництва, житлово-комунальне господарство та публічний простір, розбудова міста і земельні відносини найбільш суттєво впливають на кліматичні зміни.

3. За умов належного стратегічного планування та розвитку, такі міські сектори, як інвестиції, охорона здоров'я та здоровий спосіб життя, освіта, соціальна підтримка та допомога, екополітика та охорона довкілля, безпека та цивільний захист, адміністративні послуги, можуть значно сприяти зменшенню негативних наслідків урбанізації на клімат та підвищити захист міського населення та територій від впливу кліматичних змін.

4. Вразливим до кліматичних впливів виявився туристичний сектор міського розвитку, а також встановлено опосередковані взаємозв'язки з кліматичними змінами для таких секторів, як історична та архітектурна спадщина, культура та ринок праці.

5. Зменшення вразливості міст до кліматичних змін передбачає заходи, спрямовані на підвищення адаптаційного потенціалу, зниження ризиків та ступеня чутливості, збільшення потенціалу для подолання надзвичайних подій та отримання вигоди внаслідок кліматичних змін.

6. Зниження впливу урбанізованого середовища на кліматичні зміни потребує комплексного стратегічного плану для кожного сектору міського розвитку з переліком конкретних заходів на основі кращого міжнародного досвіду з адаптацією до конкретних міських територій.



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



The publication was prepared in the framework of project «Multilevel Local, Nation- and Regionwide Education and Training in Climate Services, Climate Change Adaptation and Mitigation 619285-EPP-1-2020-1-FI-EPPKA2-CBHE-JP» The European Commission's support for the production of this publication does not constitute an endorsement of the contents, which reflect the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Демоскоп Weekly. Волны жары и смертность населения. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.demoscope.ru/weekly/2010/0439/tema02.php>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 10.04.2021.
2. Державна служба України з надзвичайних ситуацій [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dsns.gov.ua/>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 10.04.2021.
3. Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіт. доповідь / [С.П. Іванюта, О.О. Коломієць, О.А. Малиновська, Л.М. Якушенко]; за ред. С.П. Іванюти. – К. : НІСД, 2020. – 110 с.
4. Інформаційно-аналітична довідка про виникнення НС в Україні упродовж 2019 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/103179.html>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 10.04.2021.
5. Кривомаз Т.І. Зниження впливу будівельної галузі на кліматичні зміни шляхом впровадження принципів зеленого будівництва / Т.І. Кривомаз, А.М. Савченко // Екологічна безпека та природокористування. – 2021. – № 37 (1). – С. 55-68.
6. Массей Е. Довід Європейського Союзу в адаптації до зміни клімату та застосування його в Україні. – Бюро Координатора з економічної та довкілляної діяльності ОБСЄ, 2012. – 40 с.
7. Обиход Г. Організаційно-економічні механізми превентивації впливу кліматичних змін на урбонуральні території / Г. Обиход, А. Омельченко // Економіка природокористування і сталий розвиток. – 2020. – № 7. – С. 15–20.
8. Оцінка вразливості до змін клімату: Україна [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://necu.org.ua/wpcontent/uploads/ukraine_cc_vulnerability.pdf. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 10.04.2021.
9. Стратегія розвитку міста Києва до 2025 року (нова редакція) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dei.kyivcity.gov.ua/files/2017/7/28/Strategy2025new.pdf>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 10.04.2021.
10. Шевченко О., Сніжко С. Зміна клімату та українські міста: прояви та проєкції до кінця ХХІ століття на основі RCP-сценаріїв / О. Шевченко, С. Сніжко // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка: ГЕОГРАФІЯ. – 2019. – 2(75). – С. 11–18.
11. A Good Climate For Counties [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=3773. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 10.04.2021.
12. C40 Cities [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.c40.org. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 10.04.2021.
13. Cities and climate change global report on human settlements. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://unhabitat.org/cities-and-climate-change-global-report-on-human-settlements-2011>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 10.04.2021.
14. Climate Change Performance Index. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.climate-changeperformance-index.org>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 10.04.2021.
15. Comparing apples and oranges: The dependent variable problem in comparing and evaluating climate change adaptation policies. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378013001283>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 10.04.2021.
16. GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://grace.jpl.nasa.gov>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 10.04.2021.
17. Guide to Climate Change Adaptation in Cities – The International Bank for Reconstruction and Development, 2011 – 100 p.

18. Hoffmann P. Statistical-dynamical downscaling of the urban heat island in Hamburg, Germany / P. Hoffmann, R. Schoetter, K.H. Schlünzen // *Meteorologische Zeitschrift*. – 2016. – Vol. 27(2). – P. 89–109.
19. IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ipcc.ch>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 10.04.2021.
20. ISO 14090 «Адаптація до зміни клімату – принципи, вимоги та керівництва» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.cntd.ru/document/1200167738>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 10.04.2021.
21. Kozarcenin S. The effect of increased coupling strength between electricity and heating systems in different climate scenarios for Europe / S. Kozarcenin, G.B. Andresen // *Energy and Climate Change*. – 2021. – Vol. 2. – 100039.
22. Kryvomaz T. Applying of green building standards for implementation of the city development strategies in Kyiv / T. Kryvomaz, D. Varavin // *USEFUL*. – 2019. – Vol. 3(1). – P. 16-30.
23. New Climate Economy. A Roadmap for Financing Sustainable Infrastructure [Електронний ресурс]. – Режим доступу: newclimateeconomy.report/2016/a-roadmap-for-financing-sustainable-infrastructure. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 10.04.2021.
24. Santer B. D. Celebrating the Anniversary of Three Key Events in Climate Change Science / B.D. Santer, C.J.W. Bonfils, Q. Fu, J.C. Fyfe, G.C. Hegerl, C. Mears, J.F. Painter, S. Po-Chedley, F.J. Wentz, M.D. Zelinka, C.-Z. Zou // *Nature Climate Change*. – 2019. – Vol. 9. – P. 180–182.
25. The United Nations Human Settlements Programme – UN-НАВІТАТ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://unhabitat.org>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 10.04.2021.
26. World Health Organization (WHO) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.who.int. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 10.04.2021.

Стаття надійшла до редакції 15.04.2021 і прийнята до друку після рецензування 31.05.2021

REFERENCES

1. Demoskop Weekly. Volny zhary i smertnost' naselenija [Demoscope Weekly. Heat waves and mortality]. Retrieved 10.04.2021 from: <http://www.demoscope.ru/weekly/2010/0439/tema02.php> (in Russian).
2. State emergency service of Ukraine. Retrieved 10.04.2021 from <https://www.dsns.gov.ua/> (in Ukrainian).
3. Ivaniuta, S.P., Kolomiets, O.O., Malynovska, O.A., & Yakushenko, L.M. (2020). *Zmina klimatu: naslidky ta zakhody adaptatsii: analit. dopovid* [Climate change: consequences and adaptation measures: analyte. report]. (S.P. Ivaniuta, Ed.). Kyiv: NISD (in Ukrainian).
4. Informatsiyno-analitychna dovidka pro vynyknennya NS v Ukrayini uprodovzh 2019 roku [Information and analytical report on the occurrence of emergencies in Ukraine during 2019]. Retrieved 10.04.2021 from: <https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/103179.html> (in Ukrainian).
5. Kryvomaz, T. I., & Savchenko, A. M. (2021). The reducing of construction industry influence on climate change by implementation of green building principles. *Environmental Safety and Natural Resources*, 37 (1), 55-68. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.1.55-68> (in Ukrainian).
6. Massey, E. (2012). *Dosvid Yevropeys'koho Soyuzu v adaptatsiyi do zminy klimatu ta zastosuvannya yoho v Ukrayini* [The experience of the European Union in adapting to climate change and its application in Ukraine]. Office of the OSCE Economic and Environmental Coordinator (in Ukrainian).
7. Obykhod, H., & Omel'chenko, A. (2020). Orhanizatsiyno-ekonomichni mekhanizmy preventyziatsiyi vplyvu klimatychnykh zmin na urborural'ni terytoriyi [Organizational and

- economic mechanisms for preventing the impact of climate change on urban areas]. *Ekonomika pryrodokorystuvannya i stalyy rozvytok*, 7, 15-20 (in Ukrainian)
8. Otsinka vrazlyvosti do zmin klimatu: Ukrayina [Climate change vulnerability assessment: Ukraine]. Retrieved 10.04.2021 from: http://necu.org.ua/wpcontent/uploads/ukraine_cc_vulnerability.pdf (in Ukrainian)
9. Stratehiyi rozvytku mista Kyyeva do 2025 roku (nova redaktsiya) [Kyiv City Development Strategies until 2025 (new edition)]. Retrieved 10.04.2021 from: <https://dei.kyivcity.gov.ua/files/2017/7/28/Strategy2025new.pdf> (in Ukrainian)
10. Shevchenko, O., & Snizhko, S. (2019). Zmina klimatu ta ukrayins'ki mista: proyavy ta proektsiyi do kintsya KhKhI stolittya na osnovi RCP-stsenariyiv [Climate change and Ukrainian cities: manifestations and projections to the end of the XXI century based on RCP-scenarios]. *Visnyk Kyyivs'koho natsional'noho universytetu imeni Tarasa Shevchenka: HEOHRAPHIA*, 2 (75), 11-18 (in Ukrainian)
11. A Good Climate For Counties. Retrieved 10.04.2021 from: https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=3773.
12. C40 Cities. Retrieved 10.04.2021 from: www.c40.org.
13. Cities and climate change global report on human settlements. Retrieved 10.04.2021 from: <https://unhabitat.org/cities-and-climate-change-global-report-on-human-settlements-2011>.
14. Climate Change Performance Index. Retrieved 10.04.2021 from: <https://www.climate-changeperformance-index.org>.
15. Comparing apples and oranges: The dependent variable problem in comparing and evaluating climate change adaptation policies. Retrieved 10.04.2021 from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378013001283>.
16. GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) Retrieved 10.04.2021 from: <https://grace.jpl.nasa.gov>.
17. Guide to Climate Change Adaptation in Cities (2011). The International Bank for Reconstruction and Development.
18. Hoffmann, P., Schoetter, R., & Schlünzen, K.H. (2016). Statistical-dynamical downscaling of the urban heat island in Hamburg, Germany. *Meteorologische Zeitschrift*, 27 (2), 89-109.
19. IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change Retrieved 10.04.2021 from: <https://www.ipcc.ch>.
20. ISO 14090 «Adaptatsiya do zminy klimatu – pryntsypy, vymohy ta kerivnytstva» [ISO 14090 "Climate change adaptation – principles, requirements and guidelines"]. Retrieved 10.04.2021 from: <https://docs.cntd.ru/document/1200167738> (in Ukrainian).
21. Kozarcenin, S., & Andresen, G.B. (2021). The effect of increased coupling strength between electricity and heating systems in different climate scenarios for Europe. *Energy and Climate Change*, 2, 100039.
22. Kryvomaz, T., & Varavin, D. (2019). Applying of green building standards for implementation of the city development strategies in Kyiv. *USEFUL*, 3 (1), 16-30.
23. New Climate Economy. A Roadmap for Financing Sustainable Infrastructure. Retrieved 10.04.2021 from: newclimateeconomy.report/2016/a-roadmap-for-financing-sustainable-infrastructure.
24. Santer, B.D., Bonfils, C.J.W., Fu, Q., Fyfe, J.C., Hegerl, G.C., Mears, C. et al. (2019). Celebrating the Anniversary of Three Key Events in Climate Change Science. *Nature Climate Change*, 9, 180-182.
25. The United Nations Human Settlements Programme – UN-HABITAT. Retrieved 10.04.2021 from: <https://unhabitat.org>.
26. World Health Organization (WHO). Retrieved 10.04.2021 from: www.who.int.

The article was received 15.04.2021 and was accepted after revision 31.05.2021

Кривомаз Тетяна Іванівна

доктор технічних наук, кандидат біологічних наук, професор кафедри охорони праці та навколишнього середовища Київського національного університету будівництва та архітектури

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

ORCID ID: 0000-0001-7426-8745, **e-mail:** ecol@i.ua

Савченко Антоніна Михайлівна

старший викладач Київського національного університету будівництва та архітектури

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

e-mail: asav2509@gmail.com

UDC 504.06

Vasyl M. Trysnyuk, Dr. Sc. (Tech)

ORCID 0000-0001-9920-4879, *e-mail*: trysnyuk@ukr.net

Viktor O. Shumeiko, PhD (Tech)

ORCID 0000-0002-0285-4566, *e-mail*: shym1983@ukr.net

Yuriy M. Holowan, graduate student

ORCID 0000-0001-7050-9310, *e-mail*: dirrecta@gmail.com

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

MECHANISM TO DETERMINE QUANTITATIVELY CHARACTERIZE THE LEVEL OF CONCENTRATION OF POLLUTANTS EMISSIONS ROAD TRANSPORT

***Summary.** The basic mechanisms of pollution of the surface atmosphere and upper soil layer emission car transport roadside strip. Road transport, together with heavy industry, is one of the main air pollutants. Exhaust gases, crankcase gases, smoke, soot lead to complex chemical reactions in the surface layer of the atmosphere. Presented a number of methods to assess the level of contamination, analyses their strengths and weaknesses. Considered methodology issuance previous forecast spread of contamination including disturbing factors and their impact on the concentration of contaminants, as well as mathematical tools to determine the quantitative characteristics of concentration levels pollutants substances. The developed methodology is one of the ways to issue a preliminary forecast of the spread of pollution, taking into account disturbing factors in the presence of a priori data. This methodology takes into account a set of factors influencing the level of pollution concentration and the empirically obtained functional dependences of the influence of each of the disturbing components on the level of pollution. The constructed model of interaction of the established factors in the form of the graph of interaction characterizes causal relations.*

***Keywords:** landscapes by element maps; geocological ground; ecosystem; background content*

В.М. Триснюк, В.О. Шумейко, Ю.М. Голован

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

МЕХАНІЗМ ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РІВНЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ВИКИДАМИ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

***Анотація.** Проаналізовано основні механізми забруднення приземного шару атмосфери і верхнього ґрунтового шару викидами автомобільного транспорту у придорожній смузі. Автомобільний транспорт разом із важкою промисловістю відноситься до основних забруднювачів атмосфери. Відпрацьовані гази, картерні гази, дими, сажка призводять до складних хімічних реакцій в приземному шарі атмосфери. Наведено ряд методів оцінки рівня забруднення, проаналізовано їх сильні та слабкі місця. Розглянута методологія видачі попереднього прогнозу розповсюдження забруднення*

© В.М. Триснюк, В.О. Шумейко, Ю.М. Голован, 2021

ISSN: 2411-4049. Екологічна безпека та природокористування, № 2 (38), 2021

з урахуванням збурюючих чинників та їх впливу на рівень концентрації забруднень, а також математичний апарат для визначення кількісних характеристик рівня концентрації забруднюючих речовин. Розроблена методологія є одним зі способів видачі попереднього прогнозу розповсюдження забруднень з урахуванням збурюючих чинників за наявності апріорних даних. В даній методології враховуються сукупність чинників впливу на рівень концентрації забруднень і отримані емпіричним шляхом функціональні залежності впливу кожної зі збурюючих складових на рівень забруднення. Побудована модель взаємодії встановлених чинників у вигляді графа взаємодії характеризує причинно-наслідкові відносини.

Ключові слова: ландшафти; поелементні карти; геоекологічний полігон; екосистема; фоновий вміст

DOI: 10.32347/2411-4049.2021.2.79-93

Постановка проблеми

Проблема забруднення довкілля викидами автомобільного транспорту залишається надзвичайно актуальною протягом вже достатньо довгого часу, і в майбутньому її актуальність буде тільки зростати. Масштаби забруднення збільшуються пропорційно до темпів автомобілізації суспільства. Найбільш негативні наслідки автотранспортне забруднення складає для територій, що знаходяться поблизу основних автошляхів. В рамках таких придорожніх смуг концентрація шкідливих речовин може перевищувати ГДК в декілька разів. Вплив транспортних викидів відчувається на відстані 1–2 км від автодороги та розповсюджується на висоту близько 300 м.

Поточна ситуація потребує розробки і впровадження комплексу методів кількісної оцінки масштабу забруднень конкретної ділянки придорожньої смуги. Масштаби та специфіка забруднення залежать від низки чинників: завантаженості автодороги, типу транспорту, який є переважним на даній ділянці (маються на увазі перш за все технічні характеристики двигуна внутрішнього згоряння), рельєфу місцевості, поточних метеорологічних умов та загальної характеристики клімату, наявності та параметрів захисних лісосмуг тощо. Також проблема потребує розробки математично обґрунтованої методики прогнозування розподілу викидів в рамках придорожньої смуги.

Аналіз останніх досліджень. Проблеми моделювання забруднення земель вздовж автомобільних доріг, на чому ґрунтуються екологічний аудит, екологічний моніторинг та екологічна безпека, розглянуті в багатьох опублікованих роботах. Для України велике значення щодо висвітлення проблем екологічної оцінки мають праці О.М. Трофимчука [1], О.С. Бутенко [7], І.М. Волошина [2], О.М. Адаменка [3], В.М. Гуцуляка [4] та багатьох інших дослідників.

Метою роботи є дослідження впливу забруднення земель вздовж автомобільних доріг за допомогою комп'ютерно-картографічного моделювання та побудови поелементних еколого-техногеохімічних карт.

Виклад основного матеріалу

В першу чергу необхідно провести аналіз основних чинників і компонентів забруднення.

Спектр хімічних речовин, що виділяються під час руху автотранспорту, є достатньо широким. Їх можна поділити на дві великі категорії. Перша група

токсичних речовин пов'язана з хімічними реакціями окислення палива, що протікають як в період перед згорянням, так і в процесі згоряння. Друга група токсичних речовин утворюється при з'єднанні азоту і надмірного кисню в продуктах згоряння.

Під час роботи двигуна внутрішнього згоряння джерелами викидів шкідливих речовин є відпрацьовані гази (далі – ВГ), картерні гази та продукти випаровування із системи живлення. Серед цих джерел основним є ВГ, які мають складний хімічний склад: більше 1000 різних шкідливих речовин, які чинять негативний вплив на довкілля, і лише 200 з них розпізнано. Основними є: оксид вуглецю CO, вуглеводні (загальна формула C_xH_y), оксиди азоту (NO), канцерогенні речовини, до яких належать складні ароматичні вуглеводні поліциклічної будови (найпоширенішим є бенз(а)пірен $C_{20}H_{12}$), альдегіди (RCHO), сполуки свинцю (PbO_4) і сажа (C). В картерних газах і випаровуваннях містяться, в основному, вуглеводні [4, 7, 8].

Процентний розподіл між трьома джерелами шкідливих викидів характеризується в табл. 1.

Таблиця 1 – Процентний розподіл між трьома джерелами шкідливих викидів

	CO	C_xH_y	NO _x
Відпрацьовані гази	100	55	100
Картерні гази	-	25	-
Випаровування палива	-	20	-

Також рух автотранспорту призводить до відкладення сполук важких металів. Важкі метали відкладаються в придорожніх смугах як в результаті роботи власне автотранспортних засобів, так і при стиранні полотна дороги. В результаті стирання автомобільних шин в ґрунті поблизу автодороги осідають такі елементи, як алюміній, кобальт, мідь, залізо, цинк, кадмій, свинець та ін. Первинну їх дію відчувають рослинні організми.

Бензинові та дизельні ДВЗ мають свої переваги та недоліки в контексті забруднення навколишнього середовища. Гранично допустима концентрація шкідливих речовин у складі їх ВГ також різняться (табл. 2).

Таблиця 2 – ГДК шкідливих речовин у складі ВГ для двигунів двох основних категорій

Назва речовини	Бензинові	Дизелі
Оксид вуглецю (CO), %	10	0,3
Вуглеводні (C_xH_y), %	2	0,5
Оксиди азоту (NO _x), %	0,6	0,2
Альдегіди (RCHO), %	0,2	0,05
Двооксид сірки (SO ₂), мг/м ³	0,003	0,015
Сажа, мг/м ³	100	2000
Сполуки свинцю, мг/м ³	60	0
Канцерогени (бенз(а)пірен), мг/м ³	25	10

Як бачимо, викиди основних забруднюючих речовин значно нижче в дизельних ДВЗ. Проте вони відрізняються підвищеними викидами сажі, що утворюється унаслідок перевантаження палива. Сажа насичена

канцерогенними вуглеводнями і мікроелементами; їх викиди в атмосферу неприпустимі [9, 10, 11].

Використання дизелю дає можливість запобігти викидам в атмосферу сполук свинцю. Але цьому можна запобігти і в разі невикористання етильованого палива у бензинових ДВЗ.

Також масштаб та характер забруднення залежить від швидкості руху автомобіля. Ця залежність має непрямий характер. Відомо, що найбільш забрудненими є центральні вулиці великих міст. Це трапляється не лише з причини високого рівня автомобілізації на даних автошляхах, а й з тієї причини, що при автомобільних «пробках» та великій кількості світлофорів двигун багато часу проводить на холостому ході, що призводить до надзвичайно великих викидів.

До того ж спрацьовує ряд інших чинників, що впливають па режим руху автомобіля. Це, наприклад, рельєф місцевості та якість покриття автодороги. Ідеальним є постійний рух зі швидкістю 60 км/год, відповідно, покриття низької якості та розчленований рельєф (наприклад, гірський) є додатковими чинниками, що збільшують забруднення (при гальмуванні та прискоренні, чергування яких за таких умов є постійним, загальний об'єм викидів зростає у 8 разів) [12].

Викиди автотранспорту розподіляються в основному в приземному шарі атмосфери, а також в зоні аерації ґрунтового покриву. Розглянемо механізми цього розподілу.

Автомобільний транспорт разом із важкою промисловістю відноситься до основних забруднювачів атмосфери. Відпрацьовані гази, картерні гази, дими, сажа призводять до складних хімічних реакцій в приземному шарі атмосфери. Результатом таких реакцій є синтез небезпечних для екосистеми речовин, таких як озон, утворення фотохімічного смогу, підвищення середньої температури повітря, що призводить до появи «парникового ефекту». Автомобільні викиди розповсюджуються і трансформуються в атмосфері за певними закономірностями. Так, тверді частинки розміром більше 0,1 мм осідають на підстилаючих поверхнях (в основному через дію гравітаційних сил) і забруднюють ґрунтовий покрив. Частинки, розмір яких менше 0,1 мм, а також газові домішки у вигляді CO, C_xH_y, NO_x, SO_x розповсюджуються в атмосфері під впливом процесів дифузії. Вони вступають в процеси фізико-хімічної взаємодії між собою і з компонентами атмосфери, і їх дія виявляється на локальних територіях в межах певних регіонів [9].

Ступінь забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту залежить від можливості перенесення даних забруднюючих речовин на значні відстані, рівня їх хімічної активності, метеорологічних умов розповсюдження.

Компоненти шкідливих викидів з підвищеною реактивною здатністю, потрапляючи у вільну атмосферу, взаємодіють між собою і компонентами атмосферного повітря. При цьому розрізняють фізичну, хімічну і фотохімічну взаємодії.

Приклади фізичного реагування: конденсація пари кислот у вологому повітрі з утворенням аерозолі, зменшення розмірів крапель рідини в результаті випаровування в сухому теплому повітрі. Рідкі і тверді частинки можуть об'єднуватися, адсорбувати або розчиняти газоподібні речовини.

Реакції синтезу і розпаду, окислення і відновлення здійснюються між газоподібними компонентами забруднюючих речовин і атмосферним повітрям.

Деякі процеси хімічних перетворень починаються безпосередньо з моменту надходження викидів в атмосферу, інші – при появі для цього сприятливих умов – необхідних реагентів, сонячного випромінювання, інших чинників.

При виконанні транспортної роботи істотним є викид з'єднань вуглецю у наступному вигляді: CO (може окислюватися до CO₂, за наявності домішок – до сильних окислювачів (O, O₃), перекисних з'єднань і вільних радикалів); C_xH_y (в результаті утворюються перекиси, вільні радикали, з'єднання і оксиди азоту і сірки) [6].

З'єднання азоту, що потрапляють в атмосферу від об'єктів автотранспортного комплексу, представлені в основному NO і NO₂. Монооксид азоту, що виділяється в атмосферу під впливом сонячного світла, інтенсивно окислюється атмосферним киснем до діоксиду азоту. Кінетика подальших перетворень діоксиду азоту визначається його здатністю поглинати ультрафіолетові промені і дисоціювати на монооксид азоту та атомарний кисень в процесах фотохімічного смогу.

Значна частка викидів розподіляється також в ґрунтах. Негативна дія автомобільного транспорту на ґрунтовий покрив придорожньої смуги визначається надходженням в ґрунт найрізноманітніших хімічних речовин, серед яких важким металам і, перш за все, свинцю і його з'єднанням в численних дослідженнях приділялася найбільш пильна увага. Проте проблема забруднення свинцем придорожного ґрунтового покриву стає все менш актуальною. В той же час все більш гостро виявляється проблема забруднення ґрунтів нафтопродуктами, бенз(а)піреном, з'єднаннями цинку і деяких інших важких металів [15, 16].

Підвищений вміст цинку став характерним явищем, яке через свою екологічну небезпеку вимагає пильного контролю і уважного вивчення.

Цинк поступає в придорожній простір в результаті стирання різних деталей, ерозії оцинкованих поверхонь, зносу шин, за рахунок використання в маслах присадок, що містять цей метал. Масова частка цинку в моторних маслах для бензинових двигунів складає 0,09–0,12%, у маслах для дизельних двигунів – 0,05–0,1%.

Після відмови від використання з'єднань кадмію в процесах вулканізації гуми і заміни їх з'єднаннями цинку стирання автомобільних шин також стало одним з джерел накопичення цього металу уздовж дороги. В результаті цих процесів уздовж автомобільних доріг формуються геохімічні аномалії цинку. На жаль, методологія розрахунків накопичення цинку в придорожніх ґрунтах поки не розроблена, процеси міграції і накопичення цинку, що відбуваються в ґрунті, недостатньо вивчені, що не дозволяє упевнено прогнозувати процеси його розподілу в ґрунті.

Отримані дані показують, що проблема забруднення придорожніх ґрунтів цинком починає виявлятися все більш виразно. Тоді як численні вимірювання демонструють успіхи в боротьбі зі свинцевим забрудненням, небезпека накопичення в придорожніх ґрунтах неприпустимої кількості цинку наростає.

Нафтопродукти, що є композицією найрізноманітніших вуглеводнів, є, як загальновідомо, найбуденнішим і повсюдним забруднювачем придорожніх смуг. Незважаючи на те, що забруднення ними носить наймасштабніший і найпоширеніший характер, яких-небудь задовільних методик, що забезпечують прогнозні оцінки забруднення ґрунтів, до сьогодні не розроблено.

Серед показників, що характеризують забруднення ґрунту вуглеводнями, особливо значущим є бенз(а)пірен, що має канцерогенну дію. Бенз(а)пірен у складі інших поліциклічних ароматичних вуглеводнів міститься у відпрацьованих газах автомобільних двигунів [17].

Дослідження, що присвячені вмісту шкідливих речовин в ґрунтовому покриві, на сьогоднішній день є необхідними з багатьох причин. Специфіка хімічного складу ґрунту впливає на сільськогосподарські властивості ґрунтів придорожньої смуги. Знати її необхідно для оптимізації сільськогосподарської діяльності в придорожній смузі. Наприклад, деякі сільськогосподарські культури є більш стійкими до забруднення важкими металами. Також це питання набуває величезної актуальності в контексті грошової оцінки земельних ресурсів.

Оцінка характеру та масштабів забруднення навколишнього середовища викидами автотранспорту може бути виконана за допомогою комплексу методів, що враховують всі аспекти забруднення. Надзвичайно складно привести численні дані до єдиного інтегрального показника, який показував би рівень забруднення довкілля. Оскільки ми розглядаємо забруднення територій уздовж автошляхів, стан водоймищ в даному випадку не є принциповим, тому зупинимось докладніше на розрахунках забруднення повітря та ґрунтового покриву [18].

При забрудненні повітряного середовища слід виходити з ситуації, що склалася, враховуючи фоновий рівень забруднення, існуючі локальні джерела забруднення і перспективи їх зміни на прогностичний період. На основі цих даних можливе проведення осмислених оцінок, що дозволяють визначити внесок нового об'єкта (в даному випадку – автомобільної дороги) в забруднення атмосфери та порядок виконання необхідних природоохоронних заходів. У зв'язку з цим необхідно розглянути питання, пов'язані з фоновими концентраціями забруднюючих речовин, з оцінкою дії руху і з загальними діями при експлуатації дороги, виходячи з розглянутих природно-кліматичних умов на прогностичний період [7].

Забруднення атмосферного повітря відпрацьованими газами автомобілів зручно оцінювати за концентрацією оксиду вуглецю (мг/мі) за формулою:

$$K_{co} = 0,5 + 0,01 \times N \times K_m \times K_a \times K_y \times K_c \times K_b \times K_n,$$

де 0,5 – фонове забруднення атмосферного повітря нетранспортного походження, мг/мі; N – сумарна інтенсивність руху автомобілів на міській дорозі, автомобілів в годину; K_n – коефіцієнт, що залежить від типу транспортного засобу; K_a – коефіцієнт, що враховує аерацію місцевості; K_y – коефіцієнт, що враховує зміну забруднення атмосферного повітря залежно від величини поздовжнього ухилу; K_c – коефіцієнт, що враховує зміну концентрації СО залежно від швидкості вітру; K_b – коефіцієнт відносної вологості повітря; K_m – коефіцієнт токсичності автомобілів по викидах в атмосферне повітря оксиду вуглецю.

Коефіцієнт токсичності автомобілів визначається як середньозважений для потоку автомобілів за формулою:

$$K_m = P_i \times K_3,$$

де P_i – склад руху в долях одиниць; K_3 – коефіцієнт збільшення забруднення атмосферного повітря СО на перехрестях.

Нижче в таблицях наведені величини відповідних коефіцієнтів в залежності від конкретних параметрів місцевості.

Таблиця 3 – Значення K_n

Тип автомобіля	K_n
Середній вантажний	2,9
Автобус	3,7
Легкий вантажний	2,3
Важкий вантажний (диз.)	0,2
Легковий	1,0

Таблиця 4 – Значення K_a

Тип місцевості за ступенем аерації	K_a
Транспортні тунелі	2,7
Транспортні галереї	1,5
Магістральні вулиці та дороги з багатоповерховою забудовою з 2 боків	1,0
Житлові вулиці з одноповерховою забудовою, вулиці та дороги у виємці	0,6
Міські вулиці та дороги з одноповерховою забудовою, набережні, естакади, віадуки, високі насипи	0,4

Таблиця 5 – Значення K_v

Відносна вологість, %	K_v
100	1,45
90	1,30
80	1,15
70	1,00
60	0,85
50	0,75
40	0,60

Таблиця 6 – Значення K_u

Поздовжній ухил	K_u
0	1,00
2	1,06
4	1,07
6	1,18
8	1,55

Таблиця 7 – Значення K_c

Швидкість вітру	K_c
1	2,70
2	2,00
3	1,50
4	1,20
5	1,05
6	1,00

Таблиця 8 – Значення K_z

Тип перехрестя	K_z
Перехрестя, що регулюється:	
світлофорами звичайне	1,8
світлофорами кероване	2,1
саморегульоване	2,0
Нерегульоване:	
зі зниженням швидкості	1,9
кільцеве	2,2
з обов'язковою зупинкою	3,0

Згідно з використовуваною раніше методикою розрахунку забруднення ґрунту кількість забруднюючої речовини визначалася, виходячи з пропозиції, що всі викиди розподіляються упоперек дороги відповідно до нормального закону розподілу:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

де $\sigma = 60$.

Додатково враховувався факт наявності і класифікації лісонасаджень (залежність показана на рис. 1).

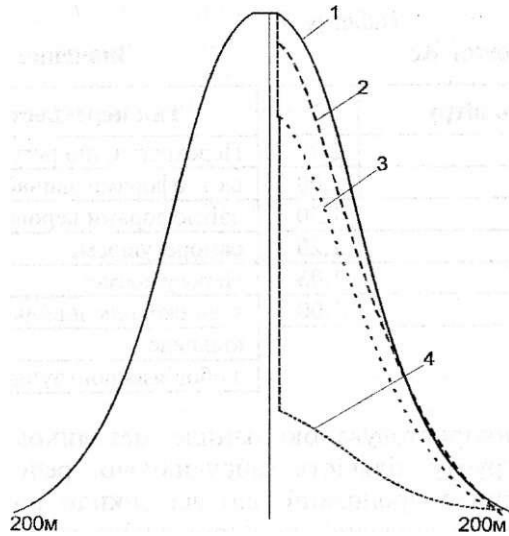


Рис. 1 – Розподіл забруднення уздовж дороги: 1 – лісосмуги немає; 2 – смуга чагарника; 3 – смуга дерев; 4 – зелений масив

Така методика розрахунку не дає можливості адекватно розрахувати концентрацію забруднень в реальних умовах, оскільки не враховується ряд збурюючих чинників.

Так само класичним варіантом підрахунку рівня забруднень є метод, заснований на використанні насамперед статистичних матеріалів, що стосуються завантаженості автошляхів, даних про найбільш розповсюджені типи автотранспорту (відповідно до цього детермінують найбільш уживаний тип палива). Похибка розрахунків на пряму залежить від якості даних, в ідеальних умовах потрібні навіть дані про марки автотранспортних засобів. Велика увага приділяється кореляції характеру забруднення з характеристиками клімату території та конкретними метеорологічними умовами (середні температури, їх добова амплітуда, річна кількість опадів, переважний напрям вітру в залежності від сезону тощо). Необхідними також є вихідні емпіричні дані про стан ґрунтового покриву (щільність ґрунту, товщина ґрунтового шару, в якому можуть розташовуватися з'єднання свинцю) [8].

Потужність емісій свинцю за даної середньодобової інтенсивності руху автотранспорту визначається за формулою:

$$P_e = K_n \times K_o \times K_m \times \sum(G_i \times P_i \times N_i),$$

де P_e – визначається в мг/мі на добу; $K_n = 0,74$ – коефіцієнт перерахунку одиниць виміру; $K_o = 0,8$ – коефіцієнт, що враховує осідання свинцю в системі випуску відпрацьованих газів; $K_m = 0,8$ – коефіцієнт, що враховує частку викидів свинцю у вигляді твердих елементів в загальному об'ємі викидів; G_i – середні експлуатаційні витрати палива для відповідної моделі автотранспорту; N_i – середньодобова інтенсивність руху автотранспорту вибраної моделі; P_i – вміст добавки свинцю в паливі, що застосовується на автомобілі обраного типу.

Рівень забруднення свинцем поверхневого ґрунтового шару на різних відстанях від автодороги визначається за формулою:

$$P_c = \frac{P_n}{h \times \rho},$$

де P_c – рівень забруднення ґрунту з'єднаннями свинцю, мг/кг; h – товщина ґрунтового шару (в метрах), в якому розташовуються викиди свинцю, для орних земель приймається за 0,2 м; ρ – щільність ґрунту; P_n – відклади свинцю на поверхні землі (мг/м³), величина яких визначається за формулою:

$$P_n = 0,4K_1 \times U_v \times T_p \times P_e,$$

де K_1 – коефіцієнт, що враховує відстань від автодороги; U_v – коефіцієнт, що залежить від сили та напрямку вітру, приймається як рівний відношенню площі рози вітрів з боку дороги, протилежного досліджуваній зоні, до загальної площі; T_p – розрахунковий строк експлуатації дороги в добах, приймається за 7300 діб, що відповідає 20-річному прогнозованому строку; P_e – потужність емісії свинцю.

Переваги цього методу перед розглянутим раніше полягають саме в більш детальному аналізі статистичних даних, що стосуються транспортних засобів, оскільки, як доведено вище, характеристики забруднення суттєво різняться в залежності від типу двигуна (типу палива) та інших параметрів. Проте коефіцієнти, що використовуються в даному методі, носять емпіричний характер, а співвідношення, отримані емпіричним шляхом, не дозволяють враховувати деякі особливості, зокрема наявність і використання апріорної інформації про місцевість і характер впливу окремих чинників або їх взаємний вплив на якість визначення рівня забруднень.

Для цього потрібне використання більш точної функціональної моделі на основі теорії статистичних рішень з урахуванням сезонних змін і інших особливостей аналізу місцевості. При цьому необхідне комплексування прескриптивної та дескриптивної моделей для об'єднання апріорної інформації, отриманої контактними і дистанційними методами зондування земної поверхні на заданій ділянці місцевості. Побудова такої функціональної моделі повинна бути заснована на алгебрі нечіткої логіки, що дозволяє аналізувати нечіткі ситуації і давати кількісні оцінки відповідним комбінаціям даних чинників впливу.

Наприклад, аналіз та урахування лише декількох чинників, таких як інтенсивність руху та його швидкість, крутизна схилу, кількість опадів, наявність лісосмуги, дає суттєві переваги при кількісній оцінці концентрації викидів автомобільного транспорту уздовж автошляхів. Розглянемо механізм урахування та взаємного впливу вищевказаних чинників на показник, що оцінює рівень забруднень в даній місцевості.

Аналізуючи проблему екологічного забруднення викидами автотранспорту уздовж доріг, торкаємось системи, що містить велике число змінних, які взаємодіють один з одним, реагуючих на зміни кожної іншої змінної, які представляються у вигляді причинно-наслідкових відносин, що можна виразити у вигляді графових моделей взаємодії (рис. 2). Використання нечіткої логіки як модель складної системи засноване на наступному. Найістотніші процеси для даної проблеми зображуємо вершинами графа. Від вершини u до вершини v проводиться дуга, якщо зміна u надає безпосередню істотну дію на v і дана дуга має знак «плюс», якщо дія є «посиленням» (за інших рівних умов збільшення u приводить до збільшення v і зменшення u – до зменшення v), і знак «мінус», – якщо дія викликає «гальмування» (за інших рівних умов збільшення u приводить до зменшення v і зменшення u – до збільшення v) [19].

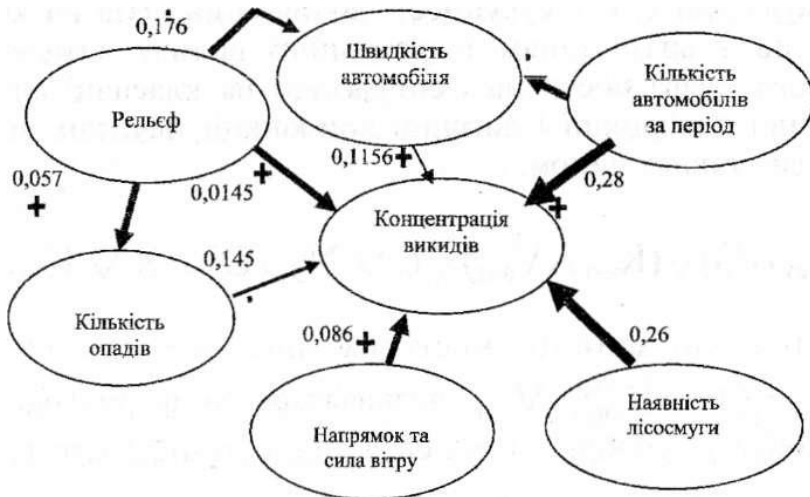


Рис. 2 – Базова структура моделі обліку забруднень автомобільним транспортом уздовж доріг

Для побудованого графа посилень, що показує взаємний вплив перерахованих вище чинників один на одного і впливи цих же чинників на кількість викидів солей свинцю $P_{рв}$, необхідно встановити значення вагових коефіцієнтів ступеня впливу відповідно до алгоритму Флойда. Ці коефіцієнти приймуть наступні значення:

- 1. При впливі чинника на кількість забруднень:
Рельєф (R) – 0,0145
Викиди автотранспорту ($K_{авт}$) – 0,28
Опади (O) – 0,145
Вітер (N_v) – 0,086
Наявність лісосмуги (L) – 0,26
Швидкість автотранспорту ($V_{авт}$) – 0,1156.

2. При взаємному впливі чинників:

Рельєфу на швидкість автотранспорту ($R \bullet V_{\text{авт}}$) – 0,176

Рельєфу і опадів ($R \bullet O$) – 0,057

Викиди автотранспорту і швидкість автотранспорту ($K_{\text{авт}} \bullet V_{\text{авт}}$) – 0,057.

Отримані значення вагових коефіцієнтів використовуються в подальших розрахунках, зокрема для обчислення консеквента (висновка сумісних логічних висловів) при операціях логічної диз'юнкції і кон'юнкції при визначенні інтегрального показника сукупності комбінаторних множин для побудови подальшої функціональної залежності, що визначає значення функції приналежності [13].

Таким чином, середнє значення інтегрального показника сукупності комбінаторних множин дорівнює 1,87.

Емпіричним шляхом, з використанням відповідних статистичних даних були визначені функціональні залежності впливу кожного з чинників на рівень забруднення: інтенсивності руху на даній дорозі; вірогідності проїзду даної марки машини; вмісту добавки свинцю в паливі, вживаному на автомобілі даного типу; вірогідності використання даної марки бензину.

Маршрути проводились для картографування територій ландшафтів на основі візуальних спостережень, для складання карт забруднення ґрунтів, поверхневих і ґрунтових вод, атмосферного повітря та порушень геологічного середовища вздовж автомобільних шляхів. Під час маршрутів, крім польового картування окремих компонентів урбоєкосистеми, відбирались проби (зразки) ґрунтів, поверхневих і ґрунтових вод, атмосферного повітря і рослинності. Всього було відібрано 105 проб ґрунтів, 38 проб поверхневих і 37 проб ґрунтових вод і 30 проб рослинності (рис. 3).

Всі проби були проаналізовані різними методами у Центральній біохімічній лабораторії м. Київ.

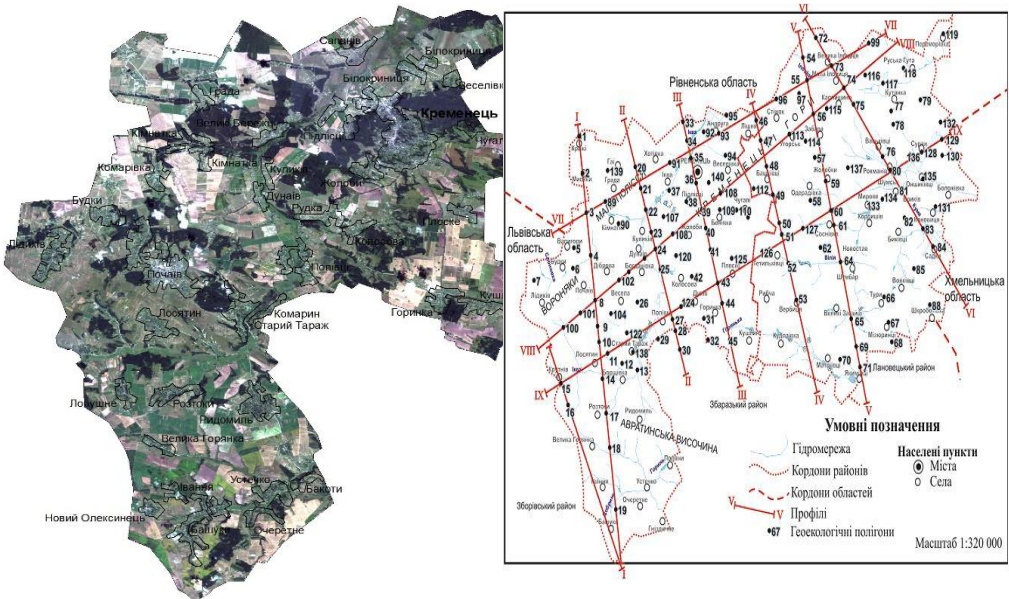


Рис. 3 – Космічний знімок з супутника Landsat 5 та картосхема відбору проб Кременецького району

В результаті були виготовлені еколого-техногеохімічні карти ґрунтів, поверхневих і ґрунтових вод, атмосферного повітря і рослинності (рис. 4).

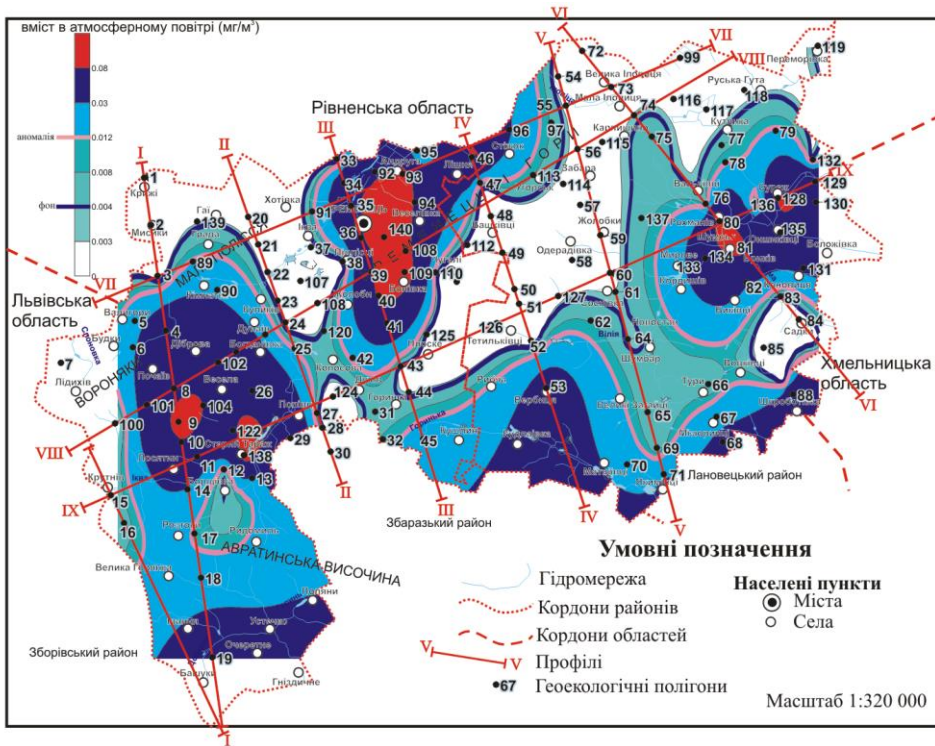


Рис. 4 – Картосхема розповсюдження вуглекислого газу (CO₂) в атмосферному повітрі

Характерною рисою більшості сучасних міст і сіл, в тому числі і Тернопільщини, є перетворення первинних природних ландшафтів у нові природно-техногенні геоекосистеми та досить істотна зміна екологічного стану основних компонентів урбоекосистеми [4, 5]. На екологічній карті відображені просторові особливості змін геологічного середовища, геофізичних полів, рельєфу, поверхневих і ґрунтових вод, атмосферного повітря, ґрунтового і рослинного покривів, стану здоров'я населення та об'єктів техносфери, яка істотно впливає на всі попередні складові природного середовища. Карта дозволила оцінити наскільки змінені первинні ландшафти, які кількісні і якісні зміни відбулись у всіх компонентах довкілля і як ці трансформації вплинули на людину.

Висновки

Розроблена методологія є одним зі способів видачі попереднього прогнозу розповсюдження забруднень з урахуванням збудуючих чинників за наявності апріорних даних. В даній методології враховуються сукупність чинників впливу на рівень концентрації забруднень і отримані емпіричним шляхом функціональні залежності впливу кожної зі збудуючих складових на рівень забруднення. Побудована модель взаємодії встановлених чинників у вигляді графа взаємодії характеризує причинно-наслідкові відносини.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Красовський Г.Я., Трофимчук О.М., Крета Д.Л., Клименко В.І., Пономаренко І.Г., Суходубов О.О. Синтез картографічних моделей забруднення земель техногенним пилом з використанням космічних знімків // Екологія і ресурси. – К.: ПНБ, 2005. – №12. – С. 37–55.
2. Адаменко О.М., Міщенко Л.В. Екологічний аудит територій: Підручник / О.М. Адаменко, Л.В. Міщенко. – Івано-Франківськ: ФАКЕЛ, 2000. – 241 с.
3. Гуцуляк В.М. Ландшафтна екологія. Геохімічний аспект: Навч. Посіб / В.М. Гуцуляк. – Чернівці: Рута, 2002. – 272 с.
4. Триснюк В.М. Екологія Гусятинського району / В.М. Триснюк. – Тернопіль. Тернограф. 2004. – 219 с.
5. Рудько Г.І., Назаренко М.В. Геоінформаційні технології в надрокористуванні / Г.І. Рудько, М.В. Назаренко – К.: «Академпрес», 2011. – 336 с.
6. Данилко В.К. Забруднення атмосферного повітря автомобільним транспортом: підходи до стратегічного визначення // Статистика України. – К., 2003. – № 4. – С. 9–11.
7. Бутенко О.С. Комплексний підхід к дешифруванню снимков по данным космического мониторинга / О.С. Бутенко, С.И. Березина, Г.Я. Красовский. – Екологічна безпека та природокористування: 36. наук. праць / М-во освіти і науки України, К., 2008. – Вип. 1. – С. 23–41.
8. Trysnyuk, V., Okhariev, V., Trysnyuk, T., Zorina, O., Kurylo, A., Radlowska, C. (2019). Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. In *18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, vol. 2019, p. 1-5.
<http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=98507>
DOI: 10.3997/2214-4609.201902084
9. Trysnyuk, V.M., Smetanin K.V., Trysnyuk T.V., Holowan Y.V., Kashchishin O.L., Radlowska K.O. (2019). The improvement of the system of ecological monitoring of the environment through the application of remotely piloted aircraft systems. *XIII International Scientific Conference – “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”*, Extended Abstracts.
<http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=10050>
10. Триснюк В.М. Аерогеолокаційний екологічний контроль. / В.М. Триснюк, А.В. Павлишин, А.В. Курило // MONOGRAFIA POKONFERENCYJNA. Warszawa, 2020. С. 46.
11. Триснюк В.М. Екологічна безпека телекомунікаційних систем та технологій / В.М. Триснюк, К.В. Сметанін, А.В. Курило, Ю.М. Голован, Т.В. Триснюк // Ризики нестабільності: безпека і управління. Міждисциплінарна науково-практична конференція. Київ. 16 березня 2018 р. – С. 49–52.
12. Okhariev, V., Trysnyuk, V. [2019] Environmental aspects of Ukrainian energy sector in connection with transition to low-carbon development. *Conference – Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*.
13. Trofymchuk O., Myrontsov M., Okhariev V., Anpilova Y., Trysnyuk V. [2021] Transdisciplinary analytical system for support the environmental researches. *Systems, decision and control in energy II. Studies in systems, decision and control*. Springer. Cham.
14. Trofymchuk, O., Lebid, O., et al. (2019). Dynamic certification of landslide protection structures in a seismically hazardous region of Ukraine: experimental and analytical research. Earthquake geotechnical engineering for protection and development of environment and constructions. In: Silvestri F., Moraci N. (eds.). Proc. of the VII ICEGE 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Rome, Italy, 17-20 June 2019, 5337-5344.
15. Макарова А.И. Ореолы рассеяния тяжелых металлов на территории, прилегающей к автомагистрали. / А.И. Макарова, С.Ф. Полунин, Н.П. Ильин, Ф.И. Славин // Гигиена и санитария, 1993, № 7. – С. 63–64.
16. Greben, S., Trofymchuk, O., Trysnyuk, V., Krasovskiy, G. [2020] Interpretation of remote sensing data for ecological tasks. *IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW): 10th*

International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (21–25 September, Kharkiv, Ukraine), Volume 3, P. 772–776.

17. Trofymchuk, O., Okhariev V., Trysnyuk V. [2019] Environmental security management of geosystems. *Conference Proceedings. 18th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*.

18. Триснюк В.М. Екологічна безпека Карпатського регіону в умовах техногенного пилового забруднення атмосферного повітря / В.М. Триснюк, В.О. Шумейко, Т.В. Триснюк, А.В. Курило, Ю.М. Голован, В.В. Мирончук // Збірник наукових праць «Системи управління, навігації та зв'язку». Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Випуск 1(59) 2020 р. С. 127–131.

19. Триснюк Т.В., Підвищення рівня екологічної безпеки об'єктів природно-заповідного фонду / Т.В. Триснюк, Ю.М. Голован, А.В. Курило // Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: Колективна монографія: XVII Міжнародна науково-практична конференція. Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ. Київ. 25-26 вересня 2018 р. – С. 213–214.

Стаття надійшла до редакції 25.01.2021 і прийнята до друку після рецензування 04.05.2021

REFERENCES

1. Krasovsky, G.Ya., Trofimchuk, O.M., Kreta, D.L., Klimenko, V.I., Ponomarenko, I.G., & Sukhodubov, O.O. (2005). Synthesis of cartographic models of land pollution by man-made dust using space images. *Ecology and resources*, 12, 37-55 (in Ukrainian).
2. Adamenko, O.M., & Mishchenko, L.B. (2000). *Ecological audit of territories: Textbook*. Ivano-Frankivsk: FAKEL (in Ukrainian).
3. Gutsulyak, V.M. (2002). *Landscape ecology. Geochemical aspect: Textbook*. Chernivtsi: Ruta (in Ukrainian).
4. Trysnyuk, V.M. (2004). *Ecology of Husiatyn district*. Ternopil: Ternograph (in Ukrainian).
5. Rudko, G.I., & Nazarenko, M.V. (2011). *Geoinformation technologies in subsoil use*. Kyiv: "Academpress" (in Ukrainian).
6. Danilko, V.K. (2003). Atmospheric air pollution by road transport: approaches to strategic determination. *Statistics of Ukraine*, 4, 9-11 (in Ukrainian).
7. Butenko, O.S., Berezina, S.I., & Krasovsky, G.Ya. (2008). A comprehensive approach to decoding images based on space monitoring data. *Environmental safety and nature resources*, 1, 23-41 (in Russian).
8. Trysnyuk, V., Okhariev, V., Trysnyuk, T., Zorina, O., Kurylo, A., & Radlowska, C. (2019). Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. In *18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*. (Vol. 2019, pp. 1-5). <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=98507>
DOI: 10.3997/2214-4609.201902084
9. Trysnyuk, V.M., Smetanin, K.V., Trysnyuk, T.V., Holowan, Y.V., Kashchishin, O.L., & Radlowska, K.O. (2019). The improvement of the system of ecological monitoring of the environment through the application of remotely piloted aircraft systems. In *XIII International Scientific Conference - "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, Extended Abstracts.
<http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=10050>
10. Trysnyuk, V.M., Pavlishin, A.V., & Kurilo, A.V. (2020). *Aerogelocation ecological control*. Warszawa.
11. Trysnyuk, V.M., Smetanin, K.V., Kurylo, A.V., Holovan, Yu.M., & Trysnyuk, T.V. (2018). Ecological safety of telecommunication systems and technologies. In *Risks of instability: security and management. Interdisciplinary scientific-practical conference*. (pp. 49-52). Kyiv (in Ukrainian).

12. Okhariev, V., & Trysnyuk, V. (2019). Environmental aspects of Ukrainian energy sector in connection with transition to low-carbon development. In *Conference - Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*.
13. Trofymchuk, O., Myrontsov, M., Okhariev, V., Anpilova, Y., & Trysnyuk, V. (2021). Transdisciplinary analytical system for support the environmental researches. In *Systems, decision and control in energy II. Studies in systems, decision and control*. Springer, Cham.
14. Trofymchuk, O., Lebid, O., et al. (2019). Dynamic certification of landslide protection structures in a seismically hazardous region of Ukraine: experimental and analytical research. Earthquake geotechnical engineering for protection and development of environment and constructions. In: Silvestri F., Moraci N. (eds.). *Proc. of the VII ICEGE 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Rome, Italy, 17-20 June 2019, 5337-5344.
15. Makarova, A.I., Polunin, S.F., Ilyin, N.P., & Slavin, F.I. (1993). Scattering halos of heavy metals in the area adjacent to the highway. *Hygiene and Sanitation*, 7, 63-64 (in Russian).
16. Greben, S., Trofymchuk, O., Trysnyuk, V., & Krasovskiy, G. (2020). Interpretation of remote sensing data for ecological tasks. In *IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW): 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves* (Vol. 3, pp. 772-776). Kharkiv, Ukraine.
17. Trofymchuk, O., Okhariev, V., & Trysnyuk, V. (2019). Environmental security management of geosystems. In *18th International Conference on Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects*.
18. Trysnyuk, V.M., Shumeiko, V.O., Trysnyuk, T.V., Kurylo, A.V., & Golovan, Yu.M. (2020). Ecological safety of the Carpathian region in the conditions of technogenic dust pollution atmospheric air. *Control, Navigation and Communication Systems. Academic Journal*, 1 (59), 127-131. <https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.127> (in Ukrainian).
19. Trysnyuk, T.V. Golovan, Yu.M., & Kurilo, A.V. (2018). Increasing the level of environmental safety of nature reserves. In *Modern information technologies for environmental safety management, nature management, emergency measures: Collective monograph: XVII International scientific-practical conference* (pp. 213-214). Kyiv: Institute of Telecommunications and Global Information Space of NASU (in Ukrainian).

The article was received 25.01.2021 and was accepted after revision 04.05.2021

Триснюк Василь Миколайович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186, Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID 0000-0001-9920-4879, **e-mail:** trysnyuk@ukr.net

Шумейко Віктор Олександрович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186, Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID 0000-0002-0285-4566, **e-mail:** shym1983@ukr.net

Голован Юрій Миронович

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186, Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID 0000-0001-7050-9310, **e-mail:** dirrecta@gmail.com

УДК 502.131.1:[551.58:[616.98:578.834]

Olena P. Mitryasova, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9107-4448>, *e-mail*: eco-terra@ukr.net

Anna S. Pryhodko, Master
e-mail: eco-terra@ukr.net

Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

DETERMINATION OF THE DEPENDENCE BETWEEN CLIMATIC FACTORS AND COVID-19 DISEASE INCIDENCE

Abstract. The *purpose* of research consists in definition and an estimation of climatic factors influence on disease incidence of Covid-19 on an example of Mykolaiv city. In research we used such scientific *methods*: theoretical methods: analysis, synthesis, monitoring, systematization, generalization. For research facility, were held by calculations based on software Microsoft Excel. The calculations were performed using the formula correlation **Results.** The study examines the influence of climatic factors such as air temperature, humidity, solar radiation activity, wind speed, rainfall, and length of daylight. For the pair «Disease incidence – Temperature» the correlation coefficient is -0.74 . For the pair «Disease incidence – Solar Radiation» correlation coefficient is -0.71 . For the pair «Disease incidence – Daylight hours» correlation coefficient is -0.70 . Humidity, as a derivative of air temperature, is evidenced by a comparison of decline periods and growth of these values. In the spring, along with the increase in temperature, the humidity dropped, and in the fall, when the air temperature dropped, the humidity increased. This factor also affected the spread of the virus in the second half of the year, when the humidity increased the virus began to spread faster. For the pair «Disease incidence – Humidity» correlation coefficient is $+0.73$ (average direct correlation). Other climatic factors, such as wind speed and rainfall, have not been shown to have a significant effect on the rate of disease spread. For the pair «Disease incidence – Wind speed» correlation coefficient is $+0.32$, which corresponds to a weak direct correlation. For the pair «Disease incidence – Rainfall» correlation coefficient is -0.30 , which indicates a weak inverse correlation. **Conclusion.** The results of the study show that the reduction of disease incidence is observed at high temperatures, high activity of solar radiation, and prolonged daylight, which determines the conditions for the prevention of such diseases and will improve the quality of life to achieve sustainable development.

Key words: climatic factors; correlation analysis; Covid-19 disease incidence; quality of life

О.П. Мітрясова, А.С. Приходько

Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ МІЖ КЛІМАТИЧНИМИ ЧИННИКАМИ І ЗАХВОРЮВАНІСТЮ НА COVID-19

Анотація. Розглянуто залежності між кліматичними чинниками і захворюваністю на Covid-19. Для визначення залежностей використано метод кореляційного аналізу. Проаналізовано тільки один з ймовірних складових впливу на захворюваність, а саме кліматичні чинники

© О.П. Мітрясова, А.С. Приходько, 2021

ISSN: 2411-4049. Екологічна безпека та природокористування, № 2 (38), 2021

(температура повітря; вологість повітря; активність сонячної радіації; швидкість вітру; кількість опадів; довжина світлового дня). Визначено тісні зв'язки захворюваності з температурою повітря, активністю сонячної радіації, довжиною світлового дня, а також тісну зворотну залежність від вологості повітря (з коефіцієнтами кореляції близько $\pm 0,9$). Показано, що інші кліматичні характеристики, а саме: швидкість вітру і кількість опадів, не мають сили впливу на швидкість розповсюдження захворювання. З'ясовані залежності можуть визначати умови проведення профілактики подібних захворювань, що надасть змогу покращити якість життя людини на шляху досягнення цілей сталого розвитку.

Ключові слова: кліматичні чинники; кореляційний аналіз; захворюваність на Covid-19; якість життя

DOI: 10.32347/2411-4049.2021.2.94-103

Вступ

Нині суспільство переживає важливий і критичний період своєї історії – період викликів для існування цивілізації через зростання низки негативних чинників: деградації природи, людської моралі, зростання бідності, поширення хвороб і голоду, агресії, набуття критичного рівня суперечностей між техносферою й біосферою. Разом з тим, сталий розвиток міст, спільнот та міцне здоров'я і благополуччя є одними з глобальних цілей для сталого розвитку суспільства [1, 2]. З огляду на вищезазначене, значна увага приділяється вивченню причин, динаміки й особливостей розвитку екосистем різного рівня, визначенню та дослідженню взаємозв'язків між різноманітними екологічними чинниками, моделюванню різних природних і антропогенних процесів, складанню прогнозів й розробленню рекомендацій щодо подальшого сталого розвитку суспільства й біосфери загалом [3–6].

2020 рік став викликом для усього людства з огляду на пандемію Covid-19, яка є знаковою в плані пошуків подальших напрямів розв'язання багатьох проблем соціуму, зокрема соціальних, економічних, екологічних, культурних тощо. Разом з тим, 2020 рік став також аномальним у плані температурного режиму атмосферного повітря – так, 18 лютого 2020 р. виявилось найтеплішим днем за останні 130 років метеорологічних спостережень. За останні 10 років середня температура повітря зросла на $1,0^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ вище доіндустріальних рівнів.

Так, певного наукового інтересу і значення набуває питання вивчення взаємозв'язку екологічної складової та якості життя людини, одним з аспектів якого є вивчення причин, динаміки й особливостей захворюваності населення у певних геохімічних провінціях, регіонах тощо.

Мета роботи полягає у визначенні та оцінюванні впливу кліматичних чинників на захворюваність на Covid-19 на прикладі міста Миколаєва.

Об'єкт дослідження – захворюваність населення на Covid-19 та кліматичні чинники.

Предмет дослідження – взаємозв'язок між захворюваністю населення на Covid-19 і кліматичними чинниками.

Методика дослідження

Під час дослідження було використано такі методи: аналіз, синтез, систематизація, узагальнення. Розрахунки проведено на основі програмного

продукту Microsoft Excel з використанням функції Corel. Значення кореляції можуть змінюватись між +1 та -1, що, відповідно, показує пряму та непряму кореляційну залежність між обраними параметрами. Якщо значення знаходиться ближче до 1, то це означає наявність сильного зв'язку, а якщо ближче до 0, то слабкого. Якщо коефіцієнт кореляції негативний, це означає наявність протилежного зв'язку; чим вище значення однієї змінної, тим нижче значення іншої. Сила зв'язку характеризується також і абсолютною величиною коефіцієнта кореляції.

Так, на рис. 1 наведено приклад розрахунку функції кореляції за допомогою програмного забезпечення MS Excel.

	Тривалість світлового дня	Приріст хворих	кореляція масив із 3х
січень	9	0	0
лютий	10,25	0	
березень	11,75	4	=КОРРЕЛ(С3:С5;Е3:Е5)
квітень	13,5	59	0,913692513
травень	15	86	0,988731367
червень	15,75	74	0,701704182
липень	15,5	78	-1
серпень	14,25	341	-0,989777866
вересень	12,5	993	-0,989539887
жовтень	10,5	2435	-0,984552787
листопад	9,5	5733	-0,91613895
грудень	8,75	6040	-0,934327772
			-1

Рис. 1 – Приклад розрахунку кореляції між тривалістю світлового дня і захворюваністю на Covid-19

Результати дослідження

У процесі дослідження розглянуто вплив таких кліматичних чинників:

- температура повітря;
- вологість повітря;
- активність сонячної радіації;
- швидкість вітру;
- кількість опадів;
- довжина світлового дня.

Матеріали дослідження обирались з офіційних сайтів Міністерства охорони здоров'я України, Управління охорони здоров'я Миколаївської області, офіційного інформаційного порталу Міністерства охорони здоров'я України (Covid-19) і Українського гідрометеоцентру [7–11].

Разом з тим, аналізувалась динаміка захворюваності населення міста Миколаєва упродовж 2020 року. Узагальнені статистичні дані за 2020 рік щодо захворюваності на Covid-19 у світі, Європі, Україні та в м. Миколаєві подано в табл. 1 [7, 8, 11].

В Україні коронавірусну інфекцію Covid-19 (пневмонія нового типу) вперше було діагностовано 3 березня 2020 року в Чернівцях. 13 березня був зафіксований перший летальний випадок у результаті коронавірусної інфекції. Станом на 31 грудня 2020 року в Україні налічувалося 1 055 047 осіб, що захворіли, з них померли – 18 533 осіб.

Таблиця 1 – Кількість людей, які захворіли на COVID-19 (осіб) за 2020 рік

Випадки захворювання	Випадки одужання	Летальні випадки
у світі		
96,2 млн	94,1 млн	2,06 млн (2,14%)
в Україні		
1 055 047	1 036 514	18 533 (1,8%)
у Миколаєві		
21 597	21 296	301 (1,4%)

Вивчення залежностей між захворюваністю на Covid-19 і кліматичними чинниками здійснювалось на прикладі м. Миколаєва. Перший випадок захворювання на коронавірусну інфекцію Covid-19 (діагноз «пневмонія») в місті Миколаєві було зафіксовано 15 квітня 2020 року (на 9-ту годину ранку) у шестирічної дівчинки.

Відповідно до кліматичних характеристик регіону зазначимо, що місто розташовано на Півдні України, клімат якого помірно-континентальний з м'якою малосніжною зимою та жарким й посушливим літом (рис. 2). Територія Миколаєва розташована на південь від смуги високого тиску (вісь Воейкова). Це зумовлює формування північно-східних континентальних повітряних мас зимового періоду й домінування й посилення західного (атлантичного) переносу повітряних мас влітку. Цю закономірність підтверджує Миколаївська метеорологічна станція, де за 52 роки спостережень мали перевагу (24%) північно-східні вітри взимку, а влітку (21%) – північно-західні. Сумарна радіація на території Миколаєва складає 4400–4800 мДж/м², на півдні збільшується до 5000 мДж/м² за рік. Значення радіаційного балансу підстилаючої поверхні змінюється від 1880 до 2100 мДж/м².

Пересічна температура січня змінюється від –5⁰С на півночі області і до –2⁰С на півдні, де взимку близько 40% днів є з відлигами, абсолютні мінімуми від –30⁰С до –34⁰С. Пересічна температура липня досягає 20–23⁰С, абсолютні максимуми 39–40⁰С. Період з температурою понад 10⁰С становить 180–225 днів. А тривалість вегетаційного періоду 215–225 днів. Розподіл річних сум опадів на території регіону зональний; на півночі області випадає 440–470 мм, у центральному і південно-східному районах 390–410 мм, а на південному заході 330–470 мм опадів. Кількість опадів зростає на 10–26% на кожні 100 метрів з підвищенням висоти місцевості над рівнем моря. У вигляді злив із загальної кількості опадів у теплий період (квітень – жовтень) випадає приблизно 70% від усієї їх кількості.

За 27 років спостережень серед метеостанцій всього Причорномор'я найбільша кількість катастрофічних злив – вісім – було зареєстровано у Миколаєві (55 мм опадів). Сніговий покрив узимку в середньому від 37 до 65 днів. Пересічна потужність покриву снігу на півночі степової зони досягає 10 см, а на півдні не перевищує 3–6 см. Запаси води у снігу при найбільшій його висоті коливаються від 30 до 24 мм. Глибина промерзання ґрунту становить 37–54 см. Пересічна багаторічна вологість повітря складає 71%, але іноді в травні – серпні вологість зменшується до 15–30%. Щорічне надходження з опадами 150–170 кг/га хлоридів і сульфідів натрію та магнію пов'язане зі впливом моря. У степовій зоні області буває більше 15 днів із суховіями в теплий період (травень – серпень) [12].

У процесі дослідження проаналізовано залежність між парами вибірок даних (температура повітря – захворюваність; вологість повітря – захворюваність та ін.) Кожний з кліматичних чинників порівнювався з приростом хворих на коронавірус у розглянутому діапазоні часу [13].



Рис. 2 – Карта міста Миколаєва [12]

За останні 100–120 років температура повітря в Миколаєві, так як і в цілому на Землі, має тенденцію до підвищення. Упродовж цього періоду середньорічна температура повітря підвищилася щонайменше на 10°C. Найтеплішим за всю історію спостережень виявився 2007 рік. Значне підвищення температури відбувається у першу половину року. У середньому за рік у Миколаєві випадає 472 мм атмосферних опадів, найменше – у жовтні, найбільше – у липні. Мінімальна річна кількість опадів (230 мм) спостерігалася у 1896 році, максимальна (743 мм) зафіксована в 1955 році. Максимальну добову кількість опадів (144 мм) зафіксовано 30 червня 1955 року. У середньому за рік спостерігається 118 днів з опадами, найменше – у серпні (6), найбільше – у грудні (14). Щороку в Миколаєві утворюється сніговий покрив, проте його висота незначна. Відносна вологість повітря в середньому за рік становить 73%, найменша – в серпні (60%), найбільша – у грудні (86%). Найменша хмарність спостерігається у серпні, а найбільша – у грудні.

Температура і вологість повітря характеризують загальний стан погоди, впливають на стан здоров'я людей, опір організму людини до захворювань.

На рис. 3 наведено графік зміни температури упродовж року на фоні приросту хворих на Covid-19. Загалом, така динаміка температури є цілком характерною для південного міста Миколаєва.

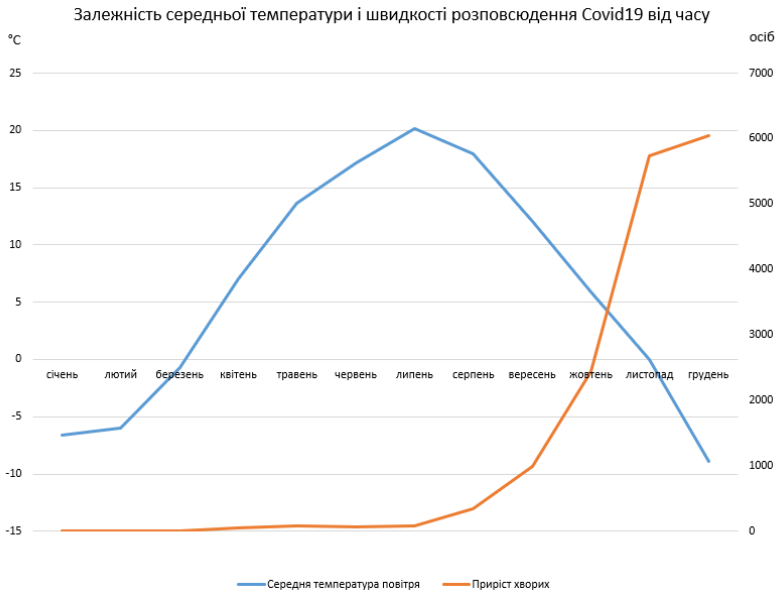


Рис. 3 – Динаміка зміни температури і захворюваності на Covid-19



Рис. 4 – Кореляційна залежність температури повітря і захворюваності на Covid-19

Аналіз пари «вологість повітря – захворюваність на Covid-19» проведено аналогічно. Вологість повітря складає 0,85 одиниць на початку року в січні, зменшується до 0,65 влітку та знову починає зростати восени.

Графік зміни коефіцієнта кореляції подано на рис. 5. Відповідно до розрахунків, до середини року явного зв'язку не спостерігається, коефіцієнт коливається у межах від -1 до 0 (зимово-весняний період $(-0,5)$ – слабка кореляція). Після липня коефіцієнт має позитивне значення і наближається до $+1$ (осінньо-зимовий $+0,9$), що свідчить про сильну пряму кореляцію. Можна, відокремлено від інших чинників, стверджувати, що вологість повітря і рівень захворюваності сильно пов'язані в другій половині 2020 року.



Рис. 5 – Зв’язок між вологістю повітря і захворюваністю на Covid-19

Проведено аналіз для пари «тривалість світлового дня – захворюваність». Визначено, що тривалість світлового дня, рівень сонячної радіації, середня температура і захворюваність є прямо пов’язаними величинами. Про це свідчить загальний графік на рис. 6, на якому показано зв’язок між тривалістю світлового дня і рівнем захворюваності на Covid-19. Коефіцієнт кореляції сягає -1 в другій половині року, що свідчить про сильний зворотний зв’язок величин.



Рис. 6 – Кореляційна залежність тривалості світлового дня і захворюваності на Covid-19

Сонячна радіація є основним джерелом енергії на планеті Земля. Зважаючи на це, очевидним є зв’язок сонячної радіації і температури повітря. На рис. 7 показано коефіцієнт кореляції між вказаними величинами. Пікове значення сонячної радіації в $6 \text{ кВт/м}^2/\text{місяць}$ зафіксовано влітку, що відповідає піковим значенням температури. Однозначно видно, що в другій половині року присутній сильний зворотний зв’язок. У зимово-весняний період наявна висока кореляція ($-0,8$). У літній ($-0,9$) – дуже сильна зворотна кореляція та у осінньо-зимовий – також сильна зворотна кореляція, показник складає близько $-0,9$.

Кількість хворих значно зросла після вересня, що співпадає з сезонним падінням сонячної радіації. До кінця року кількість сонячної радіації продовжила знижуватися, а кількість хворих – рости. Однозначного причинно-наслідкового зв'язку встановити, опираючись на цю інформацію, неможливо, але відокремлено від інших чинників, можна стверджувати, що зростання захворюваності на Covid-19 пов'язано з рівнем сонячної радіації.

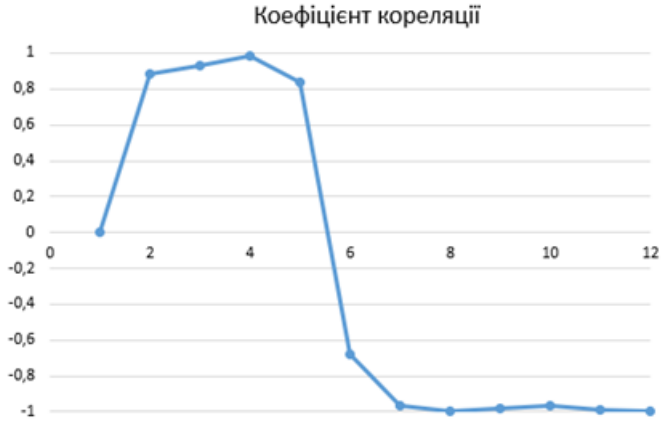


Рис. 7 – Кореляційна залежність сонячної радіації і захворюваності на Covid-19

Аналіз пари «швидкість вітру – захворюваність на Covid-19» проведено за аналогічною методикою. Середня швидкість вітру в Миколаєві за 2020 рік мала місце у межах норми з аномально вітряним квітнем. За квітень у місті пройшло декілька сильних вітрів, під час яких оголошували штормові попередження та які завдавали великих матеріальних збитків. Загальні показники наведено на рис. 8.

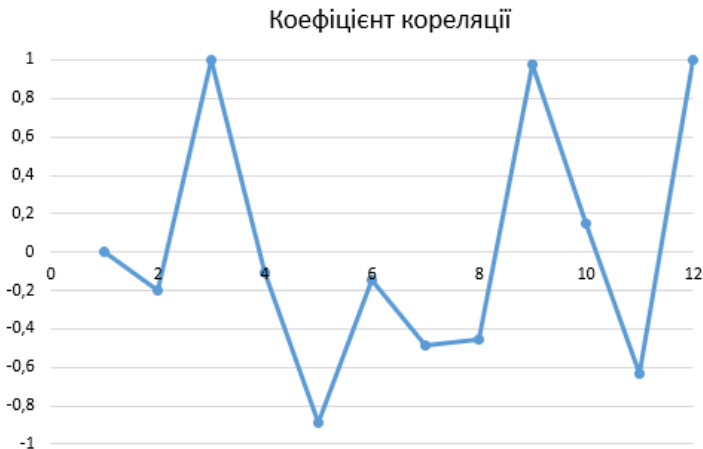


Рис. 8 – Зв'язок між швидкістю вітру і захворюваністю на Covid-19

За цим графіком видно, що очевидного зв'язку між швидкістю вітру і розповсюдженням вірусу не прослідковується. Коефіцієнт кореляції постійно

коливається у межах від -1 до $+1$. У зимово-весняний період простежується $(-0,4)$ слабка кореляція. У літній – слабка кореляція $(0,3)$ та у осінньо-зимовий – теж слабка кореляція $(0,4)$. Виходячи з результатів аналізу, можна зробити висновок, що швидкість вітру ніяк не вплинула на розповсюдження Covid-19.

Визначено залежність між показниками кількості опадів і захворюваністю на Covid-19. Так, 2020 рік видався для Миколаєва доволі посушливим, близько 60 мм з піками в червні (120 мм) і вересні (100 мм). Так, зв'язку не спостерігається, що підтверджено кореляційним аналізом, результати якого наведено на рис. 9.



Рис. 9 – Кореляційна залежність кількості опадів і захворюваності на Covid-19

Коефіцієнт кореляції сильно коливався упродовж року. Набував значень в діапазоні від -1 до $+1$ з відсутніми періодами усталеного зв'язку. Означене свідчить про відсутність будь-якого зв'язку між розглянутими масивами даних. Отже, можна зробити висновок, що кількість опадів не вплинула на захворюваність на Covid-19. З точки зору механізму розповсюдження вірусу, збільшення кількості опадів має зменшувати поширення вірусу, але результати аналізу не дають повного підтвердження цієї гіпотези. Значна кількість опадів могла б допомогти в боротьбі з пандемією, оскільки могла б змивати вірус з поверхонь. Деякі країни застосовували такий метод боротьби з ним.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Залежність між кліматичними чинниками і захворюваністю на Covid-19 визначено. Проте, підкреслимо, що захворюваність населення – це багатофакторний процес, на який впливає багато чинників, зокрема природних, соціальних, економічних, біологічних тощо. Проаналізовано тільки одну з ймовірних складових впливу, а саме кліматичні чинники (температура повітря; вологість повітря; активність сонячної радіації; швидкість вітру; кількість опадів; довжина світлового дня). Визначено тісні зв'язки захворюваності з температурою повітря, активністю сонячної радіації, довжиною світлового дня, а також тісну зворотну залежність від вологості повітря (з коефіцієнтами кореляції близько $\pm 0,9$). Показано, що інші кліматичні характеристики, а саме швидкість вітру і кількість опадів, не мають певної сили впливу на

захворюваність на Covid-19. Визначені залежності можуть визначати умови проведення профілактики подібних захворювань, що надасть змогу покращити якість життя людини на шляху досягнення цілей сталого розвитку.

Результати даного дослідження не вичерпують повною мірою розв'язання означеного питання і потребують подальшого вивчення на прикладі інших регіонів та з урахуванням специфіки геохімічних провінцій територій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Natsionalna dopovid «Tsili staloho rozvytku: Ukraina» [National Report "Sustainable Development Goals: Ukraine"]. Retrieved from: http://un.org.ua/images/SDGs_National_ReportUA_Web_1.pdf
2. Mitryasova, O., Pohrebennyk, V., Kochanek, A., & Stepanova, O. (2017). Environmental Footprint Enterprise as Indicator of Balance it's Activity. In *17th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2017*» (ISSUE 51 – Ecology, Economics, Education and Legislation. – Vol. 17 – Ecology and Environmental Protection, pp. 371–378). Albena, Bulgaria.
3. Stepanenko, S.M., Polovyi, A.M., Loboda, N.S. et al. (2015). Climate change and their impact on the economy of Ukraine. Odesa: "TES" (in Ukrainian).
4. Pohrebennyk, V. Mitryasova, O., Klos-Witkowska, A., & Dzhumelia, E. (2017). The Role of Monitoring the Territory of Industrial Mining and Chemical Complexes at the Stage of Liquidation In *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017* (ISSUE 33 – Vol. 17 – Hydrology and Water Resources. pp. 383-390). Vienna, Austria.
5. Staddon, C. (2016). Managing Europe's Water Resoirces: Twenty-first Century Challenges. UK: University of the West of England.
6. Demianenko, M. (2018). Global development of mankind: strategies, threats, tendencies. Retrieved from: <http://surl.li/nmvo> (in Ukrainian).
7. Center for Disease Control and Prevention. Retrieved from: <https://www.cdc.gov/>
8. Information about the coronavirus. Retrieved from: <https://moz.gov.ua/koronavirus-2019-ncov>
9. Ukrainian Hydrometeorological Center. Retrieved from: <https://meteo.gov.ua/hmc.php>
10. Coronavirus situation monitoring system. Retrieved from: <https://covid19.rnbo.gov.ua/>
11. National Security and Defense Council System for monitoring the situation with the coronavirus. Retrieved from: <https://covid19.rnbo.gov.ua/>
12. OpenStreetMap. Retrieved from: www.openstreetmap.org
13. Mitryasova, O.P., & Prykhodko, A.S. (2021). Influence of climatic factors on the Covid-19 prevalence. In *«Ecological safety – modern directions and prospects of higher education», coll. abstracts of the I International Internet Conference* (pp. 90-92). Kharkiv: VN Karazin KhNU (in Ukrainian).

Стаття надійшла до редакції 15.03.2021 і прийнята до друку після рецензування 28.05.2021

Мітрянська Олена Петрівна

доктор педагогічних наук, професор кафедри екології Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Адреса робоча: 54003, Україна, м. Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9107-4448>, e-mail: eco-terra@ukr.net

Приходько Анна Сергіївна

магістр Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Адреса робоча: 54003, Україна, м. Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10
e-mail: eco-terra@ukr.net

ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ ТА СИСТЕМИ INFORMATION RESOURCES AND SYSTEMS

УДК 533.6.013.42

Oleksii G. Lebid, PhD, Senior Researcher

ORCID: 0000-0002-4003-8068, *e-mail*: o.g.lebid@gmail.com

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

FIVE-MODE QUASILINEAR MODEL OF NONLINEAR DYNAMICS OF EXTENDED SYSTEM

Abstract. *Distributed systems are widely used in practice. These are cosmic ligaments in the near-Earth space with a length of tens of kilometers. They approximate reinforced concrete piles in the soil when calculating the stress-strain state and assessing the technical condition; pipelines both in air and in liquid, underwater towed systems. Known underwater airlift systems of great length for the extraction of minerals (nodules) from the ocean floor with a length of 5-10 km. To solve the problems of the dynamics of such systems in various environments, the well-known mathematical models are not quite correct from the point of view of taking into account the variety of wave processes. It determines the need to build refined wave models. A new quasilinear mathematical model, which describes the nonlinear four-mode dynamics of the distributed system in the spatially inhomogeneous field of mass and surface forces, has been obtained. It is described by a nonlinear system of twelve first-order partial differential equations. For it, the principles of ultimate and hyperbolicity are fulfilled. Together with the boundary and initial conditions, it can be used to describe dynamics and statics of geometrically and physically nonlinear rod elements, piles in the ground, crane equipment ropes, mine lifts, aerial cableways, towed systems in liquid and gas flow, etc. For two-mode spatial reduction of the model, the theorem about correctness of Cauchy problem has been considered. As a result of the calculations, the earlier assumptions about the movement of the cable along its initial configuration were changed as the length of the cable changed. It has been found out that this assumption is only true for the initial transition participant. It is also established that at a given tachogram in the configuration of the towed line, there is a point of inflection, which shifts from top to bottom when lifting it. It can be a factor in the looping, contributing to the breakage of the cable system during towing.*

Keywords: *mathematical modeling; extended systems; waves; finite difference method; looping*

© О.Г. Лебідь, 2021

О.Г. Лебідь

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, м. Київ, Україна

П'ЯТИМОДОВА КВАЗІЛІНІЙНА МОДЕЛЬ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ ПРОТЯЖНОЇ СИСТЕМИ

***Анотація.** Розподілені системи знайшли широке застосування на практиці. Це космічні зв'язки у навколоремному просторі протяжністю в десятки кілометрів. Ними описуються залізобетонні палі в ґрунті при розрахунках напружено-деформованого стану й оцінці технічного стану; трубопроводи як в повітрі, так і в рідині; підводні буксирні системи. Відомі підводні системи ерліфта великої протяжності для видобутку мінералів (конкреції) з дна океану протяжністю в 5-10 км. Для вирішення завдань динаміки таких систем в різних середовищах відомі математичні моделі є не цілком коректними з точки зору врахування різноманіття хвильових процесів. Це визначає необхідність побудови уточнених хвильових моделей. У статті отримана нова квазілінійна математична модель, що описує нелінійну чотирьохмодову динаміку розподіленої системи в просторово-неоднорідному полі масових і поверхневих сил. Вона описується нелінійною системою дванадцяти рівнянь першого порядку в часткових похідних. Для неї виконуються принципи граничності і гіперболічності. У сукупності з крайовими і початковими умовами модель може застосовуватися для опису динаміки і статички геометрично і фізично нелінійних стрижневих елементів, палей в ґрунті, канатів кранового обладнання, шахтних підйомників, підвісних канатних доріг, систем що буксируються в потоці рідини і газу, ін. Для двохмодової просторової редукції моделі розглянута теорема про коректність задачі Коші. Апробація моделі проведена на основі чисельного рішення просторової задачі про поширення чотирьох хвиль трьох типів: поздовжніх, конфігураційних в напрямку нормалі і бінормалі, крутильних. За допомогою чисельного алгоритму і програми на основі методу скінченних різниць уточнені більш ранні припущення щодо руху кабелю вздовж початкової конфігурації буксирної лінії при зміні його довжини. З'ясувалося, що це припущення вірне лише для початкової перехідної ділянки. Встановлено також, що при заданій тахограмі в конфігурації буксирної лінії спостерігається точка перегину, яка зміщується зверху вниз при підйомі кабелю. Це може бути чинником, що сприяє обриву кабельної системи та петлеутворенню при буксируванні.*

***Ключові слова:** математичне моделювання; протяжні системи; хвилі; метод скінченних різниць; петлеутворення*

DOI: 10.32347/2411-4049.2021.2.104-120

Вступ

В даний час для проведення досліджень наукового, прикладного та військового характеру в космічному, повітряному і водному середовищах створюються і широко експлуатуються різні робототехнічні засоби, одним з основних елементів яких є протяжні системи (ПС) з фіксованою або змінною довжиною. Одним з цікавих застосувань є AN / ALE-50 [1]. AN / ALE-50 являє собою буксирну пастку, яка використовує електронні засоби протидії, щоб заманити ракети, що наближаються, подалі від військових літаків (рис. 1).

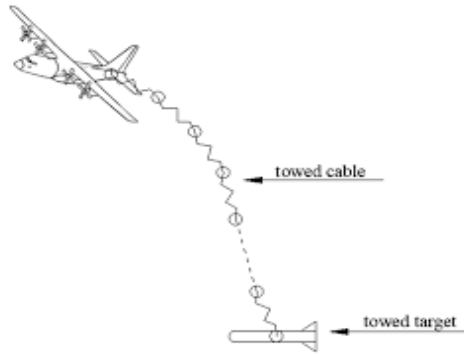


Рис. 1 – Загальний вид пастки (крупним планом) та літака, що буксирує пастку (на задньому плані) [1]

Пастка була створена в рамках спільного підприємства ВВС США, ВМС США і Raytheon. Пастка працює, створюючи більшу пляму на екрані радара протиповітряної оборони, ніж літак. Це робить її більш пріоритетною метою для системи наведення ракети, що наближається. Такі пастки захищали літаки від ракетних загроз при бойових операціях в Косово, Афганістані та Іраку. Систему можна використовувати практично на будь-якій бортовій платформі бойових літаків, що стоять на озброєнні США і НАТО. Пастка активно використовується на літаках F-16, F/A-18E/F і B-1B. Загальна кількість пасток, що створені на даний час, перевищує 25 000 штук [1]. При розгортанні пастка буксирується за літаком-господарем, захищаючи літак і його екіпаж від ракет з радіочастотним наведенням, заманюючи ракету в бік помилкової мети і від наміченої мети. Як в льотних випробуваннях, так і в реальних бойових умовах ALE-50 успішно відбивав численні бойові стрільби ракетами класу «земля – повітря» і «повітря – повітря». Американські військові льотчики прозвали пастку «Маленький приятель» (рис. 2) [1].



Рис. 2 – Протиповітряна ракета прямує в «Маленького приятеля». Сам літак залишається неушкодженим [1]

На рис. 3 і 4 показано застосування ПС в підводних й космічних середовищах. При розробці морських вітряних електростанцій ПС (підводні кабелі) є необхідними в якості засобів передачі енергії для з'єднання морських вітряних електростанцій і берегових підстанцій. Осьові сили є однією з основних причин пошкодження ПС (підводних кабелів), які складаються із спіральної броні, оболонки, ізоляції та проводів. На додаток до осьового подовження, коли кабель піддається розтягуючим навантаженням, спіральна броня також створює крутний момент. У глибоководних умовах вплив тиску води на жорсткість кабелю є важливим. В минулому такі дослідження проводилися рідко [2]. Коли кабель розташований на 4000 м нижче рівня моря, пов'язані розтягуючі, скручуючі і стискаючі навантаження можуть знизити жорсткість на розтяг ПС в цілому до 30%. Таким чином, при аналізі і проектуванні ПС (підводних кабелів) необхідно ретельно враховувати пов'язані ефекти навантажень: розтягування, скручування і стискання [2].

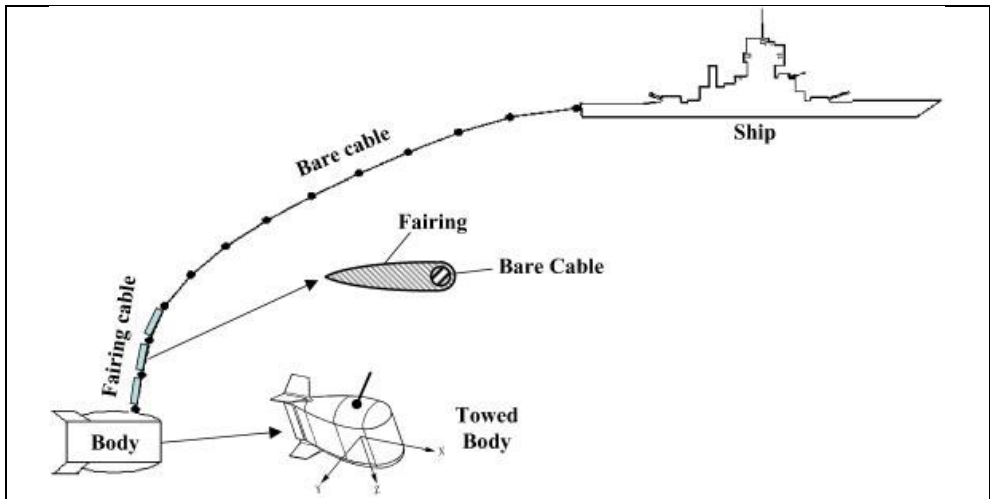


Рис. 3 – Буксирувана в потоці рідини ПС [3]

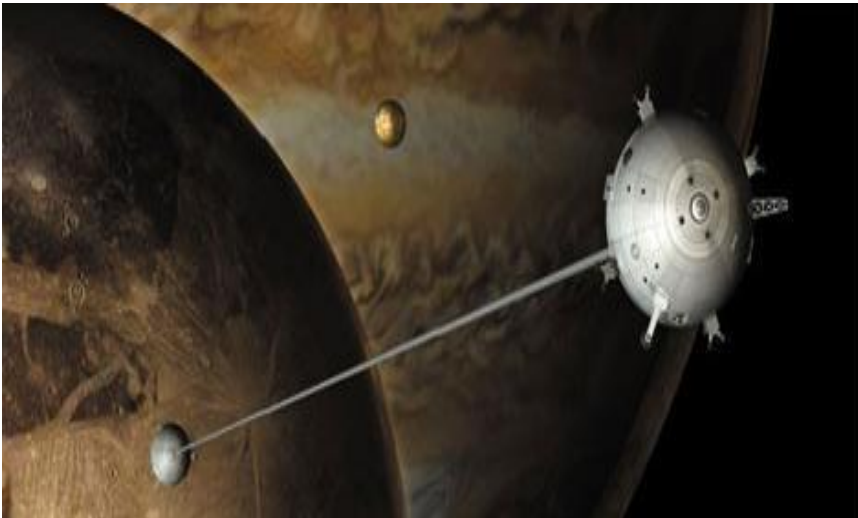


Рис. 4 – Космічні зв'язки [4]

Обертові ПС (стрижні) є елементами лопатей вертольотів, маніпуляторів, робочих лопаток парових і газових турбін, лопатей повітряних гвинтів (рис. 5).

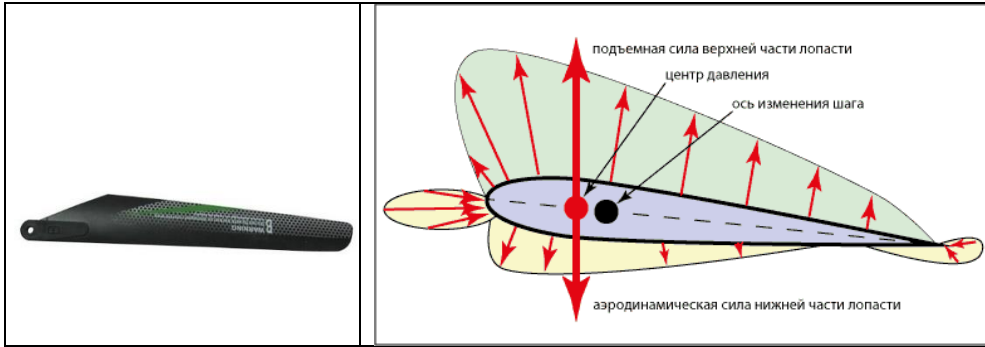


Рис. 5 – Вертолітна лопать та механізм створення підйомної сили

В експлуатації такі стрижневі конструкції часто здійснюють коливання, які можуть зумовити втомні пошкодження. Дослідження коливань цих систем ускладнюється тим, що вони мають несиметричний поперечний переріз. У цьому випадку центр ваги і центр вигину поперечного перерізу не збігаються. Здійснювалися спроби дослідження нелінійних коливань стрижнів з несиметричним поперечним перерізом. С.П. Тимошенко [5] отримав рівняння лінійних згинально-крутильних коливань прямих незакручених стрижнів з несиметричним поперечним перерізом. У роботах [6, 7] були отримані рівняння лінійних згинально-згинально-крутильно-поздовжніх коливань закручених обертових стрижнів з урахуванням депланації поперечного перерізу при зсуві і крученні.

У [8] представлена система рівнянь в часткових похідних, що описує геометрично нелінійні згинально-згинально-крутильно-поздовжні коливання обертового стрижня. У цих рівняннях враховувалося, що центр ваги поперечного перерізу і центр жорсткості знаходяться в одній точці. У [8] отримані рівняння, що описують згинально-згинально-крутильні коливання стержня з урахуванням нерозтяжності середньої лінії ПС. При цьому передбачалося, що центр ваги поперечного перерізу і центр жорсткості знаходяться в одній точці.

Систематичний виклад теорії гнучких стрижнів міститься в монографії [6]. В роботі [9] представлена система трьох нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь в часткових похідних, що описує згинально-згинально-крутильні коливання гнучкого обертового стрижня з урахуванням депланації поперечного перерізу. В [10] відзначається, що для дискретизації системи коливання розкладаються у ряд за власними формами лінійної задачі. Вільні коливання досліджуються за допомогою нелінійних нормальних форм Шоу – П'єра. В результаті аналізу отримано вплив депланації ПС на їх коливання. Урахування депланації ПС призводить до переважного внеску нелінійної інерційності в коливання стрижня, а навпаки, неврахування депланації, – до геометричної нелінійності.

У той же час отримана авторами [10] система рівнянь для алгоритмізації і рішення геометрично і фізично нелінійних задач є слабо пристосованою, за її допомогою можливо отримати рішення тільки для окремих випадків.

Авторами [10] виконано тільки спрощений аналіз отриманої системи рівнянь шляхом її дискретизації, де коливання розкладаються у ряд за власними формами лінійної задачі і тільки для окремого випадку.

Незважаючи на численні дослідження, проведені в області вивчення статичної і динамічної поведінки ПК, неясними залишаються багато особливостей їх поведінки: проблеми в діагностиці цілісності паль (каверни, шийки, розширення і т.д.), петлеутворення в ПК при буксируванні в космосі, повітрі та водному середовищі, правильний вибір коефіцієнта динамічності при складних маневрах буксирувальника і т.д. Окремим питанням, що вимагає досліджень в області побудови алгоритмів розпаралелювання і паралельних обчислень, є врахування багатохвильового характеру розповсюдження збурень в ПК. Традиційні обчислення напружено-деформованого стану (НДС) ПК на основі спрощених математичних моделей часто призводять до «розхитування» обчислювальних алгоритмів і невірних висновків при інтерпретації отриманих чисельних даних, як показано в роботах Трофимчука О.М., Калікова В.М., Ордановича О.Є. та ін. У роботі Селезова І.Т. показано, що рівняння Тимошенка принципово відрізняється від класичного рівняння Бернуллі – Ейлера згинних коливань балки. Воно описує поширення збурень зі скінченною швидкістю, що встановлено із узагальненого рівняння 6-го порядку гіперболічного типу, яке як частковий випадок включає відомі рівняння, а також рівняння Тимошенка без коректуючого коефіцієнта зсуву. Селезовим І.Т. відмічається, що у подальшому було розроблено обчислювальні програми, але із порушеннями суцільності середовища, тобто спрощенням моделі [11].

Як об'єкти математичного моделювання ПК описуються системами квазілінійних рівнянь. Чисельне моделювання нелінійних систем в умовах сьогодення є окремим напрямком в математичній царині. Серед робіт, присвячених побудові складних математичних моделей процесів механіки деформованого середовища, гідродинаміки та фільтрації підземних вод, слід виділити праці Сергієнка І.В., Скопечького В.В., Трофимчука О.М., Губарева В.Ф., Калюха Ю.І. та ін. В розвиток нестационарних задач аерогідропружного НДС ПК, розробку рішення статичних, динамічних та оптимізаційних задач значний внесок здійснили Крилов О.М., Тимошенко С.П., Ішлінський А.Ю., Селезов І.Т., Кубенко В.Д., Горошко О.О., Каюк Я.Ф., Гузь О.М., Салтанов М.В., Горбань В.О., Орданович О.Є., Калюх Ю.І., Каліков В.М., Гуляєв В.І., Гайдачук В.В., Кошкін В.Л., Баженов В.О., Лізунов П.П., Попов Е.П., Ллюхін О.А., та ін. Вагомі результати в області вирішення прикладних задач статичної, динамічної та оптимізації ПК отримані Ядикіним Ю.В., Безверхим А.І., Тихоновим В.С., Некрасовим І.В., Ремчуковим В.І., Поддубним В.І., Ільїним Р.Ф. та ін. [12-20]. Серед зарубіжних вчених, які зробили значний внесок в аналіз статичної і динамічної ПК в потоці, необхідно виділити Chapman В.А., Griffin О.М., Iwers W.B., Nair S., Wingham B.S. та ін.

Питанням удосконалення методів розрахунку та розробки програмних засобів для комп'ютерної реалізації розрахунків ПК у будівництві, впровадження заходів з проектування та влаштування протизсувних споруд з ПК у вигляді паль присвячено багато наукових робіт та досліджень, серед яких найбільш відомими є праці Трофимчука О.М., Калюха Ю.І., Бойка В.В., Герсенванова М.М., Гольдштейна М.М., Гінзбурга Л.К., Кільвандера Є.Я.,

Маслова М.М., Полевецького В.В., Сільченка К.В., Шахунянца Г.М., Чернія Г.І., Глуховського В.П., Яраса В.І., Улицького В.М., Джонса Р., Фекеоару І., Лещинського М.Ю., Єрмошкіна П.М., Ногіна С.І., Сафарова В.А., Судакова В.В., Почтовика Г.Я., Бамбури А.М., Городжи А.Д., Мар'єнкова М.Г., Немчинова Ю.І., Довженко О.О., Bishop A., Fellenius W., Fukoka H., Mongerstern N., Sassa K., Terzaghi K., Carino N.J., Sansalone M., Hsu N.N., Lin J.-M., Streett W., Liao S.T., Roesset J.M., Chen C.H., Yu C.P., Ambrosini D., Ezeberry J., Kim D.S., Kim H.W., Kim W.C., Seo W.S., Choi K.C., Wooa S.K. та ін. [12-20].

При спробі вдосконалення математичного моделювання розподілених ПС виникає низка складнощів, що обумовлені відсутністю ефективних програмних засобів комп'ютерного моделювання, недосконалістю та обмеженістю прикладних методик для розрахунку хвильового НДС ПС. Головними недоліками є відсутність та недостатня розробленість нелінійних хвильових динамічних математичних моделей ПС, досконалих методів їх чисельного моделювання, що є перепонами для створення на їх базі сучасних експериментальних автоматизованих комп'ютерних приладів неруйнівної діагностики безпосередньо в умовах будівельних майданчиків при зведенні будівель та споруд.

П'ятихвильова модель динаміки ПС. Розглянемо ПС у просторі з постійними характеристиками поперечного перерізу. Радіус-вектор початкового положення стрижня позначимо $\bar{R}_0(S, 0)$, а деформованого – $\bar{R}(S, t)$.

Введемо деформацію елемента ПС:

$$\varepsilon = \frac{(dS^2 - dS_0^2)}{dS_0^2} = \left| \frac{\partial \bar{R}}{\partial S} \right|^2 - 1. \quad (1)$$

Тоді змінні S_0 і S , що характеризують недеформовану та розтягнуту довжину ПС, будуть пов'язані між собою співвідношенням:

$$dS = \sqrt{1 + \varepsilon} \cdot dS_0. \quad (2)$$

Введемо поперечну деформацію (депланція) елемента ПС, що описує рівномірне стиснення – розширення його поперечного перерізу.

Введемо природну систему координат з одиничними взаємоортогональними векторами \bar{i} , \bar{n} і \bar{b} . Вектор \bar{i} – одиничний вектор дотичної, визначається зі співвідношення:

$$\bar{i}(S, t) = \frac{\partial \bar{R}(S, t)}{\partial S}, \quad (3)$$

а два інших вектори – \bar{n} і \bar{b} – ортогональні до \bar{i} . Похідна радіус-вектора \bar{R} в деформованому стані має вигляд

$$\frac{\partial \bar{R}}{\partial S} = \bar{i}(1 + \varepsilon). \quad (4)$$

З іншого боку, для похідної від радіус-вектора $\bar{R}(S, t) - \partial\bar{R}/\partial t$ – маємо такий вираз:

$$\frac{\partial\bar{R}}{\partial t} = U_t \bar{t} + U_n \bar{n} + U_b \bar{b}. \quad (5)$$

Тут U_t, U_n і U_b – проекції відносної швидкості на поточні одиничні вектори \bar{t}, \bar{n} і \bar{b} .

Якщо долучити умови безперервності, існування похідних від радіус-вектора $\bar{R}(S, t)$ необхідного порядку та рівності змішаних похідних, то можемо отримати наступні вирази

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial U_t}{\partial S} - k_1 U_n - k_2 U_b; \quad -(1 + \varepsilon)\Omega_1 = \frac{\partial U_b}{\partial S} - k_2 U_t + k_3 U_n; \quad (1 + \varepsilon)\Omega_2 = \frac{\partial U_n}{\partial S} + k_1 U_t + k_3 U_b. \quad (6)$$

Повні похідні кривизни k_i за часом мають вигляд:

$$\frac{\partial k_3}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \bar{n}}{\partial S} \bar{b} \right) = \frac{\partial b}{\partial t} \frac{\partial \bar{n}}{\partial S} + \bar{b} \left(\frac{\partial^2 \bar{n}}{\partial S \partial t} - \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \frac{\partial \bar{n}}{\partial S} \frac{1}{1 + \varepsilon} \right) \quad (7)$$

або:

$$\frac{\partial k_3}{\partial t} = \frac{\partial \Omega_3}{\partial S} - k_1 \Omega_1 - k_2 \Omega_2 - \frac{k_3}{1 + \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}. \quad (8)$$

За аналогією для k_1 і k_2 :

$$\frac{\partial k_1}{\partial t} = \frac{\partial \Omega_2}{\partial S} + k_2 \Omega_3 + k_3 \Omega_1 - \frac{k_1}{1 + \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad \frac{\partial k_2}{\partial t} = -\frac{\partial \Omega_1}{\partial S} + k_3 \Omega_2 + k_1 \Omega_3 - \frac{k_2}{1 + \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}. \quad (9)$$

Запишемо загальні теореми про збереження кількості руху і збереження моменту кількості руху для елемента ПС у векторній формі [21]:

$$\frac{\partial \bar{N}}{\partial S} + \bar{F}^{(E)} + \bar{F}^{(I)} + \bar{F}^{(M)} = 0; \quad \frac{\partial \bar{M}}{\partial S} + \bar{t} \times \bar{N} + \bar{M}^{(E)} + \bar{M}^{(I)} + \bar{M}^{(M)} = 0. \quad (10)$$

Або в скалярному вигляді

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial S} + k_1 N_3 - k_3 N_2 + \bar{F}^{(E)} \bar{n} + \bar{F}^{(I)} \bar{n} + \bar{F}^{(M)} \bar{n} &= 0, \\ \frac{\partial N_2}{\partial S} + k_3 N_1 + k_2 N_3 + \bar{F}^{(E)} \bar{b} + \bar{F}^{(I)} \bar{b} + \bar{F}^{(M)} \bar{b} &= 0, \\ \frac{\partial N_3}{\partial S} - k_1 N_1 - k_2 N_2 + \bar{F}^{(E)} \bar{t} + \bar{F}^{(I)} \bar{t} + \bar{F}^{(M)} \bar{t} &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Із закону Гука для осьового зусилля для елемента ПС випливає:

$$N_3 = E F \varepsilon. \quad (12)$$

Тут E – модуль Юнга матеріалу ПС, F – площа поперечного перерізу ПС до деформації, ε – відносна поздовжня деформація ПС.

Запишемо умови збереження моменту кількості руху в проєкціях на одиничні взаємоортогональні вектори \bar{t} , \bar{n} і \bar{b} прийнятої системи координат [13, 15]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_2}{\partial S} + k_3 M_1 - k_3 M_3 + N_1 + \bar{m}^{(E)} \bar{b} + \bar{m}^{(I)} \bar{b} + \bar{m}^{(M)} \bar{b} &= 0; \\ \frac{\partial M_1}{\partial S} + k_1 M_3 - k_3 M_2 - N_2 + \bar{m}^{(E)} \bar{n} + \bar{m}^{(I)} \bar{n} + \bar{m}^{(M)} \bar{n} &= 0; \\ \frac{\partial M_3}{\partial S} + k_1 M_1 - k_2 M_2 + \bar{m}^{(E)} \bar{t} + \bar{m}^{(I)} \bar{t} + \bar{m}^{(M)} \bar{t} &= 0; \end{aligned} \quad (13)$$

Для згинальних моментів M_1 , M_2 , а також M_3 приймемо співвідношення:

$$\begin{aligned} M_1 &= -EI_{22}k_2; \\ M_2 &= EI_{11}k_1; \\ M_3 &= GJk; \quad k = k_3 - \eta_3. \end{aligned} \quad (14)$$

Тут I_{22} , I_{11} , J – моменти інерції, а η_3 – кут закручування одиниці довжини ПС.

Отримана система рівнянь (11)–(14) описує фізично та геометрично нелінійну просторову модель динаміки ПС. Однак вона є параболічно-гіперболічною, так як не враховано інерцію повороту поперечного перерізу ПС. Модель (11)–(14) описує тільки чотири хвилі в ПС з шести (поздовжні, крутильні, згинальні (дві)), а конфігураційні (поперечні) хвилі не описує [21].

Для усунення цього недоліку гіперболізуємо модель (11)–(14) шляхом введення кутів α і β . Вони будуть характеризувати поворот поперечних перерізів ПС, тобто деформацію зсуву в усередненому сенсі. Поперечні перерізи, плоскі до деформації, залишаються такими ж плоскими і після деформації, але, можливо, повернутими. Причому не обов'язково перпендикулярними до серединної осі ПС. Матеріалізація цієї гіпотези для перерізуючих сил N_1 і N_2 набуває такого вигляду

$$N_1 = \alpha l_1 GF_s; \quad N_2 = \beta l_2 GF_s. \quad (15)$$

Тут l_1 , l_2 – коефіцієнти, що враховують вплив зсуву, F_s – площа поперечного перерізу ПС.

У першому наближенні, під депланацією поперечного перерізу ПС будемо розуміти його рівномірне стиснення або розтягнення – змінна $z(t, S)$. Врахування депланації поперечного перерізу $z(t, S)$ при зсуві і крученні ПС зробимо на основі узагальненого хвильового рівняння, коефіцієнти якого залежать від t , S й інших невідомих U_t, U_n, U_b і $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$.

$$f_1 \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + f_2 \frac{\partial^2 z}{\partial t \partial S} + f_3 \frac{\partial^2 z}{\partial S^2} + f_4 \frac{\partial z}{\partial t} + f_5 \frac{\partial z}{\partial S} = P_{13}. \quad (16)$$

Модель (11)–(14) з додатковою умовою (15) та гіперболічним рівнянням другого порядку (16), що описує хвильову депланацію поперечного перерізу ПС, можна шляхом нескладних тотожних перетворень записати:

$$\text{а) } \begin{cases} a_{11} \frac{\partial k_1}{\partial S} + a_{12} \frac{\partial \Omega_1}{\partial t} + a_{13} \frac{\partial \Omega_2}{\partial t} = P_1; \\ a_{21} \frac{\partial k_2}{\partial S} + a_{22} \frac{\partial \Omega_1}{\partial t} + a_{23} \frac{\partial \Omega_2}{\partial t} = P_2; \\ a_{31} \frac{\partial k_3}{\partial S} + a_{32} \frac{\partial \Omega_3}{\partial t} = P_3; \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{б) } \begin{cases} a_{41} \frac{\partial k_1}{\partial t} + a_{42} \frac{\partial \Omega_2}{\partial S} = P_4; \\ a_{51} \frac{\partial k_2}{\partial t} + a_{52} \frac{\partial \Omega_1}{\partial S} = P_5; \\ a_{61} \frac{\partial k_3}{\partial t} + a_{62} \frac{\partial \Omega_3}{\partial S} = P_6; \end{cases} \quad (18)$$

$$\text{в) } \begin{cases} a_{71} \frac{\partial \alpha}{\partial S} + a_{72} \frac{\partial U_n}{\partial t} + a_{73} \frac{\partial N_3}{\partial t} = P_7; \\ a_{81} \frac{\partial \beta}{\partial S} + a_{82} \frac{\partial U_b}{\partial t} + a_{83} \frac{\partial N_3}{\partial t} = P_8; \\ a_{91} \frac{\partial N_3}{\partial S} + a_{92} \frac{\partial U_t}{\partial t} + a_{93} \frac{\partial N_3}{\partial t} = P_9; \end{cases} \quad (19)$$

$$\text{г) } \begin{cases} a_{101} \frac{\partial \alpha}{\partial t} + a_{102} \frac{\partial U_n}{\partial S} = P_{10}; \\ a_{111} \frac{\partial \beta}{\partial t} + a_{112} \frac{\partial U_b}{\partial S} = P_{11}; \\ a_{121} \frac{\partial N_3}{\partial t} + a_{122} \frac{\partial U_t}{\partial S} = P_{12}. \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{д) } f_1 \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + f_2 \frac{\partial^2 z}{\partial t \partial S} + f_3 \frac{\partial^2 z}{\partial S^2} + f_4 \frac{\partial z}{\partial t} + f_5 \frac{\partial z}{\partial S} = P_{13}. \quad (21)$$

Система (17)–(21) являє собою систему квазілінійних гіперболічних рівнянь, що описує сім мод коливань ПС п’яти типів: поздовжні, крутильні, дві конфігураційні (поперечні) та дві згинальні, а також депланаційні.

Перші три рівняння (17) описують закон збереження моменту руху елементом ПС, друга група рівнянь (18) – динамічний зв’язок між нестационарними похідними від кривизни k_i і конвективними похідними від кутових швидкостей Ω_i . Разом система (17)–(18) описує три моди коливань – згинальні у двох взаємоортогональних площинах (\bar{n}, \bar{t}) і (\bar{b}, \bar{t}) , а також крутильну.

Перші три рівняння (19) виражають динамічний закон збереження кількості руху елементом ПС, останні три рівняння (20) – умову «нерозривності» ПС:

$$\frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial t \partial S} = \frac{\partial^2 \bar{R}}{\partial S \partial t}.$$

Разом рівняння (19)–(20) описують три моди коливань: конфігураційні (поперечні) в двох взаємоортогональних площинах (\bar{n}, \bar{t}) і (\bar{b}, \bar{t}) , а також поздовжню.

Останнє рівняння (21) описує хвильову депланаційну зміну поперечного перерізу ПС в наближеному вигляді (у вигляді нестационарного рівномірного звуження або розширення поперечного перерізу ПС при проходженні через нього хвиль різних типів). Передбачається, що коефіцієнти в (21) при похідних $f_i, i = 1, 5$ та права частина P_{13} залежать від вектора-стовпця невідомих W , компонент розподілених масових і поверхневих сил, що діють на ПС в потоці рідини (або газу).

У підсумку система рівнянь (17)–(21) може бути записана у вигляді одного матричного рівняння типу переносу в стандартній формі [13, 15]:

$$E \frac{\partial W}{\partial t} + B \frac{\partial W}{\partial S} = P. \quad (22)$$

Тут E – одинична матриця розмірності 14x14, B – матриця конвективних членів 14x14. Вектор-стовпець правих частин P визначається розподіленими масовими та поверхневими силами, а також моментами цих сил. Вектор-стовпець P залежить від часу t , лагранжевої координати S , вектора-стовпця невідомих W , компонент розподілених масових і поверхневих сил.

Крайові та початкові умови для моделі (22). У верхній частині ПС (при $S = L$) можуть бути задані проекції швидкості \bar{U} :

$$\begin{aligned} U_i(L, t) &= U_i^*(t) \\ U_n(L, t) &= U_n^*(t) \\ U_b(L, t) &= U_b^*(t) \end{aligned} \quad (23)$$

На нижньому кінці ПС (при $S = 0$) можуть бути задані умови динамічної рівноваги сил \bar{F}_i і моментів \bar{M}_j на кінці ПС (наприклад, на транспортованому вантажеві (приладі) рис. 2–4):

$$\sum_{i=1}^3 \bar{F}_i = 0; \quad \sum_{j=1}^3 \bar{M}_j = 0. \quad (24)$$

В якості вихідних умов використовується рішення задачі статики на основі моделі (22) при $\frac{\partial}{\partial t}(\dots) = 0$ [13]. Модель (22) з початковими та крайовими умовами (23)–(24) являє собою замкнуту систему квазілінійних рівнянь в часткових похідних, а також початково-крайову задачу.

Case Study моделі (22)–(24). Еволюція геометричних характеристик буксированої системи при маневрі судна-буксирувальника. Розглянемо на конкретному прикладі еволюцію основних силових і геометричних характеристик буксированої ПС при маневрі, що найбільш часто зустрічається на практиці [15]:

1. обхід буксированим апаратом перешкоди на дні;
2. маневр зондування у вертикальній площині безпілотним підводним апаратом (БПА) з метою пошуку донних мін та інших малорозмірних об'єктів, розміщених безпосередньо на морському дні (кабелі зв'язку, нафто- і газопроводи та ін.).

Розглянемо маневр судна-буксирувальника з ПС та БПА, що швидко відбувається та здійснюється при постійній швидкості буксирування 7.5 м/с шляхом зміни довжини витравленої частини ПС. Первісна довжина системи становила 120 м, найбільша довжина під час еволюції була 175 м, час змотування змінювався в діапазоні $[0 \div 20 \text{ с}]$ в залежності від тахограми лебідки. Силкові та гідродинамічні характеристики ПС були наступними: погонна маса і приєднана маса до деформування ПС – 2.5 та 0.8 кг/м, початковий діаметр канату – 0.03 м, первісна плавучість одиниці довжини канату – 17.6 Н/м, ефективна розтяжність канату змінювалася в діапазоні $[3 \times 10^{-6} \div 3 \times 10^{-8}]$, маса БПА – 250 кг (приєднана маса БПА – 50 кг), площа міделевого перетину БПА – 0.4 м², гідродинамічний коефіцієнт опору БПА дорівнював 0.5, гідродинамічні коефіцієнти опору форми і тертя ПС були, відповідно, 0.05 і 0.01, дискретність по довжині ПС змінювалася в діапазоні $[1 \div 20 \text{ м}]$, коефіцієнти C_1 і C_2 дорівнювали $C_1 = 0$, $C_2 = 5$, крок за часом вибирався з умови стійкості рахунку [15].

Чисельні результати були отримані для тахограми, в якій чергувалися два режими: витравлювання – підйом із зупинкою лебідки (рис. 6).

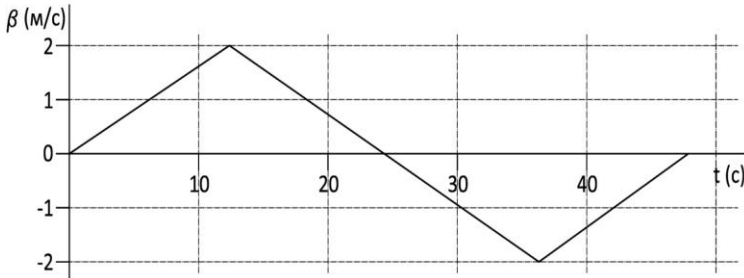


Рис. 6 – Тахограма режиму роботи лебідки

Еволюційні криві всієї конфігурації ПС для даної тахограми лебідки при швидкості буксирування 4 м/с в різні моменти часу зображені на рис. 7–8.

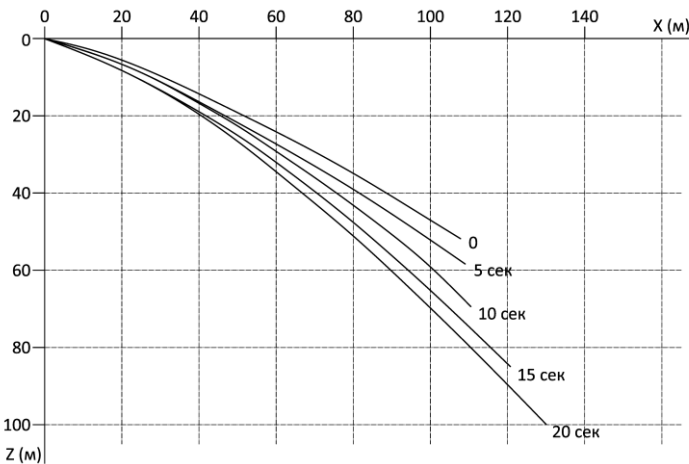


Рис. 7 – Еволюція конфігурації ПС. Час 0-20 с

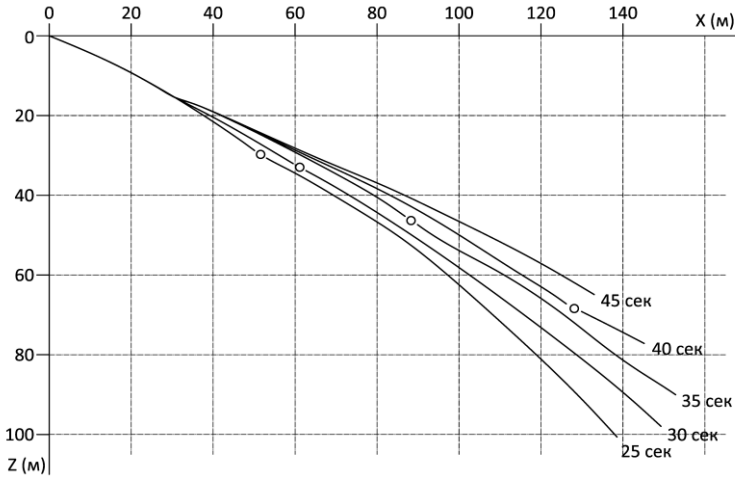


Рис. 8 – Еволюція конфігурації ПС. Час 25-45 с

Для зазначеного режиму тахограми в ПС під час перехідного процесу нелінійно взаємодіють три фізичні процеси, що протікають одночасно, – поздовжні хвилі, поперечні хвилі і ефекти, що зумовлені зміною довжини ПС. Характеристикою першого з процесів є криві еволюції осьового зусилля і проекції дотичної складової відносної швидкості обтікання канату в потоці. Умовно еволюційну залежність натягу в корінній точці ПС можна розбити на 4 етапи. На першому етапі, під час рівноприскореного змотування ПС із судової лебідки, при збільшенні швидкості змотування осьове зусилля в ПС зменшується. Одночасно з цим збільшується довжина витравленої її частини, збільшується гідродинамічний опір, ПС спочатку «запізнюється», а потім підтягується і рухається з постійною швидкістю судном-буксирвальником. Це призводить до ривка в ПС і, як наслідок, до різкого збільшення осьового зусилля на другій ділянці тахограми.

На третій ділянці тахограми швидкість змотування рівномірно зменшується і змотування ПС переходить до вибірки канату (намотування на лебідку). Тут осьове зусилля спочатку плавно, а потім більш різко зростає, перевищуючи початкове квазістатичне значення в 3.5–4 рази. Причому, чим вище ефективний модуль Юнга матеріалу канату, тим вище динамічний ривок в протяжній системі. При уповільненні вибірки канату і повній зупинці лебідки силова картина черговий раз змінюється: осьове зусилля зменшується і поступово виходить на нове стаціонарне значення, відповідне новій довжині ПС в 140 м.

Процеси, які характеризуються поперечними хвилями, є більш згладженими. На кривій еволюції кута відхилення корінної точки від вертикалі можна виділити три характерних ділянки відповідно до зміни швидкості змотування. Однак, повної кореляції залежності немає, це обумовлено запізненням в системі через нелінійну взаємодію перерахованих вище трьох процесів і сил гідродинамічного демпфірування.

Висновки

1. Незважаючи на численні дослідження, проведені в області вивчення статички і динаміки ПС, неясними залишаються багато особливостей їх поведінки:

проблеми в діагностиці цілісності паль (каверни, шийки, розширення і т.д.), петлеутворення в ПС при буксированні в космосі, повітрі та водному середовищі, правильний вибір коефіцієнта динамічності при складних маневрах буксировальника і т.д. Окремим питанням, що вимагає досліджень в області побудови алгоритмів розпаралелювання і паралельних обчислень, є врахування багатохвильового характеру розповсюдження збурень в ПС.

2. Отримано п'ятимодову математичну модель, що описує нелінійну динаміку ПС в просторово-неоднорідному полі масових і поверхневих сил. Для неї виконуються принципи граничності і гіперболічності, що сформульовані І.Т. Селезовим в роботі [11]. У сукупності з крайовими і початковими умовами вона може застосовуватися для управління ПС; опису динаміки і статички геометрично і фізично нелінійних космічних зв'язок; стрижневих елементів (лопатей гвинтокрилів, лопаток турбин та ін.); ерліфтних систем великої протяжності для видобутку корисних копалин з дна Світового океану; паль в ґрунті; канатів кранового обладнання; шахтних підйомників, підвісних канатних доріг; ПС, що буксировуються в потоці рідини та газу; підводних електричних кабелів від морських вітроенергетичних установок та підводних кабелів зв'язку; ін.

3. Осьові сили є однією з основних причин пошкодження ПС (підводних кабелів), які складаються зі спіральної броні, оболонки, ізоляції та проводів. На додаток до осьового подовження, коли кабель піддається розтягуючим навантаженням, спіральна броня також створює крутий момент. У глибоководних умовах вплив тиску води на жорсткість кабелю є важливим. В минулому такі дослідження проводилися рідко [2]. Коли кабель розташований на 4000 м нижче рівня моря, пов'язані розтягуючі, скручуючі і стискаючі навантаження можуть знизити жорсткість на розтяг ПС в цілому до 30%. Таким чином, при аналізі і проектуванні ПС (підводних кабелів) необхідно ретельно враховувати пов'язані ефекти навантажень розтягування, скручування і стискання [2].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. AN/ALE-50 Towed Decoy System. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.raytheon.com/capabilities/products/ale50>
2. Mechanical behavior of submarine cable under coupled tension, torsion and compressive loads. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801819304470>
3. Combination of Acoustics with High Resolution Oceanography. Електронний ресурс. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/228540255_Combination_of_Acoustics_with_High_Resolution_Oceanography/figures?lo=1
4. Электродинамические связи – "ЭДС". Електронний ресурс. Режим доступу: <http://galspace.spb.ru/index116.html>
5. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. – М.: Физматгиз, 1959. – 450 с.
6. Воробьев Ю.С., Шорр Б.Ф. Теория закрученных стержней. – Киев: Наук. думка, 1983. – 188 с.
7. Воробьев Ю.С. Уточнение уравнений свободных колебаний вращающихся стержней // Рабочие процессы в турбомашинах и прочность их элементов. – Киев: Наук. думка, 1965. – С. 11–27.
8. Hodges D.H. and Dowell E.H. Nonlinear Equations of Motions for the Elastic Bending and Torsion of Twisted Nonuniform Rotor Blades. – NASA TND-7818, 1974. – 52 p.

9. Crespo da Silva M.R.M. and Glynn C.C. Nonlinear flexural-flexural torsional dynamics of in extensional beams. I: Equations of motion // J. Struct. Mech. – 1978. – No. 6. – P. 437–448.
10. Аврамов К.В., Галас О.С., Морачковский О.К., Пьер К. Анализ нелинейных изгибно-изгибно-крутильных колебаний вращающихся закрученных стержней с учетом деформации поперечного сечения // Проблемы прочности, 2009, № 2 – С. 112–124.
11. Selezov, I.T. Development and Application of the Cauchy–Poisson Method to Layer Elastodynamics and the Timoshenko Equation. *Cybern Syst Anal* 54, 434–442 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-018-0044-x>
12. Kaliukh, I., Farenjuk, G., Trofymchuk, O., Farenjuk, I., Berchun, Y. (2019). Identification of defects in reinforced concrete piles based on multi-wave reflection. In: Derkowski W., Gwozdziejewicz P., Hojdis Ł., Krajewski P. (eds). *Proc. fib Symp. 2019: Concrete – Innovations in Materials, Design and Structures*, Fédération Internationale du Béton (fib) – International Federation for Structural Concrete. – P. 991-998. URL <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85066103818&partnerID=MN8TOARS>
13. Kaliukh, I., Trofymchuk, O. & Lebid, O. Numerical Solution of Two-Point Static Problems for Distributed Extended Systems by Means of the Nelder–Mead Method. *Cybern Syst Anal* 55, 616–624 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00170-3>
14. Trofymchuk, O., Lebid, O., Klymenkov, O., Berchun, Y., Berchun, V., Kaliukh, I., Marjenkov, M., Shekhunova, S., Havriliuk, R. [2019] Dynamic certification of landslide protection structures in a seismically hazardous region of Ukraine: experimental and analytical research. *Earthquake geotechnical engineering for protection and development of environment and constructions*. In: Silvestri F., Moraci N. (eds.). *Proc. of the VII ICEGE 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Rome, Italy, 17-20 June 2019, 5337-5344.
15. Lebid A.G. (2020) Control and Dynamics of a Distributed System with Variable Length *Journal of Automation and Information Sciences*, 52(9), 39-50. DOI: [10.1615/JAutomatInfScien.v52.i9.40](https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v52.i9.40)
16. Trofymchuk, O., Kaliukh, I., & Klymenkov, O. (2018). TXT-tool 2.380-1.1. Monitoring and Early Warning System of the Building Constructions of the Livadia Palace, Ukraine. In: Sassa K. et al. (eds.) *Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools* (pp. 491-508). Cham: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-57774-6_37
17. Трофимчук А.Н., Черний В.Г., Черний Г.И. (2006). Надежность систем сооружения – грунтовое основание в сложных инженерно-геологических условиях. – Київ. Полграф консалтинг. – 247 с.
18. Gorban I.M., Lebid O.G. (2019) Numerical Modeling of the Wing Aerodynamics at Angle-of-Attack at Low Reynolds Numbers. In: Sadovnichiy V., Zgurovsky M. (eds) *Modern Mathematics and Mechanics. Understanding Complex Systems*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96755-4_10
19. Grebenikov, V., Kajan, V., Lebid, O., Pryjmak, M. (2015) Wind power unit the new type wind turbin and electric generator // *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS)* – Volume-1, Issue-7, October 2015:407-413.
20. Kayan, V.P., Kochin, V.A., Lebid, O.G. (2009) Studying the performance of Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) models with blade control mechanism // *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 2009, 36(2), pp. 154–165.
21. Hegemier G.A., Nair S. A nonlinear dynamical theory for heterogeneous, anisotropic, elastic rods // *AIAA*. – 1977. – 15, № 1. – P. 8–15.

Стаття надійшла до редакції 19.02.2021 і прийнята до друку після рецензування 17.05.2021

REFERENCES

1. AN/ALE-50 Towed Decoy System. Retrieved 12.02.2021 from: <https://www.raytheon.com/capabilities/products/ale50>
2. Mechanical behavior of submarine cable under coupled tension, torsion and compressive loads. Retrieved 12.02.2021 from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801819304470>
3. Combination of Acoustics with High Resolution Oceanography. Retrieved 12.02.2021 from: https://www.researchgate.net/publication/228540255_Combination_of_Acoustics_with_High_Resolution_Oceanography/figures?lo=1
4. Jelektrodinamicheskie svjazki [Electrodynamic connections]. Retrieved 12.02.2021 from: <http://galspace.spb.ru/index116.html>
5. Timoshenko, S.P. (1959). *Kolebanija v inzhenernom dele* [Fluctuations in engineering]. Moscow: Fizmatgiz (in Russian).
6. Vorob'ev, Ju.S., & Shorr, B.F. (1983). *Teorija zakruchennyh sterzhnej* [Theory twisted bars]. Kyiv: Nauk. Dumka (in Russian).
7. Vorob'ev, Ju.S. (1965). Utochnenie uravnenij svobodnyh kolebanij vrashhajushhihsja sterzhnej [Refinement of the equations of free vibrations of rotating rods]. In *Rabochie processy v turbomashinah i prochnost' ih jelementov*, (pp. 11–27). Kyiv: Nauk. Dumka (in Russian).
8. Hodges, D.H., & Dowell, E.H. (1974). Nonlinear Equations of Motions for the Elastic Bending and Torsion of Twisted Nonuniform Rotor Blades. NASA TND-7818.
9. Crespo da Silva, M.R.M., & Glynn, C.C. (1978). Nonlinear flexural-flexural torsional dynamics of in extensional beams. I: Equations of motion. *J. Struct. Mech*, 6, 437-448.
10. Avramov, K.V., Galas, O.S., Morachkovskij, O.K., & P'er, K. (2009). Analiz nelinejnyh izgibno-izgibno-krutil'nyh kolebanij vrashhajushhihsja zakruchennyh sterzhnej s uchedom deplanacii poperechnogo sechenija [Analysis of nonlinear flexural-flexural-torsional vibrations of rotating twisted rods taking into account the deplanation of the cross-section]. *Problemy prochnosti*, 2, 112-124 (in Russian).
11. Selezov, I.T. (2018). Development and Application of the Cauchy–Poisson Method to Layer Elastodynamics and the Timoshenko Equation. *Cybern Syst Anal*, 54, 434-442. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-018-0044-x>
12. Kaliukh, I., Farenjuk, G., Trofymchuk, O., Farenjuk, I., & Berchun, Y. (2019). Identification of defects in reinforced concrete piles based on multi-wave reflection. In: Derkowski W., Gwoździewicz P., Hojdyś Ł., Krajewski P. (eds). *Proc. fib Symp. 2019: Concrete – Innovations in Materials, Design and Structures*, Fédération Internationale du Béton (FIB) – International Federation for Structural Concrete, (pp. 991-998). URL <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85066103818&partnerID=MN8TOARS>
13. Kaliukh, I., Trofymchuk, O. & Lebid, O. Numerical Solution of Two-Point Static Problems for Distributed Extended Systems by Means of the Nelder–Mead Method. *Cybern Syst Anal*, 55, 616-624. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00170-3>
14. Trofymchuk, O., Lebid, O., Klymenkov, O., Berchun, Y., Berchun, V., Kaliukh, I., et al. (2019). Dynamic certification of landslide protection structures in a seismically hazardous region of Ukraine: experimental and analytical research. Earthquake geotechnical engineering for protection and development of environment and constructions. In: Silvestri F., Moraci N. (eds.). *Proc. of the VII ICEGE 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Rome, Italy, 17-20 June 2019, 5337-5344.
15. Lebid, A.G. (2020). Control and Dynamics of a Distributed System with Variable Length. *Journal of Automation and Information Sciences*, 52 (9), 39-50. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v52.i9.40
16. Trofymchuk, O., Kaliukh, I., & Klymenkov, O. (2018). TXT-tool 2.380-1.1. Monitoring and Early Warning System of the Building Constructions of the Livadia Palace, Ukraine. In: Sassa K. et al. (eds.) *Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools* (pp. 491-508). Cham: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-57774-6_37

17. Trofimchuk, A.N., Chernij, V.G., & Chernij, G.I. (2006). *Nadezhnost' sistem sooruzhenie – gruntovoe osnovanie v slozhnyh inzhenerno-geologicheskikh usloviyah* [Reliability of systems construction – soil foundation in difficult engineering and geological conditions]. Kyiv: Polgraf konsalting (in Russian).
18. Gorban I.M., & Lebid O.G. (2019). Numerical Modeling of the Wing Aerodynamics at Angle-of-Attack at Low Reynolds Numbers. In: Sadovnichiy V., Zgurovsky M. (eds) *Modern Mathematics and Mechanics. Understanding Complex Systems*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96755-4_10
19. Grebenikov, V., Kajan, V., Lebid, O., & Pryjmak, M. (2015). Wind power unit the new type wind turbin and electric generator. *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS)*, 1 (7), 407-413.
20. Kayan, V.P., Kochin, V.A., & Lebid, O.G. (2009). Studying the performance of Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) models with blade control mechanism. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 36 (2), 154-165.
21. Hegemier, G.A., & Nair, S. (1977). A nonlinear dynamical theory for heterogeneous, anisotropic, elastic rods. *AIAA*, 15 (1), 8-15.

The article was received 19.02.2021 and was accepted after revision 17.05.2021

Лебідь Олексій Григорович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, заступник директора Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: 0000-0002-4003-8068, **e-mail:** o.g.lebid@gmail.com

UDC 504.064:504.3

Taras V. Trysnyuk, PhD

ORCID ID: 0000-0002-3672-8242, *e-mail*: taras24t@gmail.com

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

MOBILE ENVIRONMENTAL MONITORING SYSTEM OF THE DNIESTER: MODELING OF TECHNICAL SYSTEM OF HYDRO RESOURCES AND EXTREME FLOODS

***Abstract.** The mobile environmental monitoring system is aimed at increasing the processing speed of measurement analyzes and increasing the scale of the study. The algorithm of analysis and modeling of extreme floods includes: construction of a series of hydrographic maps of the largest floods and graphs of characteristic water levels, assessment of the peculiarities of floods, formation of a database on channel morphometry and the state of flood objects. An important role is given to the assessment and forecast of the state of the Dniester and anthropogenic impacts on it in connection with such indicators as morbidity and control of pollution caused by flooding. Man-caused ecological safety of use of hydro resources and hydroecosystems in general should be based on the hydroecosystem concept of balanced nature use. GIS technologies (ArcView GIS 3.2a) were used to directly implement the tasks of estimating the time of penetration of pollutants into groundwater. The evaluation of the protective properties of the rocks of the aeration zone was performed by creating a spatial model to determine the relationship between objects using the module Georgesessig ArcGIS. Survey materials allow you to create 3D terrain models with an accuracy of 15–20 cm and aerial mosaics at a scale of 1: 1 000 – 1: 5 000.*

***Key words:** mobile ecological monitoring; modeling of extreme floods; anthropogenic impact; digital relief model; hydroecosystem*

Т.В. Триснюк

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

СИСТЕМА МОБІЛЬНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ДНІСТРА: МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ ГІДРОРЕСУРСІВ ТА ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ПАВОДКІВ

***Анотація.** Система мобільного екологічного моніторингу спрямована на збільшення швидкості обробки аналізів вимірювання і збільшення масштабів дослідження. Алгоритм аналізу та моделювання екстремальних паводків включає: побудову серії гідрографічних карт найбільших паводків і графіків характерних рівнів води, оцінку особливостей проходження паводків, формування бази даних про морфометрію русла і стан протипаводкових об'єктів. Особлива увага приділяється оцінці і прогнозу стану Дністра й антропогенних впливів на нього у зв'язку з такими показниками, як захворюваність населення, та контролю за забрудненнями, що утворилися в результаті підтоплення. Техногенна екологічна безпека використання гідроресурсів і гідроекосистем в цілому повинна базуватись на гідроекосистемній концепції збалансованого природокористування. Для безпосередньої реалізації завдань з оцінки часу проникнення забруднюючих*

речовин в ґрунтові води використано ГІС-технології (ArcView GIS 3.2a). Оцінку захисних властивостей порід зони аерації було виконано шляхом створення просторової моделі для визначення взаємозв'язку між об'єктами за допомогою модуля Geoprocessing ArcGIS. Матеріали знімання дають змогу створити 3D моделі рельєфу із точністю 15–20 см та аерофотомозаїку масштабу 1: 1 000 – 1: 5 000.

Ключові слова: мобільний екологічний моніторинг; моделювання екстремальних паводків; антропогенний вплив; цифрова модель рельєфу; гідроекосистема

DOI: 10.32347/2411-4049.2021.2.121-128

Постановка проблеми

Алгоритм аналізу та моделювання екстремальних паводків включає: побудову серії гідрографів найбільших паводків і графіків характерних рівнів води, оцінку особливостей проходження паводків, формування бази даних про морфометрію русла і стан протипаводкових об'єктів, створення гідрологічно коректної цифрової моделі рельєфу, оглядової ГІС-моделі, яка визначає межі зон ризику підтоплення при заданих рівнях води, побудову детальніших (великомасштабних) моделей ризику затоплення паводками для ключових ділянок річкової долини.

Мета дослідження

Внаслідок значного техногенного впливу на геологічне середовище спостерігаються комплексні зміни геохімічних, гідрогеологічних, інженерно-геологічних умов, які в ряді регіонів призводять до стійкого погіршення природної обстановки і набули транскордонного характеру. Суттєвих змін зазнають гідрохімічні та гідродинамічні показники поверхневих та підземних вод. Одними з головних актуальних питань оцінки еколого-геологічного стану ГС є вивчення стану підземних вод і проблем, що з цим пов'язані. Соціальний компонент моніторингу органічно пов'язаний з усіма іншими компонентами і у комплексі спрямований на вирішення наступних завдань: розробка програм спостереження за станом навколишнього природного середовища визначеної акваторії Дністра; організація спостережень і проведення вимірів показників об'єктів екологічного моніторингу; збір і обробка результатів спостережень; гармонізація банків і баз екологічної інформації з міжнародними еколого-інформаційними системами. Особлива увага приділяється оцінці і прогнозу стану Дністра й антропогенних впливів на нього у зв'язку з такими показниками, як здоров'я населення, та контролю за забрудненнями, що утворилися в результаті підтопленя.

Організація та результати дослідження

Природно-техногенна гідроекосистема керується за рахунок запасу та обміну інформацією, яка надходить від екологічного моніторингу. Стосовно саме таких систем може бути сформульований принцип техногенної екологічної безпеки – стан, при якому забезпечується стійка взаємодія людини і природи. На нашу думку, техногенна екологічна безпека використання гідроресурсів і гідроекосистем в цілому повинна базуватись на гідроекосистемній концепції збалансованого природокористування, а саме:

1. довіллю притаманна гідроекосистемна ієрархія;
2. гідроекосистеми є частиною гідроекологічного середовища;
3. гідроекосистеми характеризуються "організаційністю";
4. в межах гідроекосистем нерозривно взаємопов'язані природні умови та господарська діяльність;
5. гідроекосистеми – оптимальні територіальні одиниці моніторингу природного середовища;
6. використання картографічного та імітаційного математичного моделювання гідроекосистем – основа прогнозування та оптимізації стану гідроекосистем.

Серед загального складного комплексу робіт великого значення набуває оцінка захисних властивостей зони аерації. Зона аерації служить природним захистом підземних вод від забруднення у природних і екстремальних умовах. Її характеристики визначають час проникнення забруднення у перший від поверхні водоносний горизонт, у її межах здійснюються процеси сорбції та іонний обмін. Для умов України, де більша частина сільського населення (близько 70%) використовує води першого від поверхні водоносного горизонту, що зазнав техногенного забруднення нітратами, сульфатами, хлоридами, важкими металами, органічними сполуками тощо, дослідження з оцінки захисних властивостей порід зони аерації і прогнозування потрапляння забруднення у ґрунтові води набуває особливо важливого значення [1].

Основними природними показниками, на яких ґрунтуються оцінки з визначення часу надходження забруднюючих речовин з поверхні землі до ґрунтових вод, стали її потужність і літологічний склад порід зони аерації.

У структурі соціального складника екологічного моніторингу басейну Дністра ми виділяємо тематичні і територіальні підсистеми. Тематичні підсистеми здійснюють спостереження і контроль за станом окремих об'єктів, що підлягають екологічному моніторингу. Кожна тематична система складається з однієї чи декількох систем спостереження і контролю, об'єднаних за принципом "спільності об'єкта" моніторингу. Ці підсистеми стежать за екологічним станом об'єктів навколишнього природного середовища; за екологічною безпекою людей у залежності від стану компонентів системи; за станом і якістю природних ресурсів, що використовуються у конкретних видах діяльності; за станом джерел антропогенного впливу на екосистему Дністра. Державний моніторинг водних об'єктів, запасів поверхневих і підземних вод здійснюють відповідні державні органи. Територіальні підсистеми екологічного контролю басейну Дністра створюються відповідно до пунктів забору проб. Побудова таких підсистем реалізується через ієрархічний принцип і, коли екологічна обстановка цього вимагає, забезпечує прицільне інформування населення у місцях виникнення екологічної напруженості. Цей підхід виправдовує себе, оскільки основні екологічні показники в усьому басейні Дністра не залишаються однаковими та не розподіляються рівномірно. З метою створення єдиного науково-методичного підходу до комплексного спостереження стану Дністра, з огляду на сформовану напружену екологічну обстановку, розпочата робота з відпрацьовування і впровадження систем екологічного моніторингу у практику керування природоохоронною діяльністю й екологічною безпекою. З огляду на застосування можливостей ГІС при регіональних картографічних побудовах та подальшу систему оцінок захищеності ґрунтових вод, для

виконання даного виду робіт були задіяні попередньо створені електронні карти потужності зони аерації та будови літологічного складу її порід масштабу 1: 100 000. Кожна із залучених для цих побудов вихідних електронних карт була піддана попередній обробці, яка полягала в генералізації виділених підрозділів [2].

Для безпосередньої реалізації завдань з оцінки часу проникнення забруднюючих речовин в ґрунтові води використані ГІС-технології (ArcView GIS 3.2a). Оцінку захисних властивостей порід зони аерації було виконано шляхом створення просторової моделі для визначення взаємозв'язку між об'єктами за допомогою модуля Geoprocessing ArcGIS. Для створення моделі використовувався метод векторного накладання шарів, який дозволяє автоматично визначити області перетину об'єктів та територій, що зіставляються. В результаті створюється новий набір даних, в якому кожній результуючій області присвоєні атрибути обох вихідних. Для розрахунку часу проникнення були використані інформаційний шар літологічних різновидів зони аерації та шар інформаційних потужностей зони аерації. Для кожного виділеного таксону, залежно від будови його розрізу, обчислення виконувалося за відповідними формулами. В залежності від розрахункового часу можливого проникнення виділяємо 5 його градацій: < 50 діб; 50-250 діб; 250-1000 діб; 1000-3000 діб; > 3000 діб. Хоча таке районування певною мірою умовне і схематичне, воно відображає загальну тенденцію можливого проникнення забруднюючих речовин у ґрунтові води. До того ж районування базується на об'єктивних даних щодо проаналізованої значної кількості достовірної інформації про літологічний склад, фільтраційні особливості і потужності зони аерації і цілком прийнятне при здійсненні загальних регіональних оцінок [3].

При цьому засоби вимірювання, використовувані природокористувачами, повинні відповідати вимогам стандартизації і метрології. Нами зроблено спроби встановлення контактів з підприємствами, що є користувачами вод Дністра, і поширення на цих підприємствах інформації про стан довкілля та стан вод Дністра. Це є один з важливих аспектів формування громадської думки про необхідність зменшення техногенного навантаження на акваторію Дністра. Основою методики збору та систематизації інформації є обробка картографічного матеріалу шляхом векторизації [4]. При складанні бази даних враховувались характерні особливості природних об'єктів та їх взаємодія. Ще однією методикою отримання інформації, що використовувалася нами при побудові моделей басейнової системи, було опрацювання даних дистанційного зондування Землі, яке дозволило скласти карту землекористування досліджуваного басейну. Враховуючи важливе значення даних дистанційного зондування для визначення ступеня антропогенного впливу на довкілля, нами були використані різночасові космоснімки таких джерел, як „СІЧ-2”, LANDSAT.

Можливості традиційних методів досліджень причинно-наслідкових закономірностей формування якості поверхневих вод суттєво розширюються при використанні матеріалів дистанційного зондування водних об'єктів та їх поверхневих водозборів. Сучасні технічні засоби дистанційного зондування дозволяють отримати достатньо різноманітну інформацію про властивості земної поверхні у видимій (0,3–0,8 мкм), ближній (1,8–5,3 мкм) і дальній (7–14 мкм) ІЧ-областях спектра, а також в діапазоні НВЧ (3–100 см). Спеціальними методами обробки різних видів цієї інформації вивчаються

закономірності просторово-часових розподілів водних мас, які відрізняються вмістом розчинених або зважених речовин природного та антропогенного походження [5].

Вся кадастрова інформація опрацьована за допомогою геоінформаційних технологій у програмному середовищі ArcGIS. Географічною основою для баз геоданих послужила цифрова карта областей Західної України масштабу 1: 200 000 із вказаними населеними пунктами, нанесеними залізницями, автодорогами, водотоками та іншими природними і техногенними об'єктами. Картографічна основа узгоджена із космознімками LANDSAT 5 із роздільною здатністю 10 і 30 м відповідно. Це дозволяло точніше дешифрувати досліджувані об'єкти та наносити їх на карту. Новим прогресивним методом вважають також повітряне лазерне сканування промислових об'єктів з одночасною прив'язкою через GPS-приймач до географічних координат. Матеріали знімання дають змогу створити 3D моделі рельєфу із точністю 15–20 см та аерофотомозаїку масштабу 1: 1 000 – 1: 5 000, отримати інформацію про конструкційні й експлуатаційні параметри інженерних споруд і будівель, розрахувати технічні параметри гірничих об'єктів (кар'єрів, відвалів, відстійників тощо) за їхніми тривимірними моделями [6].

Кінцевою метою моделювання природно-технічної системи є управління технологічними й екологічними процесами в інтересах її стабілізації або розвитку. Відповідно до цієї мети можна виділити три етапи моделювання: інформаційне забезпечення, імітаційне моделювання, управлінське моделювання [7].

Перший етап моделювання пов'язаний з формуванням банку інформації за трьома напрямками:

1. Збір та аналіз результатів натурних спостережень, інженерних вишукувань, вивчення архівних матеріалів з метою накопичення первинної інформації;

2. Використання традиційних моделей з визначення розрахункової інформації, наприклад моделі швидкостей течії, стратифікації у водоймах;

3. Генерування інформації, якої недостатньо як вихідної, наприклад, за аналогічними басейновими гідроекосистемами або природними умовами. Метод аналогій доцільно використовувати для прогнозу природних передумов і екологічних наслідків антропогенного навантаження (наприклад, розташування МГЕС) в межах басейнових екосистем досліджуваного регіону. Другий етап моделювання ставить собі за мету розробку імітаційних моделей для формалізації взаємодії техногенних і екологічних процесів. Найбільш загальною формою моделі природно-техногенного процесу є багатофакторні моделі у вигляді регресійних залежностей. Імітаційні моделі є вихідними для визначення прогнозних ситуацій, які оцінюють вірогідні екологічні ситуації. Така оцінка проводиться на третьому етапі модельних досліджень. Залежно від результату, що прогнозується, приймаються рішення щодо управління системи на основі багатокритеріального аналізу (3-й етап). Виконані роботи з оцінки захисних властивостей порід зони аерації в цілому дозволяють диференціювати досліджувану територію за умовами захищеності ґрунтових вод від забруднення. Даний інформаційний матеріал в сучасних умовах глобального техногенного втручання у довкілля набуває актуального значення і дозволяє виявляти, картувати та виконувати прогнозну оцінку закономірностей і динаміки негативних змін екологічного стану ґрунтових вод [8].

Зіставлення в ГІС показників розрахункового часу проникнення забруднюючих речовин крізь зону аерації з переважаючим напрямком фізико-хімічної міграції хімічних елементів та існуючим рівнем забруднення дозволяє визначити різний ступінь ризику забруднення ґрунтових вод та прогнозувати їх підтоплення та забруднення [9].

Система мобільного екологічного моніторингу спрямована на збільшення швидкості обробки аналізів вимірювання і збільшення масштабів дослідження [6]. Система складається з переносного комп'ютера (ноутбука), набору периферії: блоку давачів, GPS-антени, GSM-модуля, а також спеціального програмного забезпечення. Система спрямована не на точне визначення параметрів, а працює як якісний показник забруднення території, для встановлення місць, де потрібні лабораторні дослідження. Небезпечними є забруднення поверхневих вод. Вони здатні досить швидко і на великі відстані переносити небезпечні речовини. Робочий діапазон та роздільна здатність обраних сенсорів є цілком придатними для екологічного моніторингу. Спроектвана система має у своєму складі давачі для вимірювань органолептичних показників якості води. Основні з них це: окисно-відновний потенціал, кислотність та провідність води, вмісту солей та розчиненого кисню, наявності іонів. За цими показниками є можливою інтегральна оцінка рівня забруднення води у водоймі, придатності води до використання тощо. Почергове підключення давачів до аналогово-цифрового перетворювача, пересилання даних до комп'ютера, калібрація давачів здійснюється за допомогою мікроконтролера – основної частини блоку. GPS-антена підключається до комп'ютера через стандартне роз'язтя. Програмне забезпечення проводить збір та обробку інформації. Отримані дані записуються у базу даних з наступною їх візуалізацією на екрані ПК. Використання геоінформаційних систем (ГІС) у поєднанні з картографічними матеріалами дозволяє швидко та оперативно отримувати картину екологічної обстановки на великих територіях. При виникненні техногенної катастрофи особливо важливою є швидкість отримання даних про її перебіг.

Висновки

Використання декількох таких систем, що діють у різних місцях, значно підвищує ефективність екологічного моніторингу. GSM-модуль, що входить до складу системи, дає змогу передавати дані до центру спостережень у реальному масштабі часу. Пересилка інформації здійснюється з використанням системи GSM. Окрім локальних баз даних, на мобільних системах створюється також глобальна, яка розміщується в центрі моніторингу. Використання головної бази даних із візуалізованою у вигляді тематичних карт зібраною інформацією дозволяє бачити цілісну екологічну картину. Такий підхід стає незамінним також у разі здійснення операцій з ліквідації стихійних або екологічних лих.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Триснюк Т.В. Підвищення рівня екологічної безпеки об'єктів природно-заповідного фонду / Т.В. Триснюк, Ю.М. Голован, А.В. Курило // Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: Колективна монографія: XVII Міжнародна науково-практична конференція. Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ. Київ. 25-26 вересня 2018 р. – С. 213–214.
2. Trysnyuk, V.M., Shumeiko, V.O., Trysnyuk, T.V., Kurylo, A.V., Golovan, Yu.M. [2020]. Ecological safety of the Carpathian region in the conditions of technogenic dust pollution atmospheric air. Collection of scientific works "Control, navigation and communication systems". Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk. Issue 1 (59) 2020, P. 127–131.
3. Рудько Г.І., Назаренко М.В. Геоінформаційні технології в надрокористуванні / Г.І. Рудько, М.В. Назаренко – К.: «Академпрес», 2011. – 336 с.
4. Красовський Г.Я., Трофимчук О.М., Крета Д.Л., Клименко В.І., Пономаренко І.Г., Суходубов О.О. Синтез картографічних моделей забруднення земель техногенним пилом з використанням космічних знімків // Екологія і ресурси. – К.: ПНБ, 2005. – №12. – С. 37–55.
5. S. Greben, O. Trofymchuk, V. Trysnyuk, G. Krasovskiy. [2020]. Interpretation of remote sensing data for ecological tasks. IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW): 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (21–25 September, Kharkiv, Ukraine), Volume 3, P. 772–776.
6. Trofymchuk, O., Okhariev V., Trysnyuk. V. [2019] Environmental security management of geosystems. Conference Proceedings. 18th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects.
7. Триснюк В.М. Екологія Гусятинського району / В.М. Триснюк. – Тернопіль. Тернограф. 2004. – 219 с.
8. Trofymchuk O., Myrontsov M., Okhariev V., Anpilova Y., Trysnyuk V. [2021] Transdisciplinary analytical system for support the environmental researches. Systems, decision and control in energy II. Studies in systems, decision and control. Springer. Cham.
9. Trysnyuk, V., Okhariev, V., Trysnyuk, T., Zorina, O., Kurylo, A., & Radlowska, C. (2019). Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. In *18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*. (Vol. 2019, pp. 1-5). <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=98507>
DOI: 10.3997/2214-4609.201902084

Стаття надійшла до редакції 20.01.2021 і прийнята до друку після рецензування 28.04.2021

REFERENCES

1. Trysnyuk, T.V., Golovan, Yu.M., & Kurilo, A.V. (2018). Pidyshchennya rivnya ekolohichnoyi bezpeky ob'ektiv pryrodno-zapovidnoho fondu [Increasing the level of environmental safety of nature reserves]. In *Modern information technologies for environmental safety management, nature management, emergency measures: Collective monograph: XVII International scientific-practical conference* (pp. 213-214). Kyiv: Institute of Telecommunications and Global Information Space of NASU (in Ukrainian).
2. Trysnyuk, V., Shumeiko, V., Trysnyuk, T., Kurilo, A., & Holovan, J. (2020). Ecological safety of the Carpathian region in the conditions of technogenic dust pollution atmospheric air. *Control, Navigation and Communication Systems. Academic Journal, 1* (59), 127-131 (in Ukrainian). <https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.127>

3. Rudko, G.I. & Nazarenko, M.V. (2011). *Heoinformatsiyni tekhnolohiyi v nadrokorystuvanni* [Geoinformation technologies in subsoil use]. Kyiv: "Academpres" (in Ukrainian).
4. Krasovsky, G.Ya., Trofymchuk, O.M., Kreta, D.L., Klimenko, V.I., Ponomarenko, I.G., & Sukhodubov, O.O. (2005). Syntez kartografichnykh modeley zabrudnennya zemel' tekhnohennym pylom z vykorystannyam kosmichnykh znimkiv [Synthesis of cartographic models of land pollution by man-made dust using space images]. *Ecology and resources*, 12, 37-55 (in Ukrainian).
5. Greben, S., Trofymchuk, O., Trysnyuk, V., & Krasovskiy, G. (2020). Interpretation of remote sensing data for ecological tasks. In *IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW): 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves* (Vol. 3, pp. 772-776). Kharkiv, Ukraine.
6. Trofymchuk, O., Okhariev, V., & Trysnyuk, V. (2019). Environmental security management of geosystems. In *Conference Proceedings. 18th International Conference on Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects*.
7. Trysnyuk, V.M. (2004). *Ekolohiya Husyatyns'koho rayonu* [Ecology of Husiatyn district]. Ternopil: Ternograph (in Ukrainian).
8. Trofymchuk, O., Myrontsov, M., Okhariev, V., Anpilova, Y., & Trysnyuk, V. (2021). Transdisciplinary analytical system for support the environmental researches. In *Systems, decision and control in energy II. Studies in systems, decision and control*. Springer, Cham.
9. Trysnyuk, V., Okhariev, V., Trysnyuk, T., Zorina, O., Kurylo, A., & Radlowska, C. (2019). Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. In *18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*. (Vol. 2019, pp. 1-5). <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=98507>
DOI: 10.3997/2214-4609.201902084

The article was received 20.01.2021 and was accepted after revision 28.04.2021

Триснюк Тарас Васильович

кандидат технічних наук, науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: Чоколівський бульвар, 13, Київ, 03186

ORCID ID: 0000-0002-3672-8242, **e-mail:** taras24t@gmail.com

УДК 551.4

Oleh M. Adamenko, D. S., Professor, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, State Prize Laureate of the USSR
ORCID ID 0000-0003-0821-3011

Mykola I. Mosiuk, PhD, Associate Professor
ORCID ID 0000-0002-9828-7331, *e-mail*: mosiuk@ukr.net

Sofia V. Kachala, PhD, Associate Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1084-2968>

Kateryna O. Radlowska, PhD, Associate Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2640-4735>

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

PROSPECTS FOR NEW SITES OF WOOLLY RHINOCEROS AND MAMMOTHS ON THE TERRITORY OF PALEONTOLOGICAL SITE IN STARUNIA, CARPATHIAN REGION

***Abstract.** An international geopark “Park of the Ice Age” located near the Starunia village in Bohorodchany district of Ivano-Frankivsk region is world-famous for being a paleontological site of Pleistocene fauna of the woolly rhinoceroses and mammoth (the Eemian interglacial period, 46–10 000 years ago according to radiocarbon dating C_{14}) and for its mud volcano which is unique in the Carpathian region. This is a geological nature monument with an area of 60 hectares where abandoned ozokerite mine and oil and gas exploratory boreholes are presented. The detailed investigations carried out in the years 2004–2009 by Ukrainian-Polish expeditions were focused on discoveries of possible new sites of fauna fossils and human remains of European early modern humans (EEMH).*

*The future discoveries at the paleontological site of Starunia are extremely important. They intend to carry out ecological assessment of soil, surface and stream waters, atmospheric air, snow, ashes of meadow grasses, radiological screening, and geo-radar sensing to find new locations of extinct mammals. The Starunia area meets all the requirements of a geopark according to UNESCO standards and concepts. The first research findings (1907) are connected with the remains of woolly rhinoceros, mammoth, horse, roe deer and other Pleistocene mammals which had been found in the ozokerite mine at the depth of 12 m near Starunia (Bohorodchany district, Ivano-Frankivsk region). In 1914 the scientists from Lviv (Ukraine) and Krakow (Poland) fully appreciated these discoveries and published a set of articles and a monograph. In 1929 the members of the expedition of Skill Academy (Krakow, Poland) found the remains of three more woolly rhinoceroses in the ozokerite mine at the depth of 17 m. Numerous bones of vertebrates (rodents), remains of mussels, a lot of species of insects, beetles, parasitic worms, fleas, butterflies, spiders, snails, vascular plants, mosses, seeds and branches of dwarf birch (*Betula Nana*), alder (*Alnus glutinosa*), and other fossil of tundra flora were also discovered. Polish scientists organized detailed investigations of flora and fauna around Starunia, their results were published in articles but the World War II suspended this process. The investigations around Starunia intensified the comprehensive study of stratigraphy, paleontology, paleogeography, geochronology and other aspects of the Quaternary Period.*

In 1932 there was established the International Geological Congress (the International Union of Quaternary Study) by INQUA in Leningrad. The main methodological principals of this study dealt with the investigations around Starunia.

Keywords: *Starunia; mammoth; woolly rhinoceros; ozokerite; Pleistocene*

О.М. Адаменко, М.І. Мосюк, С.В. Качала, К.О. Радловська

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

ПОШУКИ НОВИХ МІСЦЕЗНАХОДЖЕНЬ ФАУНИ ВОЛОХАТИХ НОСОРОГІВ ТА МАМОНТІВ НА ТЕРИТОРІЇ СТАРУНСЬКОГО ПАРКУ ЛЬДОВИКОВОГО ПЕРІОДУ НА ПРИКАРПАТТІ

Анотація. Парк Льодовикового періоду біля с. Старуня Богородчанського району Івано-Франківської області всесвітньо відомий як палеонтологічне місцезнаходження плейстоценової фауни волохатих носорогів і мамонта (єємське міжльодовиків'я, 46–10 тисяч років тому, за даними радіовуглецевого аналізу C_{14}) та грязьовий вулкан – поки що єдиний у Карпатському регіоні. Це геологічна пам'ятка природи площею 60 га, де збереглися рештки озокеритового промислу та нафтогазопишукової свердловини. Дослідженнями польсько-українських експедицій 2004–2009 рр. намічено перспективи відкриття нових місцезнаходжень фауни та наших предків – кроманьйонців. Перші знахідки муміфікованих туш волохатого носорога, мамонта, решток коня, косулі та інших тварин плейстоценової, так званої мамонтової, фауни здійснено на глибині 12,6 м при проходці копальні (шахти) для видобутку озокериту біля с. Старуні Богородчанського району Івано-Франківської області у 1907 р. Вчені Кракова і Львова достатньо оцінили ці унікальні відкриття і опублікували ряд статей та монографію у 1914 р. У 1929 р. експедиція Академії Вміння із м. Кракова при проходці копальні на глибині 17 м знайшла рештки ще трьох волохатих носорогів. Зібрано численні кістки малих хребетних (гризунів), рештки мушлі, численних видів комах, жуків, паразитичних хробаків, блошиць, метеликів, павуків, слимаків, судинних рослин, мошок, насіння і гілок карликової берези, вільхи та інших представників тундрової флори. Польські вчені організували комплексні вивчення фауни і флори, частково їх результати були опубліковані у статтях, але Друга світова війна призупинила цей процес. Старунські знахідки інтенсифікували всебічне вивчення стратиграфії, палеонтології, палеогеографії, геохронології та інших аспектів четвертинного періоду – квартету. У 1932 р. Міжнародний геологічний конгрес заснував INQUA – Міжнародний Союз з вивчення четвертинного періоду. Основні методичні засади такого вивчення закладено на матеріалах Старуні.

Ключові слова: *Старуня; мамонт; волохатий носоріг; озокерит; плейстоцен*

DOI: 10.32347/2411-4049.2021.2.129-138

Вступ

Біля села Старуня на невеликій природоохоронній площі у 60 гектарів зібрані разом родовища нафти, озокериту (земляного воску), солей та всесвітньовідоме, палеонтологічне місцезнаходження викопної фауни волохатих носорогів, мамонтів, інших тварин, які проживали на цій території 46–10 тисяч років тому в четвертинному (льодовиковому) періоді. Наукова

унікальність цих знахідок у тому, що в озокеритових пластах соляного озера туші (а не тільки скелети) віднайдені гігантських викопних тварин забальзамувалися та зберегли свою цілісність разом з м'якими тканинами. Це дозволило вченим, за аналізом віднайденого забальзамованого біологічного матеріалу, в деталях дослідити, вивчити та науково описати рослинний та тваринний світ, кліматичні умови тієї віддаленої від нас тисячоліттями доби (Bauger, 1914). Окрім того, в 70-х роках минулого століття внаслідок землетрусу у Румунії в горах Вранча тут, безпосередньо в районі колишніх озокеритових промислів та палеонтологічних знахідок, утворився єдиний в Карпатах діючий грязьовий вулкан, який своїми виверженнями активно реагує на землетруси, які відбуваються не тільки на відносно наближених, але й на більш віддалених територіях. Особливістю грязьового вулкану є те, що він реагує на сейсмічні прояви заздалегідь, коли такі явища ще не стали очевидними, а навіть руйнівними на ділянках поверхні Землі (в районі епіцентру), де вони надалі проявляться з найбільшою силою (Adamenko, Karpash, Zorin, Kotarba, Mosiuk, Kovbaniuk, 2017; Belous, Kliarovskyi, 1987).

Ці виняткові наукові обставини дали можливість професору кафедри екології ІФНТУНГ Адаменку О.М. в 2005 році запропонувати організувати тут, у Старуні, міжнародний еколого-туристичний центр – Парк Льодовикового періоду (Adamenko, Krizhanivskiy, Stelmach, Mischenko, Zorina, Zorin, Ambrozyak, 2005b) з відповідними інфраструктурними науковими, відпочинковими та лікувальними об'єктами, атракціонами, повнорозмірними скульптурами викопної фауни, флори тощо. Подібні парки збудовані в багатьох інших країнах, наприклад в Чехії, Австрії й ін. Створення у нас такого об'єкта мало б не тільки пізнавальне значення для відвідувачів і туристів, які вочевидь знайомились би з непересічними історичними, природними, науковими феноменами Старуні, але й зробило б його привабливим з точки зору вигідного вкладення інвестицій для широких бізнесових кіл, за аналогією інвестування українськими бізнесменами, промисловцями найбільшого гірськолижного курорту України – Буковелю, розташованому неподалік, далі по автомобільному шляху Н09. Але Буковель опирається на рекреаційний потенціал наших Карпат, а Парк Льодовикового періоду в Старуні опирався би на наукові, пізнавальні, озокеритосолелікувальні можливості цієї місцевості нашого краю. До речі, в першій половині ХХ століття, а особливо в міжвоєнний період, в Старуні, поряд з озокеритовими промислами, існувало і озокеритосолелікування (Alexandrowicz, 2004).

Університет відповідно до своїх можливостей уже більше 15 років популяризує цю ідею. В його геологічному музеї, мінералогічна колекція якого визнана національним науковим надбанням, відкрита експозиція «Старуня: Парк Льодовикового періоду» із сучасними візуальними, мультимедійними засобами подачі інформації, яку демонструють всім екскурсіям, що відвідують музей. Наші вчені періодично подають інформацію про Старуню в пресі, телебаченні, інтернет-ресурсах тощо. Але поки втілення ідеї про започаткування та фундацію Парку Льодовикового періоду, як успішного бізнесового проекту, ще чекає свого зоряного часу, енергії та натхнення підприємливих людей.

Слід відзначити, що науковий потенціал Старунського феномену ще далеко не вичерпаний і чекає на майбутніх дослідників. Ймовірні причини потрапляння викопних тварин Льодовикового періоду в соляне озеро та його

озокеритові пласти відзначили ще перші дослідники в 1907 році (Bauger, 1914), вивчаючи рештки туші волохатого носорога. Варто згадати, що у 1914 р. професор М. Ломницький писав про круглий отвір у черепі носорога, поряд з яким знайдений уламок списа із загостреним кінцем, з одного боку обпалений вогнем, а з іншого – обрізаний гострим предметом, а це означає, що поряд із носорогами проживали первісні мисливці – кроманьйонці. Видається, що тварина могла бути травмована стародавніми людьми того часу – кроманьйонцями, та загнана в пастку болотяного озера при полюванні на неї, де її засмоктало і зробило недосяжною для тогочасних мисливців, але досяжною, як виявилось згодом, через тисячоліття для сучасних дослідників. Зазначимо, що українські вчені вже пізніше, в 70-х роках минулого століття, в околицях Старуні знайшли, дослідили та описали сліди багатьох поселень первісних людей (житла, знаряддя праці), які проживали на цій території 10–50 тисяч років назад. Тому можна припустити з великою ймовірністю, що й стародавня людина могла якимось чином потрапити в бальзамуючі озокеритові пласти соляного озера, а її тіло збереглося для нащадків природним шляхом в цьому середовищі. Це могли бути стародавні мисливці, які переслідуючи мамонта, кількатонну здобич, заганяючи її в пастку, самі ж в цю пастку в драматичних колізіях тих непростих ловів і потрапили. Це також могли бути жертви ритуальних жертвоприношень, які можливо існували в тогочасному суспільстві та про які ми можемо тільки здогадуватися. Це могли бути злочинці, яких первісне суспільство карало за тогочасними мірками, кидаючи на погибель в озокеритову трясовину.

Для науки і, зокрема, української важливо віднайти в Старуні рештки, а якщо пощастить, забальзамовані тіла цих прадавніх людей – кроманьйонців, наших пращурів. Ці викопні знахідки минулого, використані для вивчення першоджерел походження людини, без сумніву, могли б стати в один ряд з відкриттями та науковими сенсаціями світового масштабу. Вони прославили б у віках причетних відкривачів, дослідників, меценатів, місцевість, країну, в землях якої зберігалися такі “поклади”.

Перші знахідки муміфікованих туш волохатого носорога, мамонта, коня, козулі та інших тварин плейстоценової, так званої мамонтової, фауни були виявлені у жовтні 1907 р. на глибині 12,5 м при проходці копальні (шахти) для видобутку озокериту. Вчені Кракова та Львова достойно оцінили ці унікальні відкриття і опублікували низку статей та монографію у 1914 році (Bauger, 1914).

У 1929 р. експедиція Академії Вміння із Кракова при проходці спеціальної пошукової копальні на глибині 17,6 м знайшла забальзамовані бітумами і сіллю ще три туші волохатих носорогів. Були зібрані також численні кістки гризунів, рештки мушель, численних видів комах, жуків, паразитичних хробаків, блощиць, метеликів, павуків, слимаків, судинних рослин, насіння та гілок карликової берези, вільхи та інших представників тундрової флори (Szafer, 1930). Комплексне вивчення цих знахідок та відповідна публікація були перервані Другою світовою війною (Kotarba, 2005). У повоєнні роки проводилась розвідка озокеритових родовищ у Старуні та Дзвинячі, виконувались активні пошуки нафти, але її поклади у склепінні Старунської складки виявились не промисловими (Adamenko, Stelmach, Zinchuk, Kotarba, 2005a).

У березні 1977 р., після землетрусу у горах Вранча (Румунія), на озокеритовому родовищі Старуні виник перший у Карпатах грязьовий вулкан, який додав Старунському палеонтологічному місцезнаходженню нове “звучання”. Професори Івано-Франківського інституту нафти і газу Х. Білоус та В.М. Кляровський (Belous, Kliarovskiy, 1987), які вивчали прояви грязьового вулканізму у Старуні протягом 1977–1988 рр., зареєстрували цю ділянку у 60 га як геологічну пам’ятку природи загальнодержавного значення. Тоді ж до вивчення Старуні долучились геологи кафедри загальної геології Інституту нафти і газу О.М. Адаменко, О.Р. Стельмах, Г.Д. Стельмахович, Н.М. Шевчук, В.В. Коленченко. До них приєднались палеонтологи Природознавчого музею НАНУ зі Львова Д.М. Дригант та ін. (Chomobay, Drygant, 2009), а також археологи Інституту українознавства ім. І. Крип’якевича НАНУ зі Львова Л.Г. Мацкевий та Івано-Франківського педагогічного інституту ім. В. Стефаника Б.А. Василенко та І.Т. Кочкін. На околицях Старуні було відкрито кілька десятків стоянок давньої людини епох пізнього палеоліту, мезоліту та неоліту (Kuc, Rozahski, Goslar, Kubiak, Kotarba, 2005).

У 1988–1989 рр. дослідники Інституту нафти і газу (О.М. Адаменко, О.Р. Стельмах, Л.М. Михальська, І.Р. Михайлюк) провели вивчення Старуні за рахунок держбюджетного фінансування Міністерства освіти України. Були також виконані детальні (1:10000) топографічні (Р.Г. Пилипук) та радіометричні (В.П. Степанюк) дослідження території пам’ятки.

Матеріал і методи дослідження

У 2004 р. були організовані дві польсько-українські експедиції під керівництвом професора Краківської гірничо-металургійної академії ім. С. Сташиця, Президента Польського товариства “Геосфера” Мацея Котарби і професора кафедри екології Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу О.М. Адаменка. Результати опубліковані у 2005 р. у спеціальній монографії (Kotarba, 2005).

У 2006–2009 рр. вдалось організувати буріння 33 колонкових свердловин зі 100% відбором керну для детального вивчення розрізів II і I надзаплавних терас та похованої під ними переаглибленої долини р. Лукавець Великий (рис. 1). Продовжувались геолого-геоморфологічні, геофізичні та геохімічні дослідження з використанням сучасного інструментарію. Отримано кілька десятків радіовуглецевих дат від 46 до 10 тис. років (Kuc, Rozahski, Goslar, Kubiak, Kotarba, 2005). Аналіз спорово-пилкових діаграм (рис. 2), палеокарпологічних (рис. 3) та малакофауністичних (рис. 4) комплексів визначив пізньоплейстоценовий вік знахідок мамонта та волохатих носорогів (Sokolowski, Stachowicz-Rybka, 2009).

У квітні 2019 р. фахівці Володимир Іващук (фірма Transient, Київ) та Анатолій Чернов (Київський національний університет ім. Т.Г. Шевченка) виконали георадарні дослідження (рис. 5), які показали перспективність електромагнітних хвиль для визначення шаруватої структури місцезнаходження та побудови підземного рельєфу розповсюдження палеоболіт, перспективних для пошуків нових місцезнаходжень мамонтової фауни.

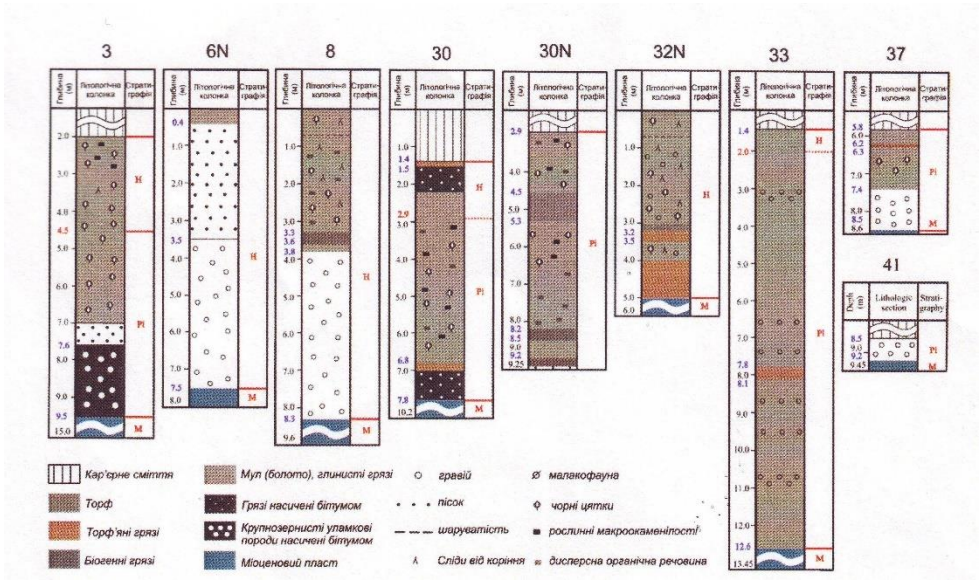


Рис. 1 – Літостратиграфічні колонки пробурених свердловин №№ 3, 6N, 8, 30, 30N, 32N, 33, 37 та 41 (Adamenko, Karpash, Zorin, Kotarba, Mosiuk, Kovbaniuk, 2017; Kotarba, 2009)

Результати та їх аналіз

Виконані ізотопні визначення вуглецю для розуміння, звідки він прийшов – з глибини від нафтового покладу чи від розкладу біоорганіки рослин і тварин плейстоцену. Отримані десятки детальних спорово-пилкових діаграм, палеокарпологічних та малакофауністичних визначень (рис. 2–4). Деталізована будова відкладів з допомогою мікрогравітаційних, електрондувальних, мікробіологічних методів. Визначено, що розріз плейстоцену охоплює період від єємського міжльодовиків'я до останньої фази вюрмського зледеніння. Детально вивчений також розріз голоценових відкладів (Adamenko, 2019).

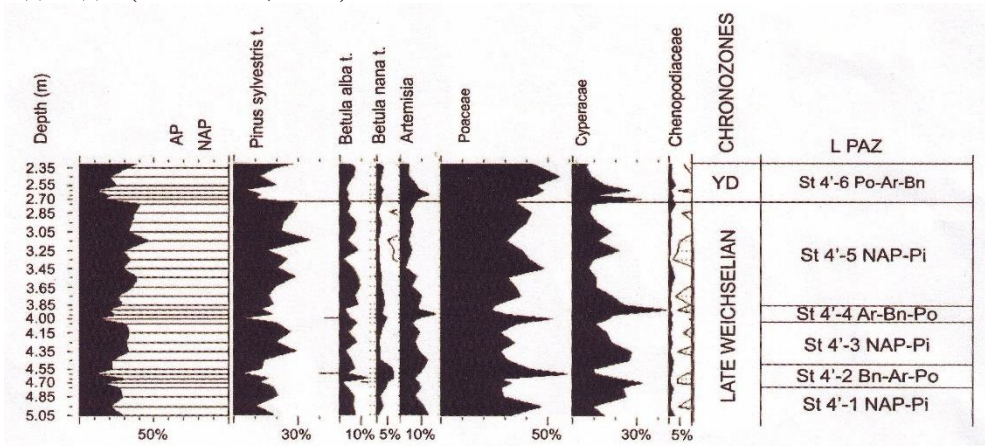


Рис. 2 – Пилкові діаграми у межах свердловини №4. YD – ранній Дріас, PB – Пребореальний період

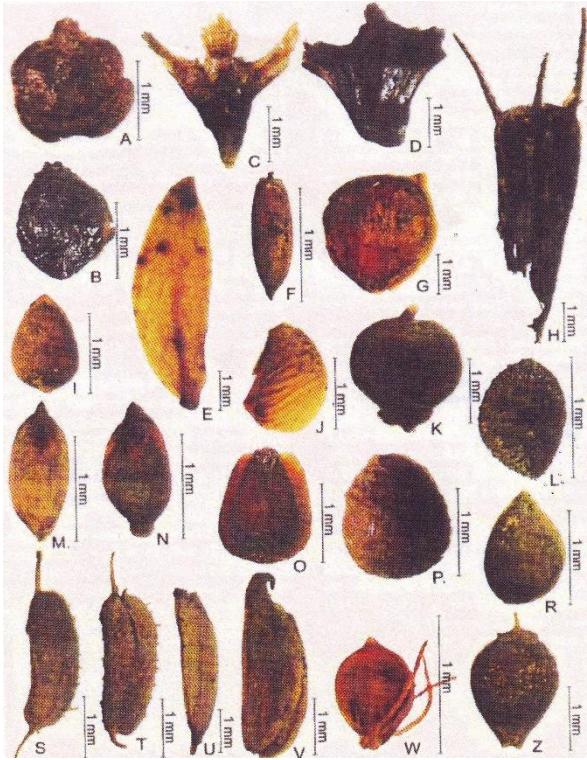


Рис. 3 – Макрофосилії (залишки понад 1 мм) рослин пізнього льодовикового періоду й епохи голоцену на території с. Старуня (Kotarba, 2009).

A, B – карликова береза *Betula pampa*, плід; C, D – карликова береза *Betula pampa*, лущайка плоду; E – верба *Salix*, листок; F – рогіз *Typha*, насіння; G – жовтець їдкий *Ranunculus acris*, плід; H – череда трироздільна *Bidens tripartita*, плід; I – кропива дводомна *Urtica dioica*, плід; J – перстач прямостоячий *Potentilla erecta*, плід; K – осока висока *Carex elata*, плід; L – подорожник великий *Plantago major*, насіння; M, N – тонконогові *Poaceae*, плід; O – вовконіг європейський *Lysurus europaeus*, плід; P – водяний жовтець *Batrachium*, плід; R – фіалка болотна *Viola palustris*, насіння; S, T – вид водних багаторічних трав'янистих рослин родини Рдесникові *Zannichellia palustris*, плід; U – тризубець морський *Triglochin maritimum*, насіння; V – тризубець морський *Triglochin maritimum*, плід; W – комиш лісовий *Scirpus sylvaticus*, плід; Z – ситняг болотяний *Elejcharis palustris*, плід. Фото Стахович-Рибка і М. Галка.

багаторічних трав'янистих рослин родини Рдесникові *Zannichellia palustris*, плід; U – тризубець морський *Triglochin maritimum*, насіння; V – тризубець морський *Triglochin maritimum*, плід; W – комиш лісовий *Scirpus sylvaticus*, плід; Z – ситняг болотяний *Elejcharis palustris*, плід. Фото Стахович-Рибка і М. Галка.

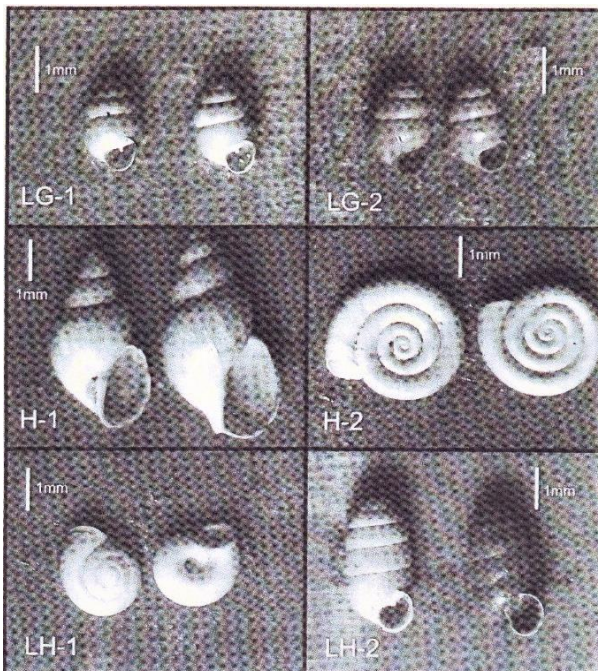


Рис. 4 – Ракушки звичайних слимаків пізнього льодовикового періоду й епохи голоцену, відкладених на ділянці с. Старуня (Kotarba, 2009).

Види пізнього льодовикового періоду: LG-1 – *Vertigo geyeri* Lindholm, LG-2 – *Vertigo genesii* (Gredler). Види епохи голоцену: H-1 – *Vallonia pulchella* (Müller), LH-2 – *Pupilla muscorum* (Linnaeus). Фото В.П. Александрович

Але найважливішим результатом було виявлення найсприятливішої ділянки, де на глибині від 4.5 до 8 м у палеоболотних відкладах потужністю 2 м – бітумінозних чорних намулах з сіллю – могли зберегтись ще не знайдені рештки плейстоценових ссавців, а можливо, і мисливців на них – наших предків кроманьйонців (Kotarba, 2009).



Рис. 5 – Георадарні дослідження Старуні 10 квітня 2019 р. Фото І. І. Ковбанюка

Висновки

За сприяння ректорату університету нафти і газу в подальшому плануємо продовжити георадарне зондування та інші детальні геоекологічні та пошукові роботи, тому що Старуня – це палеокліматичний маркер розвитку природи давніх геосистем, це “місток” між стратиграфічними схемами квартеру Західної Європи та рівнинної території України (Adamenko, 2019), це унікальне світового значення палеонтологічне місцезнаходження добре збережених муміфікованих туш волохатих носорогів, це єдиний у Карпатах діючий грязьовий вулкан і, нарешті, це – надзвичайно цікавий об’єкт міжнародного туризму. Автори мають надію, що знайдуться інвестори, які допоможуть зберегти для майбутніх поколінь унікальний феномен Старуні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Adamenko, O.M., Karpash, O.M., Zorin, D.O., Kotarba, I.V., Mosiuk, L.I. & Kovbaniuk, M.I. (2017). *Starunya: Park of the Ice Age*. Ivano-Frankivsk: Symfoniia forte (in Ukrainian).
2. Belous, N.Kh., & Kliarovskiy, V.M. (1987). *Chudo-Starunia (Heolohycheskye pamiatnyky Ukrainy)*. [Miracle of Starunya (Geological Monuments of Ukraine)]. Kyiv: Naukova dumka, 48-49 (in Ukrainian).

3. Adamenko, O.M., Krizhanivskiy, E.I., Vekeryk, V.I., Stelmach, O.P., Mischenko, L.V., Zorina, N.O., Zorin, D.O. & Ambrozyak, M.V. (2005b). A concept of an international “Ice-Age Geopark” as an ecological-tourist center in Starunia former ozokerite mine, fore-Carpathian region, Ukraine. In: Kotarba M. J. (ed.), *Polish and Ukrainian geological studies (2004-2005) at Starunia – the area of discoveries of woolly rhinoceroses* (pp. 205-209). Polish Geological Institute and Society of Research on Environmental Changes “Geosphere”.
4. Adamenko, O.M., Stelmach, O.R., Zinchuk, M.S. & Kotarba, M.J. (2005a). History of petroleum exploration in the Starunia area, fore-Carpathian region, Ukraine. In: Kotarba M. J. (ed.), *Polish and Ukrainian geological studies (2004-2005) at Starunia - the area of discoveries of woolly rhinoceroses* (pp. 53-60). Polish Geological Institute and Society of Research on Environmental Changes “Geosphere”.
5. Adamenko, O.M. (2019). The Upper Pleistocene stratigraphy of the Starunya site as a “bridge” between the stratigraphical frameworks of Western Europe and the plain area of Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28 (2), 213-220. doi: 10.15421/111922
6. Alexandrowicz, S.W. (2004). *Starunia and the Quaternary research in the tradition and initiatives of the Polish Academy of Arts and Sciences*. Studia i materiały do dziejów Polskiej Akademii Umiejętności, 261 pp. (in Polish, English summary).
7. Bayger, J.A. (1914). Zaba smieszka: in: Bayger, J.A., Hover, H., Kiemik, E., Kulczynski, W., Lomnicki, M., Lomnicki, J., Mierzejewski, W., Niezabitowski, W., Raciborski, M., Szafer, W., & Schille, F. *Wykopalska Starunskie*. Muzeum im. Dzieduszyckich we Lwow, 15: 385.
8. Chomobay, Y.M. & Drygant, D.M. (2009). The Starunia collections in the Natural History Museum of the National Academy of Sciences of Ukraine in Lviv. *Geoturystyka*, 3 (18), 45-50.
9. Kotarba, M.J. (2005). *Polish and Ukrainian geological studies (2004-2005) at Starunia – the area of Discoveries of woolly ihinoceroses*. Polish Geological Institute and Society of Research on Environmental Changes “Geosphere”, 9-218.
10. Kotarba, M.J. (2009). Interdisciplinary studies (2006-2009) at Starunia (Carpathian region, Ukraine) – the area of discoveries of Woolly Rhinoceroses. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 79, 3, 217-480.
11. Kuc, T., Rozahski, K., Goslar, T., Kubiak, H., & Kotarba, M.J. (2005). Radiocarbon dating of remnants of woolly rhinoceroses and mammoth from Starunia, fore-Carpathians, Ukraine. In: Kotarba M.J. (ed.), *Polish and Ukrainian Geological Studies in the Years 2004-2005 at Starunia – the Area of Discoveries of Woolly Rhinoceroses and Other Extinct Vertebrates* (pp. 195-202). Polish Geological Institute and “Geosphere”.
12. Matskevyy, L.G. (2005). Archaeological sites in the Starunia area, fore-Carpathian region, Ukraine. In *Polish and Ukrainian geological studies (2004-2005) at Starunia – the area of discoveries of woolly rhinoceroses* (pp. 45-51).
13. Sokolowski, T., & Stachowicz-Rybka, R. (2009). Chronostratigraphy and changes of environment of Late Pleistocene and Holocene at Starunia palaeontological site and vicinity (Carpathian region, Ukraine). *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 79, 315-331.
14. Szafer, W. (1930). The Diluvial Flora in Starunia. *Bulletin International de l'Académie Polonaise des Sciences et des Lettres de Cracovie*, Ser. B, Cracovie, 12-21.

Стаття надійшла до редакції 13.03.2021 і прийнята до друку після рецензування 31.05.2021

Адаменко Олег Максимович

доктор геолого-мінералогічних наук, професор кафедри екології Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Заслужений діяч науки і техніки України, Лауреат Державної премії СРСР

Адреса робоча: Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15
ORCID ID 0000-0003-0821-3011

Мосюк Микола Іванович

кандидат технічних наук, доцент кафедри екології Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Адреса робоча: Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15

ORCID ID 0000-0002-9828-7331, **e-mail:** mosiuk@ukr.net

Качала Софія Віталіївна

кандидат технічних наук, доцент Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Адреса робоча: Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1084-2968>

Радловська Катерина Олексіївна

кандидат технічних наук, доцент кафедри екології Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

Адреса робоча: Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2640-4735>

© Авторські і суміжні права належать авторам окремих публікацій, Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київському національному університету будівництва і архітектури.

Copying © 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) двома мовами (українською 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.

Ілюстрації 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

**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 30.06.2021. Формат 70x108/16. Папір офсетний.
Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 12.25
Обл.-вид. арк. 13.8
Замовлення № _____

КИЇВ 2021