



2021  
НАУКОВИЙ ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ГІРНИЧОГО УНІВЕРСИТЕТУ

# NAUKOVYI VISNYK

Natsionalnoho  
Hirnychoho Universytetu

6 2021

2021



6

НАУКОВИЙ ВІСНИК  
НАЦІОНАЛЬНОГО ГІРНИЧОГО УНІВЕРСИТЕТУ



**DNIPRO UNIVERSITY  
of TECHNOLOGY**  
1899

# NAUKOVYI VISNYK

Natsionalnoho  
Hirnychoho Universytetu

Peer-reviewed  
journal

**6**

**2021**

186

Geology

Mining

Solid State Physics, Mineral Processing

Geotechnical and Mining Mechanical Engineering,  
Machine Building

Electrical Complexes and Systems

Power Supply Technologies

Environmental Safety, Labour Protection

Information Technologies,  
Systems Analysis and Administration

Economy and Management

<i>Editor-in-chief</i>	G. G. Pivnyak
<i>Deputy editors-in-chief</i>	O. S. Beshta, O. M. Shashenko
<i>Executive editor</i>	T. V. Barna
EDITORIAL BOARD: (Ukraine)	K. A. Bezruchko, V. I. Bondarenko, A. F. Bulat, M. M. Dovbnich, R. O. Dychkovskiy, O. V. Fomin, V. I. Golinko, V. V. Hnatushenko, V. V. Lukinov, V. G. Marhasova, V. S. Nitsenko, O. P. Orliuk, I. P. Otenko, A. V. Pavlychenko, S. M. Peresada, P. I. Pilov, Yu. I. Pylypenko, G. M. Pylypenko, V. F. Prykhodchenko, V. V. Protsiv, M. V. Ruzina, V. S. Savchuk, V. I. Samusia, Ye. A. Sdvizhkova, V. V. Soboliev, I. O. Taran, I. M. Udovik, O. G. Vagonova, T. G. Shendrik, A. O. Zadoia.
FOREIGN MEMBERS	Abderrazzak El Albani ( <i>Université de Poitiers, France</i> ); A. Benselhoub ( <i>Badjhi Mokhtar</i>
OF EDITORIAL BOARD:	<i>University, Algeria</i> ); Yu. Bilan ( <i>Szczecin University, Poland</i> ), G. Gruhler ( <i>Heilbronn University, Federal Republic of Germany</i> ); C. Drebenstedt ( <i>Freiberg University of Mining and Technology, Federal Republic of Germany</i> ); J. Dubinski ( <i>Central Mining Institute, Republic of Poland</i> ); Liu Baochang ( <i>College of Construction Engineering, Jilin University, China</i> ); T. Majcherczyk ( <i>AGH University of Science and Technology, Republic of Poland</i> ); V. Naumov ( <i>Cracow University of Technology, Republic of Poland</i> ); B. Rakishev ( <i>Kazakh National Technical University after K. I. Satpaev, Republic of Kazakhstan</i> ); H. Ramadan ( <i>The University of Technology of Belfort-Montbéliard, France</i> ); B. Ratov ( <i>Kazakh National Research Technical University, Republic of Kazakhstan</i> ); S. Simon ( <i>The Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg, Federal Republic of Germany</i> ); A. Smolinski ( <i>Central Mining Institute, Republic of Poland</i> ); Andīna Sprince ( <i>Riga Technical University, The Republic of Latvia</i> ); A. Stovas ( <i>The Norwegian University of Science and Technology, Kingdom of Norway</i> ); J. Strugul ( <i>The University of Adelaide, Commonwealth of Australia</i> ); A. Tajduś ( <i>AGH University of Science and Technology, Republic of Poland</i> ); W. Czarnetzki ( <i>The Esslingen University of Applied Sciences, Federal Republic of Germany</i> ); M. Schmidt ( <i>The Brandenburg Technical University, Federal Republic of Germany</i> ), G. Schmidt ( <i>The Esslingen University of Applied Sciences, Federal Republic of Germany</i> ).
	The journal has been included in SciVerseSCOPUS, Index Copernicus Journal Master List, ProQuest, EBSCOhost, Ulrichsweb Global Serials Directory, ResearchBib, Ukrainika naukova, Dzherelo.
	Subscription for the journal can be done in post offices of the Ukraine (subscription index in Subscription Publication Catalogue is 89166) and in the subscription agencies Ukrinformnauka (index in Subscription Publication Catalogue is 10107) and Ideia (index is 17736)
	Makeup T. A. Klimenko. Proofreading M. T. Sysun. Passed for printing under recommendation of Academic Council of Dnipro University of Technology (transaction No. 16 dated December 08, 2021).
Certified	by Ministry of Justice of Ukraine. Registration number KB No. 24305-14145PR dated December 27, 2019. Passed for printing December 24, 2021. Sheet size 60 × 90/8. Presswork 23.3. Offset paper. Number of copies printed 200. Order No. 1.
Founder and publisher	Dnipro University of Technology, Dnipro Certificate of Publisher ДК No.1842 dated June 11, 2004
Address of publisher and editorial office:	19, D. Yavornytskoho Ave., building 3, room 24a, Dnipro, 49005 Tel.: (056) 373 08 65, e-mail: nv.ngu@ukr.net, www.nvngu.in.ua; nv.nmu.org.ua
Production	PP KF "Gerda". 60, D. Yavornytskoho Ave., Dnipro, 49000. Certificate of Publisher ДК No.397 dated April 3, 2001



ДНІПРОВСЬКА  
ПОЛІТЕХНІКА  
1899

# НАУКОВИЙ ВІСНИК

Національного  
гірничого університету

Рецензований  
журнал

**6** 2021

186

Геологія

Розробка родовищ корисних копалин

Фізика твердого тіла, збагачення корисних копалин

Геотехнічна і гірничо механіка, машинобудування

Електротехнічні комплекси та системи

Технології енергозабезпечення

Екологічна безпека, охорона праці

Інформаційні технології, системний аналіз та керування

Економіка та управління

Головний редактор	Г. Г. Півняк
Заступники головного редактора	О. С. Бешта, О. М. Шашенко
Відповідальний редактор	Т. В. Барна
РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ: (Україна)	К. А. Безручко, В. І. Бондаренко, А. Ф. Булат, О. Г. Вагонова, В. В. Гнатушенко, В. І. Голінько, М. М. Довбніч, Р. О. Дичковський, А. О. Задоя, В. В. Лукінов, В. Г. Маргасова, В. С. Ніценко, О. П. Орлюк, І. П. Отенко, А. В. Павличенко, С. М. Пересада, П. І. Пілов, Ю. І. Пилипенко, Г. М. Пиляпенко, В. Ф. Приходченко, В. В. Проців, М. В. Рузіна, В. С. Савчук, В. І. Самуся, О. О. Сдвижкова, В. В. Соболев, І. О. Таран, І. М. Удовік, О. В. Фомін, Т. Г. Шендрік.
ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:	Абдеразак Ель Альбані ( <i>Університет Пуатьє, Франція</i> ); А. Бенселгуб ( <i>Університет Баджі Мохтар, Алжир</i> ); Ю. Білан ( <i>Університет Щецина, Республіка Польща</i> ); Г. Грулер ( <i>Хайльброннський університет, ФРН</i> ); К. Дребенштедт ( <i>Технічний університет «Фрайберзька гірничо академія», ФРН</i> ); Ю. Дубінські ( <i>Головний інститут гірничої справи, Республіка Польща</i> ); Лю Баочан ( <i>Коледж будівельної інженерії, Університет Цзілінь, Китай</i> ); Т. Майхерчик ( <i>Гірничо-металургійна академія ім. Станіслава Сташиця, Республіка Польща</i> ); В. Наумов ( <i>Краківський політехнічний інститут ім. Тадеуша Костюшко, Республіка Польща</i> ); Б. Ракішев ( <i>Казахський національний технічний університет ім. К. І. Сатпаєва, Республіка Казахстан</i> ); Х. Рамадан ( <i>Технологічний Університет Бельфор-Монбел'яра, Франція</i> ); Б. Ратов ( <i>Казахський національний технічний університет ім. К. І. Сатпаєва, Республіка Казахстан</i> ); С. Сімон ( <i>Бранденбурзький технологічний університет Коттбус-Зенфтенберг, ФРН</i> ); А. Смолінські ( <i>Головний інститут гірництва, Республіка Польща</i> ); Andīna Sprince ( <i>Ризький технічний університет, Республіка Латвія</i> ); О. Стовас ( <i>Норвезький університет природничих наук та технологій, Королівство Норвегія</i> ); Д. Стругул ( <i>Університет Аделаїди, Австралійський Союз</i> ); А. Тайдусь ( <i>Гірничо-металургійна академія ім. Станіслава Сташиця, Республіка Польща</i> ); В. Чарнецкі ( <i>Есслінгенський університет прикладних наук, ФРН</i> ); М. Шмідт ( <i>Бранденбурзький технічний університет, ФРН</i> ), Г. Шмідт ( <i>Есслінгенський університет прикладних наук, ФРН</i> ).
	Журнал включено до міжнародних наукометричних баз SciVerseSCOPUS, Index Copernicus Journal Master List та баз EBSCOhost і ProQuest, каталогів періодичних видань Ulrichsweb Global Serials Directory та ResearchBib, реферується в базі даних «Україніка наукова», у журналі «Джерело».
	Передплата здійснюється в поштових відділеннях України за «Каталогом періодичних видань» (передплатний індекс: 89166) і в передплатних агентствах «Укрінформнаука» (індекс: 10107) та «Ідея» (індекс: 17736).
	Комп'ютерна верстка Т. О. Клименко. Коректор М. Т. Сисун. Журнал підписано до друку за рекомендацією вченої ради Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (протокол № 16 від 08.12.2021 року)
Журнал зареєстровано	у Міністерстві юстиції України. Реєстраційний номер КВ № 24305-14145ПР від 27.12.2019. Наклад 200 прим. Зам. № 1. Підписано до друку 24.12.2021. Формат 60 × 90/8. Ум. друк. арк. 23,3. Папір офсетний.
Засновник та видавець	Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро. «Свідоцтво суб'єкта видавничої справи» ДК №1842 від 11.06.2004
Адреса видавця та редакції:	49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19, корпус 3, к. 24а Тел.: (056) 373 08 65, e-mail: nv.ngu@ukr.net; www.nvngu.in.ua; nv.nmu.org.ua
Виготовлення:	ПП КФ «Герда». 49000, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 60. «Свідоцтво суб'єкта видавничої справи» ДК №397 від 03.04.2001