УДК 553.045

doi <https://doi.org/10.31996/mru.2021.4.16-20>

М. М. КУРИЛО, канд. геол. наук, доцент кафедри геології родовищ корисних копалин (ННІ "Інститут геології" Київського національного університету ім. Тараса Шевченка), kurilo@univ.kiev.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1411-2754>,

І. В. ВІРШИЛО, канд. геол. наук, доцент кафедри геоінформатики (ННІ "Інститут геології" Київського національного університету ім. Тараса Шевченка), ivirshylo@knu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1285-5308>,

С. К. КОШАРНА, канд. геол. наук, асистент кафедри гідрогеології та інженерної геології (ННІ "Інститут геології" Київського національного університету ім. Тараса Шевченка), kosharna_sofia@knu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4523-1086>

М. KURYLO, PhD (Geol.), Associate Professor, Geology of mineral deposits Department (Institute of Geology Taras Shevchenko National University of Kyiv), kurilo@univ.kiev.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1411-2754>,

І. VIRSHYLO, PhD (Geol.), Associate Professor, Department of Geoinformatics (Institute of Geology Taras Shevchenko National University of Kyiv), ivirshylo@knu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1285-5308>,

S. KOSHARNA, PhD (Geol.), Assistant Professor, Hydrogeology and Engineering Geology Department (Institute of Geology Taras Shevchenko National University of Kyiv), kosharna_sofia@knu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4523-1086>

ІНДЕКСИ ДОСТУПНОСТІ КРИТИЧНОЇ МІНЕРАЛЬНОЇ СИРОВИНИ ДЛЯ "ЗЕЛЕНОЇ" ЕНЕРГЕТИКИ

ACCESSIBILITY OF INDICES OF CRITICAL MINERAL RAW MATERIALS FOR GREEN ENERGY

У межах дослідження запропоновано методику визначення та розрахунків доступності 17 видів мінеральної сировини, які є критичними для переходу до "зеленої" енергетики з огляду на десять основних технологій. Розрахунок індексів доступності ґрунтується на ранжуванні металів за такими параметрами: 1 – абсолютна кількість металу, використаного в поточному періоді; 2 – прогнозований попит на метал в енергетиці у 2050 році; 3 – кількість технологій, де є потреба в окремому металі; 4 – кумулятивні викиди CO₂, пов'язані з виробництвом металу; 5 – період наявності запасів; 6 – кількість країн, які продукували більш як 1 % світового виробництва металу; 7 – країни з максимальною річною продуктивністю щодо виробництва металу. Відповідно до цих характеристик метали ранжовано за двома сценаріями. Визначено індекс доступності кожного виду сировини. Розрахунок індексу доступності для кожного металу було розширено за допомогою моделювання лінійного тренду та техніки нечіткої логіки. Враховано два сценарії товарних систем "попит-пропозиція" з попередньо розробленим прогнозом до 2050 року: ймовірність базового незалежного параметра та збалансована нечітка сума. Обидва сценарії дали збіжні результати розрахунку, але другий підкреслив важливість ланцюга постачання. Найнижчі значення індексу доступності (до 0,15) розраховано для кобальту, графіту й літію, які є ключовими для виробництва акумуляторів. Низькі показники (до 0,20) також отримано для заліза, нікелю та хрому. Модель нечіткої логіки допомогла розкрити два сценарії до 2050 року й виявити високий рівень невизначеності для прогнозу на 2050 рік.

Ключові слова: ранжування корисних копалин, індекс доступності, семифакторна модель, система "попит-пропозиція", модель нечіткої логіки.

Within the study determination methodology and estimation of availability indices for 17 types of mineral raw materials that are critical for the transition to green energy have been presented, taking into account 10 basic technologies. The calculation of indices is based on the ranking of metals according to the following parameters: 1 – the absolute amount of metal used in the current period; 2 – projected demand for metal in the energy sector in 2050; 3 – the number of technologies where there is a need for a mineral; 4 – cumulative CO₂ emissions associated with metal production; 5 – the period of availability for reserves; 6 – the number of countries that produced more than 1 % of world production; 7 – countries with maximum annual productivity in metal production. The ranking of metals according to these characteristics was carried out according to two scenarios and the index of availability of each type of raw material was determined. The calculation of the availability index for each metal was extended by linear trend modeling and fuzzy logic techniques. Two scenarios of commodity supply-demand systems with a pre-developed forecast until 2050 are taken into account: the probability of a basic independent parameter and a balanced fuzzy sum. Both scenarios gave comparable calculation results, but the second emphasized the importance of the supply chain. The lowest values of the availability index (up to 0.15) were calculated for cobalt, graphite and lithium, which are key battery metals. Low values (up to 0.20) are fixed for iron, nickel and chromium. The fuzzy logic model helped uncover two scenarios by 2050 and reveal a high level of uncertainty in the projected forecast for 2050.

Keywords: ranking of minerals, availability index, seven-factor model, supply-demand system, fuzzy logic model.

Вступ. Перехід енергетики до масштабного використання відновних джерел у світі й Україні зокрема пов'язаний з використанням широкого спектра металів і корисних копалин, обсяги яких є обмеженими. Доступ до більшості з цих корисних копалин лімітований через їхні невеликі ресурси, концентрацію в кількох регіонах, широкий обсяг промислових напрямів використання, що охоплює не лише енергетичну сферу, та низку екологічних обмежень. За прогнозами Всесвітнього банку [5], для задоволення дедалі більшого попиту на чисті енергетичні технології, виробництво таких "металів-акумуляторів", як графіт, літій і кобальт, зросте майже на 500 % до 2050 року. Збільшення попиту на Li сягне 965 %, на Co – 585 %, Ni – 108 %, графіт – 383 %.

Перелік критичних корисних копалин, потрібних для переходу на "зелену" енергетику, охоплює алюміній, хром, кобальт, мідь, графіт, індій, залізо, свинець, літій, манган, молибден, неодим, нікель, срібло, титан, ванадій і цинк. Більшість із них належить до критичної мінеральної сировини в розвинених країнах. Ці метали вважаються життєво важливими для найбільших економік світу, але водночас їхня пропозиція на ринку – постійний об'єкт для низки ризиків, пов'язаних, наприклад, з дефіцитом геологічних ресурсів, геополітичними проблемами, торговою політикою чи іншими зовнішніми чинниками.

Аналітичний огляд останніх досліджень та окреслення не вирішених раніше проблем. Основні ризики реального виробництва в більшості розвинених країн пов'язані з осо-

бливостями поширення запасів, добувних і переробних потужностей. Наразі Азійсько-Тихоокеанський регіон займає провідні позиції на ринку “акумуляторних металів”. Можливо, ця регіональна тенденція збережеться впродовж кількох десятиліть. І на сьогодні це дає змогу країнам-виробникам, зокрема Китаю, використовувати доступність цих ресурсів як потужний геополітичний інструмент.

Перехід до “зеленої” енергетики нині ставить перед країнами актуальне завдання з розроблення кількох варіантів постачання критично важливих металів, що є базовими для всіх технологічних процесів такого переходу. Визначення й оцінення показників доступності для критичних металів, використовуваних в енергетичному секторі, вплине на можливість здійснення “зеленого” енергетичного переходу загалом і впровадження індивідуальних технологій зокрема. Для країн ЄС, США й Канади ці інструменти відомі й традиційні, а для багатьох інших країн ще не були розроблені. Наприклад, в Україні поняття “стратегічні”, “критичні” корисні копалини було введено нормативно, але методології їхнього розрахунку ще не визначено. Для кожного регіону й країни цей підхід може бути доповнений регіональними критеріями важливості.

Наявні методи оцінення ступеня виснаження ресурсів ґрунтуються на кількісних порівняннях запасів корисних копалин і темпів їхнього видобутку. Дуже часто моделі виснаження ресурсів не зважають на політичні, організаційні та інші ризики доступності. Визначення важливих мінералів найчастіше передбачає використання показників інтенсивності у вітчизняному виробництві, наявність власних ресурсів і показник залежності від імпорту. Отже, ці підходи враховують лише минулу або поточну ситуацію і не передбачають майбутнього росту споживання корисних копалин і стратегії пом’якшення можливих шкідливих впливів.

Зважаючи на вищезазначене, у цьому дослідженні для подібного моделювання “доступності” металу пропонується оцінювати ресурс з огляду на такі чинники:

- 1) абсолютна кількість металів, які використовують у поточному періоді для енергетики;
- 2) прогнозований річний попит на енергетичні технології до 2050 року у відсотках від поточної норми;
- 3) кількість технологій, де є потреба в окремому металі;
- 4) сукупні викиди CO₂, пов’язані з виробництвом металу;
- 5) період наявності резервів;
- 6) кількість країн, які продукують понад 1 % світового виробництва;
- 7) країни з максимальною річною продуктивністю металу;

- 8) поширеність металу в земній корі;
- 9) рівень вторинного перероблення металу;
- 10) наявність заміників сировини.

Мета статті – проаналізувати доступність критично-мінеральної сировини, використовуючи логіко-математичні підходи. Серед основних цілей – отримати результати розрахунків, пов’язані не лише із сьогоднішніми, а й майбутніми показниками споживання металу. З цих причин аналіз зважає також на багато зовнішніх ризиків.

Виклад основного матеріалу. Наведений вище перелік характеристик узятो за основу для моделювання доступності металів і встановлення їхнього рейтингу. Кожному використаному параметру було присвоєно відповідні назви та аббревіатури (табл. 1).

Для аналізу було використано дані щодо десяти головних технологій, а саме: вітроенергетики, сонячної фотоелектрики, концентрованої сонячної енергії, гідроенергії, геотермальної енергії, накопичення енергії, атомної енергії, спалювання вугілля й газу, вловлювання та зберігання вуглецю. Окрім власне заліза, дослідження охоплювало чорні й кольорові, другорядні й рідкісноземельні метали (неодим і графіт). А окремий показник враховував використання металу в перерахованих технологіях “зеленої” енергетики.

Для оцінення згаданих ризиків обмежень було використано підхід, подібний до оцінення ймовірності успіху, що часто використовується в геології нафти [3]. Усі перераховані чинники розглядаються як важливі частини системи попиту та пропозиції. І для опису цієї системи було розроблено два сценарії, що передбачають такі припущення:

1. Усі параметри є безперервними функціями, тож застосування лінійного або нелінійного перетворення цих функцій можливе.
2. Запропоновані індекси не мають функціональних взаємозалежностей і можуть бути повністю або частково незалежними змінними.
3. Немає металів, які мали б непереборні ризики у виробництві впродовж прогнозованого періоду (наступні 30 років). Отже, ймовірність успіху можна оцінити в межах 50–100 %, що показують значення, інвертовані до ризику.
4. Усі оцінки є відносними й застосовними для порівняння різних металів, але не демонструють жодного абсолютного рівня успіху використання металу.
5. Зв’язки між металами, видобутими з родовищ комплексного типу (як-от Fe-Cu-Au, Ni-Cu-Co та Pb-Zn-Ag), через велику різноманітність їхніх генетичних типів не враховуються. Крім того, не розглядаються можливості для

Таблиця 1. Основні бальні індекси

Параметр	Назва індексу	Абревіатура індексу
Абсолютний річний обсяг металів, які споживатиме енергетика у 2050 році	Demand IA	IA1
Прогнозований річний попит 2050 року від енергетичних технологій у відсотках до поточного рівня	Relative Demand IA	IA2
Кількість відповідних технологій, де є потреба в кожному металі	Technology IA	IA3
Кумулятивні викиди CO ₂ , що пов’язані з виробництвом металу	Emission IA	IA4
Період наявності резервів металу	Reserves IA	IA5
Кількість країн, які виробляли більш як 1 % світового виробництва металу	Diverse Country IA	IA6
Країни з максимальною річною часткою світового виробництва металу	Dominant Country IA	IA7
Поширеність металу в земній корі	Abundance AI	IA8
Рівень вторинного перероблення металу	Recycling AI	IA9
Наявність заміників сировини	Sustainable AI	IA10

спільного виробництва металів, що особливо властиво кольоровим металам.

6. Частина металів оцінюється за докладнішим товарним типом (алюміній через боксити, титан через ільменіт і рутил) або більш інтегральним (неодим у складі групи рідкісноземельних елементів (РЗЕ)).

Базовий сценарій ґрунтується на гіпотезі статистично незалежних чинників оцінювання доступності металу в категоріях імовірності “шансів / успіху”, аналогічно до підходів у нафтовій геології. У додатковому сценарії розроблено компромісний підхід між керованими даними та експертними оцінками. Вплив різних індексів було згруповано за типами ризику – ризик пропозиції, попиту та геополітики. Для оцінки інтегральної ймовірності успіху такої системи “попит-пропозиція” було використано модель нечіткої логіки.

Окрім того, створені на основі динамічного балансу “попит-пропозиція”, моделі оцінки доступності металів передбачають різні інструменти балансування – не тільки збільшення постачання (пошуків, розвідки та видобутку), а і його диверсифікацію, пошук альтернативних технологій (заміна окремих металів іншими металами або матеріалами), вторинне перероблення, а також враховують екологічні аспекти, пов’язані з видобутком, і політичні ризики.

З-поміж інших праць [7, 9] основними джерелами даних для визначення індексів були: статистика USGS [2, 6] щодо обсягу запасів і ресурсів металів станом на 2019 рік та їхнього споживання, дані Британської геологічної служби [1] та звіту Всесвітнього банку [5], що стосувався використання металів у “зелених” енергетичних технологіях і висвітлював прогноз їхнього споживання на 2050 рік. Окрім того, у межах дослідження було вирішено за доцільне спиратися на наведену в згаданому звіті [5] класифікацію корисних копалин. Відповідно до останньої, мінеральну сировину, доступність якої з кожним роком дедалі явніше стає наріжним питанням, може бути розділена на чотири групи:

1. Перша — це група металів, які не дуже широко використовуються в усіх технологіях відновлюваної енергетики, але є ключовими компонентами специфічних технологій, як-от неодим для енергії вітру й титан для геотермальної енергії.

2. Другу групу становлять корисні копалини, попит на які зростатиме в кілька разів, що супроводжуватиметься високими ризиками в постачанні. Це графіт, кобальт і літій, запаси й видобуток яких монополюють зосереджені в одних регіонах, а споживання — в інших. Будь-які потенційні проблеми в забезпеченні цього попиту спричинять зміни у виробництві акумуляторів і можуть вплинути на хімічний тип батареї або навіть сам тип акумуляторів.

3. Третя група містить такі метали, як-от алюміній і залізо, і відповідно є критично важливою саме через широке використання своїх представників; попит на них не залежить від однієї конкретної технології, вони потрібні у величезних кількостях у широкому діапазоні енергетичних технологій. Ці метали менш схильні до нестабільності й ризику постачання, оскільки високий рівень попиту на них не залежатиме від того, який тип енергетичних технологій переважатиме до 2050 року.

4. До четвертої групи металів зараховано ті, виробництво яких навіть без великого збільшення попиту на корисні копалини, дуже впливатиме на перехід до “зеленої” енергетики. Тому постачання таких металів, як нікель, мідь, хром, манган тощо, вважатиметься ризикованим через їхнє широке використання в інших традиційних галузях.

Для оцінення запропонованого індексу було використано такий двоступеневий підхід:

1) ранжування корисних копалин за найбільш значущими чинниками та визначення індексу доступності окремих металів за кожним з індексів (табл. 2);

2) моделювання інтегрального індексу доступності за різними сценаріями в системі “попит-постачання” (табл. 3).

На першому етапі було визначено й зібрано дані найбільш значущих атрибутів, пов’язаних з вибраним параметром. Наприклад, для Reserves IA є запаси (у тис. тонн), річний видобуток шахт у 2019 році та прогноз видобутку на 2050 р., а також чинник виснаження за оцінкою USGS. На основі цих даних розраховано період наявності резервів (у роках) і той самий період з корекцією зростання попиту на 2050 рік. Як показано на рис. 1, є два кластери металів, де більшість із них демонструють лінійну тенденцію низьких змін у доступності, але три з них (літій, графіт і ванадій) мають істотно скорочену доступність, ніж натеper.

Абсолютне значення періоду доступності було перетворено на індекс доступності за допомогою лінійного перетворення, що діє як нормалізація в пояснених вище межах 0,5–1,0. Для індексів № 1–4 (Demand IA, Relative Demand IA, Technology IA, Emission IA) та № 7 (Dominant Country IA) було використано перетворення (1):

$$I_{availability}^k = \frac{1 - (x_k - x_{min})}{2 \cdot (x_{max} - x_{min})}, \quad (1)$$

де x – вибраний атрибут для описування параметра; індекси k , min , max відповідають поточному, мінімальному й максимальному значенням вибраного параметра серед усіх металів.

Таблиця 2. Загальний індекс доступності за корисними копалинами

Корисна копалина	Індекс доступності							Загальний індекс доступності
	1	2	3	4	5	6	7	
Алюміній	0,63	0,99	0,72	0,89	0,83	1,00	0,64	0,21
Хром	0,98	1,00	0,61	1,00	0,52	0,67	0,84	0,17
Кобальт	0,96	0,53	0,83	0,99	0,50	1,00	0,50	0,11
Мідь	0,91	0,99	0,50	0,99	0,66	1,00	0,95	0,28
Графіт	0,70	0,50	1,00	0,95	0,69	1,00	0,56	0,13
Індій	1,00	0,77	0,94	1,00	1,00	0,83	0,89	0,54
Залізо	0,50	1,00	0,94	0,50	0,80	1,00	0,83	0,16
Свинець	0,95	0,98	0,78	1,00	0,54	1,00	0,74	0,29
Літій	0,97	0,51	1,00	1,00	0,64	0,67	0,66	0,14
Манган	0,95	1,00	0,67	1,00	0,66	1,00	0,94	0,39
Молібден	1,00	0,99	0,61	1,00	0,74	0,92	0,77	0,31
Неодим	1,00	0,96	1,00	1,00	1,00	0,67	0,53	0,34
Нікель	0,85	0,90	0,56	0,97	0,54	0,92	0,93	0,19
Срібло	1,00	0,94	0,89	0,99	0,52	1,00	1,00	0,43
Титан	1,00	1,00	0,72	1,00	1,00	1,00	0,96	0,69
Ванадій	0,99	0,81	0,89	0,99	0,98	0,50	0,66	0,23
Цинк	1,00	1,00	0,78	0,99	0,55	1,00	0,89	0,38

Таблиця 3. Зіставлення результатів для Сценарію-1 та Сценарію-2 (семифакторна модель)

Корисна копалина	Сценарій-2 $\gamma = 0,1$	Сценарій-2 $\gamma = 0,9$	Сценарій-2 (різниця)	Загальний індекс доступності (Сценарій-1)	Різниця між Сценарієм-2 ($\gamma = 0,1$) та Сценарієм-1
Алюміній	0,37	0,77	0,41	0,21	0,16
Хром	0,20	0,63	0,42	0,17	0,03
Кобальт	0,23	0,73	0,50	0,11	0,12
Мідь	0,34	0,73	0,40	0,28	0,06
Графіт	0,29	0,72	0,43	0,13	0,16
Індій	0,73	0,95	0,23	0,54	0,19
Залізо	0,35	0,86	0,51	0,16	0,19
Свинець	0,34	0,77	0,43	0,29	0,05
Літій	0,31	0,86	0,55	0,14	0,17
Манган	0,44	0,81	0,37	0,39	0,05
Молибден	0,35	0,74	0,39	0,31	0,03
Неодим	0,39	0,90	0,51	0,34	0,05
Нікель	0,25	0,64	0,39	0,19	0,06
Срібло	0,49	0,88	0,39	0,43	0,06
Титан	0,72	0,95	0,24	0,69	0,03
Ванадій	0,32	0,82	0,50	0,23	0,09
Цинк	0,41	0,81	0,40	0,38	0,03

Для визначення індексів доступності № 5–6 (Reserves IA і Diverse Country IA) та № 8 (Abundancy IA) передбачалося: що нижчий розрахований показник, то більші ризики в доступності ресурсу. Тут використано рівняння лінійного перетворення:

$$I_{availability}^k = \frac{0.5 + (x_k - x_{min})}{2 \cdot (x_{max} - x_{min})}, \quad (2)$$

де позначення у формулі такі самі, як у (1).

Для показника № 9 (Recycling IA) та № 10 (Sustainability IA) попередньо було проведено перетворення з дискретного типу в неперервний і застосовано формули (2) та (1) відповідно.

Для розрахунку інтегральної оцінки визначених індексів доступності було використано два базові сценарії: повністю незалежні змінні та частково залежні змінні.

Періоди доступності запасів металів розраховано з огляду на поточний і прогнозований попит. Ці періоди для Ni та St становлять відповідно 13 і 17 років, що менше, ніж оптимальний строк роботи одного великого гірничодобувного об'єкта. Зважаючи на те, що виведення нового об'єкта на заплановані проектні потужності триває від чотирьох до семи років, група корисних копалин (кобальт, хром, срібло цинк, свинець, нікель) з тривалістю періоду доступності менш як 20 років є найризикованішою. Критична потреба в таких металах, як залізо, мідь, алюміній, пов'язана з величезними обсягами використання їх в інших традиційних галузях промисловості, але для заліза найкритичнішим чинником є виснаження високоякісних руд.

Титан та індій мають найвищі показники доступності. Перший – завдяки незначному зростанню попиту, достатній кількості ресурсів, а також легким процесам видобутку й перероблення. Водночас результати розрахунків щодо індію можна вважати не досить точними. Це зумовлено тим, що найчастіше індій отримують зі сфалериту цинк-сульфідної руди, проте у вихідних матеріалах дослідження немає систематичних даних про запаси індію та його видобуток.

У сценарії-2 використано компромісний підхід між моделями, зумовленими даними та експертною оцінкою. Вплив різних індексів можна згрупувати за типами ризику (ризик пропозиції, ризик попиту, технологічні ризики, ризики захисту довкілля та ризик геополітики). Відносини між групами було оцінено як імовірно слабші, ніж у групах. Для оцінки інтегральної ймовірності успіху системи “попит-пропозиція”, було використано модель нечіткої логіки й розроблено триетапну модель, що містить групування параметрів за допомогою операторів нечіткої логіки.

Основна ідея оцінювання, здійсненого на основі такого підходу, – показати низку потенційних змін у балансі між попитом і постачанням. Є багато чинників, які можуть суттєво змінити наявний глобальний баланс, зокрема: світова пандемія COVID-19, що спричинила скорочення виробництва у більшості споживачів металів; політичні чинники; темпи переходу на відновні джерела енергії в кожному регіоні, що зумовлені розподілом природних, особливо кліматичних ресурсів, та інші. Окремо

варто зазначити наявність альтернативи у вигляді ядерної енергетики. Це лише одна галузь, де чималі шанси, що науковий прогрес (наприклад, малі ядерні (уранові чи торієві) реактори, натрієві реактори тощо) можливий і реалістичний у прогнозований період. Це може змінити розвиток технологій і відповідно гірничу галузь у всьому світі.

Рис. 1. Діаграма розсіювання періодів наявності запасів металу (з корекцією і без) для прогнозованого зростання попиту на період до 2050 р.

Рис. 2. Результати порівняння 10-факторної моделі для Сценарію-2 з даними Всесвітнього банку. Нечітку модель наведено для гамма $\gamma = 0,1$

Набір нечітких моделей загалом засвідчує, що система постачання є найважливішою для успіху. Модель з гаммою $\gamma = 0,1$ (рис. 2) показує аналогічну оцінку, як у сценарії-1, але дещо оптимістичнішу щодо заліза, алюмінію, літію, графіту та індію.

Модель переважання ризику попиту з гаммою $\gamma = 0,9$ показує найпозитивнішу оцінку успіху (усі бали перевищують 0,6). Але варто зауважити, що хром і нікель мають найнижчі показники через участь у великій кількості технологій у поєднанні з порівняно ризикованою пропозицією. Мідь, молибден і манган можуть компенсувати високі ризики попиту достатньою пропозицією. Зміни в галузі попиту й постачання з будь-якої причини впливатимуть на різні метали по-різному. Найнестабільніша група відповідно до цієї оцінки складається з кобальту, літію, РЗЕ і чорних металів (заліза та ванадію).

Висновки. За результатами проведеного ранжування металів і визначення індексу доступності кожного з них разом було класифіковано 17 металів, які є критично важливими для переходу до “зеленої” енергетики. Їхній вплив нерівнозначний. Деякі метали мають вирішальне значення, утім лише для однієї технології (графіт в акумуляторах і неодим у вітрогенераторах), але мідь і залізо, які використовуються в усіх перерахованих раніше технологій і галузей, – найважливіші елементи для втілення низьковуглецевого майбутнього.

Сценарійний підхід ілюстративно підтвердив, що перший запропонований варіант більш консервативний і втілює статистичну модель, зумовлену даними, за допомогою найнижчого рівня ймовірності успіху. А сценарій-2, що являє собою гнучкішу комбінацію підходів, здатний розширювати наше уявлення щодо корелятивних співвідношень впливів різних індексів із типами ризику.

ЛІТЕРАТУРА

1. Brown, Stephen P. A., Wolk D. Natural resource scarcity and technological change//Economic and Financial Policy Review. – Federal Reserve Bank of Dallas, 2000. – Q1. – 2–13. Available at: <http://www.dallasfed.org/assets/documents/research/efr/2000/efr0001a.pdf> (accessed on 10 December 2020).
2. Community-Based Environmental Protection: A Resource Book for Protecting Ecosystems and Communities July 1997//Office of Sustainable Ecosystems and Communities, Office of Policy, Planning and Evaluation, USEPA, Washington, DC, 1997.

tainable Ecosystems and Communities, Office of Policy, Planning and Evaluation, USEPA, Washington, DC, 1997.

3. Davis J. C. Estimation of the probability of success in petroleum exploration//Mathematical Geology. – 1977. – No 9. – P. 409–427. DOI: Available at: <https://doi.org/10.1007/BF02047411>

4. European Commission (2011) Tackling the Challenges in Commodity Markets and on Raw Materials. Brussels, COM, 25 final.

5. Hund K., La Porta D., Fabregas T. P., Laing T., Drexhage J. Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition//International Bank for Reconstruction and Development. – The World Bank, 2020. Available at: http://www.eqmagpro.com/wp-content/uploads/2020/05/MineralsforClimateActionTheMineralIntensityoftheCleanEnergyTransition_compressed-1-18.pdf

6. National Minerals Information Center. Available at: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/historical-statistics>

7. TIBCO Data Science platform. Available at: <http://www.statsoft.com/textbook/stathome.html>

8. United States Geological Survey. Retrieved November 18, 2021 from: <https://www.usgs.gov>

9. US EPA 1996: Guidelines for Ecological Risk Assessment. EPA/630/R-95/002B. EPA. Washington, DC, 1996.

10. Virshylo I., Kurylo M. The implication of fuzzy sets for energy transition critical minerals modeling of World demand-supply projection//Conference: Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. – 2021. [21102].

REFERENCES

1. Brown, Stephen P. A., Wolk D. Natural resource scarcity and technological change//Economic and Financial Policy Review. – Federal Reserve Bank of Dallas, 2000. – Q1. – 2–13. Available at: <http://www.dallasfed.org/assets/documents/research/efr/2000/efr0001a.pdf> (accessed on 10 December 2020).
2. Community-Based Environmental Protection: A Resource Book for Protecting Ecosystems and Communities July 1997//Office of Sustainable Ecosystems and Communities, Office of Policy, Planning and Evaluation, USEPA, Washington, DC, 1997.
3. Davis J. C. Estimation of the probability of success in petroleum exploration//Mathematical Geology. – 1977. – No 9. – P. 409–427. DOI: Available at: <https://doi.org/10.1007/BF02047411>
4. European Commission (2011) Tackling the Challenges in Commodity Markets and on Raw Materials. Brussels, COM, 25 final.
5. Hund K., La Porta D., Fabregas T. P., Laing T., Drexhage J. Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition//International Bank for Reconstruction and Development. – The World Bank, 2020. Available at: http://www.eqmagpro.com/wp-content/uploads/2020/05/MineralsforClimateActionTheMineralIntensityoftheCleanEnergyTransition_compressed-1-18.pdf
6. National Minerals Information Center. Available at: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/historical-statistics>
7. TIBCO Data Science platform. Available at: <http://www.statsoft.com/textbook/stathome.html>
8. United States Geological Survey. Retrieved November 18, 2021 from: <https://www.usgs.gov>
9. US EPA 1996: Guidelines for Ecological Risk Assessment. EPA/630/R-95/002B. EPA. Washington, DC, 1996.
10. Virshylo I., Kurylo M. The implication of fuzzy sets for energy transition critical minerals modeling of World demand-supply projection//Conference: Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. – 2021. [21102].

Р у к о п и с о т р и м а н о 11.12.2021.