

**Ольга Ярославівна КОВАЛЬЧУК**

кандидат фізико-математичних наук,  
доцент,  
кафедра економіко-математичних методів,  
Тернопільський національний економічний університет  
E-mail: olhakov@gmail.com

**Наталія Євгенівна СТРЕЛЬБИЦЬКА**

кандидат економічних наук,  
доцент,  
кафедра міжнародних економічних відносин,  
Тернопільський національний економічний університет  
E-mail: nataliya.strelbitska@gmail.com

**МОДЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ КРАЇН СВІТУ**

Ковальчук, О. Я. Модельний аналіз показників сталого розвитку країн світу / Ольга Ярославівна Ковальчук, Наталія Євгенівна Стрельбіцька // Економічний аналіз: зб. наук. праць / Тернопільський національний економічний університет; редкол.: О. В. Ярощук (голов. ред.) та ін. – Тернопіль: Видавничо-поліграфічний центр Тернопільського національного економічного університету «Економічна думка», 2018. – Том 28. – № 1. – С. 71-78. – ISSN 1993-0259.

**Анотація**

*У статті розглянуто можливості застосування класичних інструментів аналітичних методів та методів інтелектуального аналізу даних для моделювання глобального сталого розвитку. Для розподілу країн світу на групи за показниками, які традиційно виділяють для вивчення сталого розвитку, проведено кластерний аналіз методом k-середніх, у результаті якого виділено 2 кластери. До першого кластеру увійшли економічно розвинені індустріальні країни, які характеризуються високим рівнем соціальних показників і низьким рівнем нерівності можливостей. Водночас у цих країнах високий індекс корупції та низький індекс Джині. Для країн другого кластеру притаманні низькі соціальні стандарти, проте значно нижчий рівень корупції та значення екологічного сліду, ніж у розвинених країнах. Однак втретє більший індекс нерівних можливостей, ніж у країнах, що увійшли до першого кластеру. До цього кластеру належать здебільшого країни з невисоким соціально-економічним розвитком та країни, що розвиваються. Для перевірки отриманих результатів виконано класифікацію країн світу за основними вимірами сталого розвитку. Побудовано граф дерева класифікації країн світу за вимірниками сталого розвитку. Комп'ютерні моделі, запропоновані у роботі, спрямовані на вирішення основних проблем сталого розвитку, однак є застосовними в багатьох інших сферах, разом із міжнародними відносинами, економікою та системами управління.*

**Ключові слова:** сталий розвиток; математичне моделювання; кластеризація; інтелектуальний аналіз даних; класифікація.

---

**Olha Yaroslavivna KOVALCHUK**

PhD in Physics and Mathematics,  
Associate Professor,  
Department of Economic and Mathematical Methods,  
Ternopil National Economic University  
E-mail: olhakov@gmail.com

**Nataliia Yevgenivna STRELBITSKA**

PhD in Economics,  
Associate Professor,  
Department of International Economic Relations  
Ternopil National Economic University, Ukraine  
E-mail: nataliya.strelbitska@gmail.com

**MODEL ANALYSIS OF INDICATORS OF  
SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF WORLD COUNTRIES****Abstract**

*The article discusses the possibilities of use of classical instruments of analytical methods and data mining methods for global sustainability modelling. To divide countries into groups according to the indicators that are traditionally allocated for sustainability studying, it is carried out the cluster analysis by k-medium method, which resulted in 2 clusters. The first cluster includes economically developed industrialized countries. A high level of social performance and a low level of inequality of outcomes characterize them. At the same time, these countries have high rank of corruption and low Gini Index. There are low social standards, but significantly lower rank of corruption and footprint than in developed countries in the countries of the second cluster. However, the index of inequality of outcomes is three times higher than in the countries included in the first cluster. The tree graph classification of the countries of the world has been constructed on the basis of indicators of sustainable development. The computer models, which are presented in this paper, aim to solve the main problems of sustainable development. They can also be applicable in many other fields, including international relations, economics, and management systems.*

**Keywords:** sustainable development; mathematical modelling; clustering; data mining; classification.

**JEL classification:** C38, C63, C83, O15

---

**Вступ**

Основним питанням у вивченні проблем сталого розвитку є розробка стратегій, які б надали можливість уникнути екологічної та соціальної катастроф. Дослідження проблем сталого розвитку проводились протягом не одного десятиліття. Однак попередній аналіз мав тенденцію використовувати «м'які» підходи, які не потребують використання інструментів аналітичних, математичних або обчислювальних методів. Проте складність та інтерактивність отримання розв'язків багатьох взаємопов'язаних проблем сталого розвитку, які можуть бути використані при розробці компромісів та підтримці прийняття рішень у складних, невизначених умовах, потребують неодмінного застосування апарату математичних та обчислювальних методів.

Зокрема моделювання сталого розвитку у різні роки знаходимо у працях таких дослідників, як М. Дж. Ремейер [1], В. Меллор, Р. Кліфт [2], П. Буланже, Брекет [3], М. Кіссінджер, В. Рейс [4], С. Фауче, Д. Пірс, Дж. Пропс [5], В. Тодоров, Д. Марінова [6] та багато інших науковців.

Хоча сталий розвиток може здаватися цілком нормативним процесом, на сьогодні серед науковців немає консенсусу щодо характеру та швидкості необхідних дій у цьому напрямку. Окрім того, існують суперечності щодо різних інтересів, які можуть бути порушені. Багато рішень, необхідних для забезпечення сталого розвитку, такі, як зменшення викидів вуглекислого газу, вимагають високого рівня глобального консенсусу, який може бути сформований лише на основі строгих наукових фактів (знань). Вирішальне значення для отримання фактів мають саме математичні методи.

**Мета статті**

Метою статті є використання різних методик моделювання для вирішення задач сталого розвитку, аналізу й прогнозування його основних вимірників для отримання достовірних і надійних результатів. Побудувати ідеальну модель неможливо, тому важливо чітко враховувати невизначеність різних модельних компонент. Особливо це стосується моделей, що описують складні екологічні та

---

соціальні системи, де часто доступна лише якісна та неточна інформація. Розроблені моделі можуть надати дуже важливу та корисну інформацію для соціальних інституцій та політиків.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Основними вимірниками, що визначають сталий розвиток, традиційно є соціальна, економічна та екологічна сфери. Невідомою є лише математична функція, яку потрібно використати в моделі. Вона повинна бути найбільш правдоподібною та інструктивною. Для дослідження основних взаємних залежностей традиційних індикаторів сталого розвитку використано низку аналітичних, математичних та обчислювальних методів [7, с.141]. Модельний аналіз проведено за офіційними даними за 2016 р. наступних найбільш поширених показників сталого розвитку для 218 країн світу: Індекс людського розвитку (ІЛР) та його складові (очікувана тривалість життя при народженні, очікувана тривалість навчання дітей шкільного віку, середня тривалість навчання дорослих, ВВП на душу населення); Індекс Джині; Індекс тероризму; Індекс корупції; Індекс торгівлі; доступність і якість транспортної інфраструктури; наявність і використання інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ); Індекс соціального прогресу; доступність знань; охорона здоров'я; особиста свобода і свобода вибору; толерантність; Індекс глобальної конкурентоспроможності; Індекс економічної свободи; Глобальний Індекс нерівності; кількість населення; міграція; рейтинг країн за Індексом щасливої планети; Індекс щасливої планети; благополуччя; роки щасливого життя; екологічний слід; нерівність можливостей; очікувана тривалість життя з урахуванням нерівності; благополуччя з урахуванням нерівності; Індекс щасливої планети [8-16].

На сьогодні ще не існує уніфікованого набору загально визнаних індикаторів та досконалої методики кількісного оцінювання сталого розвитку. Окрім того, суттєвою проблемою є відсутність достовірних оцінок окремих показників для ряду країн. Тому для проведення якісного аналізу доцільно використовувати різні математичні методи аналізу та зіставляти отримані результати.

*Кластеризація країн світу за основними вимірами сталого розвитку.* Для розподілу країн світу на групи за показниками, які традиційно виділяють для вивчення сталого розвитку, проведено кластерний аналіз методом *k*-середніх, у результаті якого виділено 2 кластери (рис. 1).

Members of Cluster Number 1		Members of Cluster Number 2	
	Distance		Distance
AUS	3838,84	ISR	3586,31
AUT	280,63	ITA	3154,58
BEL	1046,65	JPN	631,35
CAN	660,46	NLD	35,41
CYP	4428,66	NZL	2160,84
DNK	1704,71	NOR	11070,19
FIN	474,23	ESP	4475,56
FRA	1874,33	SWE	1597,68
DEU	1200,16	CHE	7156,89
USL	1147,29	GBR	1779,21
IRL	141,43	USA	387,36
		ALB	476,239
		DZA	191,192
		ARG	1679,278
		ARM	621,415
		BGD	1198,552
		BEN	1209,448
		BOL	817,771
		BIH	423,369
		DWA	97,523
		BRA	1210,231
		KHM	1180,002
		CMR	1121,186
		TCD	1174,363
		CHL	1870,324
		CHN	46,331
		COL	299,498
		CRI	693,500
		CIV	1108,628
		HRV	1440,273
		CZE	2805,826
		ECU	166,102
		EGY	693,907
		SVN	3410,677
		ZAF	237,141
		LKA	667,256
		TJK	1176,581
		TZA	1205,163
		THA	120,080
		TUN	488,807
		TUR	888,076
		UGA	1241,848
		UKR	559,828
		URY	1843,677

**Рис. 1. Розподіл країн за кластерами (фрагмент результатів)**

До першого кластеру увійшли економічно розвинені індустріальні країни, такі, як Австралія, Австрія, Бельгія, Канада, Фінляндія, Данія, Франція, Швеція, Китай, США тощо. Вони характеризуються високим рівнем ІЛР (середнє для кластеру 0,9), ВВП (у середньому 49640 дол./особу) та інших соціальних показників і низьким рівнем нерівності можливостей (у середньому 8,18). Водночас час у цих країнах високий індекс корупції (середнє значення для кластеру 77) та низький індекс Джині (30,74 в середньому для країн цього кластеру).

Для країн другого кластеру притаманні низькі соціальні стандарти: найнижчий серед усіх країн світу рівень освіченості, низькі індекси соціального прогресу, ІЛР, ІКТ, толерантності, економічної свободи, і водночас значно нижчий рівень корупції та екологічний слід, ніж у розвинених країнах. Однак утричі більший індекс нерівних можливостей, ніж у країнах, що увійшли до першого кластеру (рис. 2). До цього кластеру належать здебільшого країни з невисоким рівнем соціально-економічного розвитку та країни, що розвиваються. Серед них Албанія, Аргентина, Болівія, Бразилія, Румунія, Словенія, Словаччина, Україна та інші (рис. 1).

Variable	Cluster Means (data)	
	Cluster No. 1	Cluster No. 2
<b>HDI</b>	<b>0,90</b>	0,680
Happy Life Years	51,41	27,466
Footprint	5,94	2,644
Inequality of Outcomes	8,18	24,597
Inequality-adjusted Life Expectancy	78,12	58,888
Inequality-adjusted Wellbeing	6,73	4,719
Happy Planet Index	29,76	27,166
GDP/capita (\$PPP)	49640,23	6480,597
Expected years of schooling	23,66	12,849
Mean years of schooling	11,88	7,922
Gini Index	30,74	39,585
Corruption	77,00	39,312
Enabling Trade Index	5,31	4,163
Transport infrastructure	5,04	3,259
ICT	6,07	4,059
Social Progress Index	86,64	64,430
Access to Basic Knowledge	97,95	83,770
Health and Wellness	72,11	60,564
Personal Freedom and Choice	83,63	60,168
Tolerance and Inclusion	72,61	48,375
Global Competitiveness Index	5,19	4,010
Economic freedom	73,13	59,748

Рис. 2. Таблиця середніх для кластерів (фрагмент результатів)

*Методи інтелектуального аналізу даних: класифікація*

Дерева класифікації – метод Data Miner, що дає можливість передбачати приналежність спостережень або об'єктів до одного з класів категоріальної залежної змінної залежно від відповідних значень однієї або декількох незалежних змінних (предикторів). Аналіз дерев класифікації – один з найбільш важливих методів, які використовують при проведенні розвідувального аналізу даних.

Як метод розвідувального аналізу або як останній засіб, коли не можливо застосувати жоден з відомих традиційних методів, дерева класифікації є незамінними. Використання дерев класифікації є корисним у тих випадках, коли предикати якісно розрізняються між собою і несуть істотно різну інформативність для класифікації об'єктів, як у нашому випадку.

Цей метод використано для класифікації країн світу за раніше визначеними для дослідження показниками сталого розвитку. Результати проведеної класифікації наведено у вигляді структури дерева, яке розгалужується на ліву та праву гілки, що містять по дев'ять вузлів (рис. 3).

Node #	Left branch	Right branch	Size of node	N in class very high	N in class high	N in class medium	N in class low	Selected category	Split variable	Split constant
1	2	3	102	35	31	18	18	very high	Social Progress Index	74,2
2	4	5	66	1	29	18	18	high	Social Progress Index	58,1
4	6	7	20	0	0	2	18	low	Inequality of Outcomes	30,5
6			3	0	0	2	1	medium		
7			17	0	0	0	17	low		
5	8	9	46	1	29	16	0	high	Inequality-adjusted Life Expectancy	62,8
8	10	11	19	0	4	15	0	medium	Expected years of schooling	13,8
10	12	13	16	0	1	15	0	medium	Health and Wellness	69,2
12			15	0	0	15	0	medium		
13			1	0	1	0	0	high		
11			3	0	3	0	0	high		
9	14	15	27	1	25	1	0	high	Inequality of Outcomes	24,5
14	16	17	26	1	25	0	0	high	Personal Freedom and Choice	45,5
16			1	1	0	0	0	very high		
17			25	0	25	0	0	high		
15			1	0	0	1	0	medium		
3	18	19	36	34	2	0	0	very high	Transport infrastructure	3,3
18			2	0	2	0	0	high		
19			34	34	0	0	0	very high		

Рис. 3. Структура дерева класифікації

Ліва вершина містить 2-й, 4-й, 6-й, 8-й, 10-й, 12-й, 14-й, 16-й та 18-й вузли, права – 3-й, 5-й, 7-й, 9-й, 11-й, 13-й, 15-й, 17-й та 19-й. З першого рядка таблиці (рис. 3) є очевидним, що в першій вершині кількість країн світу з низькими стандартами життя – 18, з середніми – 18, з високими – 31 і 35 країн класифіковані як такі, в яких найвищий рівень стандартів життя. З вершини 1 виходять дві гілки (права та ліва) з вершинами 2 та 3 відповідно.

Умова поділу країн за вершинами 2 та 3 така: якщо значення Індексу соціального прогресу більше 74,2, то стандарти життя дуже високі. Серед досліджуваних країн світу 36 з найвищими стандартами життя, 66 – з високими.

Для 66 країн світу, значення Індексу соціального прогресу яких класифіковано як високі (вершина 2), проводиться розподіл за вершинами 4 та 5: якщо значення Індексу соціального прогресу менше або рівне 58,09, то стандарти життя у країні визначаються як низькі. 20 країн класифіковано як країни з низькими стандартами життя, 46 країн віднесено до категорії держав з високими стандартами життя.

За вершинами 6 та 7 країни розподіляються таким чином: якщо значення показника нерівних можливостей менше або дорівнює 30,5, то стандарти життя визначаються як середні. 3 країни світу класифіковано як країни з середніми стандартами життя, 17 – з низькими.

Для 46 країн світу, значення Індексу соціального прогресу яких більше 58,09 (вершина 5), проводиться розподіл за вершинами 8 та 9 за таким правилом: якщо очікувана тривалість життя з урахуванням нерівності менша або рівна 62,8 року, то стандарти життя у країні визначаються як середні, в іншому випадку – як високі. 190 країн класифіковано як країни з середніми стандартами життя, 27 країн віднесено до класу країн з високими стандартами життя.

Правило розподілу об'єктів за вершинами 10 та 11 (для країн зі значенням очікуваної тривалості життя з урахуванням нерівності, меншої або рівної 62,8 року): якщо значення очікуваної тривалості навчання дітей шкільного віку менше або дорівнює 13,8 року, то стандарти життя визначаються як середні. Виявлено 10 країн з середніми стандартами життя, 11 – з високими.

За вершинами 12 та 13 країни розподіляються таким чином: якщо значення показника охорони здоров'я менше або дорівнює 69,19, то стандарти життя середні. 15 країн світу класифіковано як країни з середніми стандартами життя, 1 – з низькими.

Умова розділення країн за вершинами 10 та 11 (для країн зі значенням очікуваної тривалості життя з урахуванням нерівності, більшим 62,8 року): якщо значення показника нерівності можливостей менше або дорівнює 24,5, то стандарти життя визначаються як високі, в протилежному випадку – як середні. 26 країн з високими стандартами життя, 11 – з середніми.

За вершинами 16 та 17 3 країни розподілено за таким правилом: якщо значення показника особистої свободи та свободи вибору менше або дорівнює 45,46, то стандарти життя найвищі. 1 країна світу віднесена до категорії країн з найвищими стандартами життя, 25 – з високими.

Для 36 країн світу, значення Індексу соціального прогресу яких класифікуються як дуже високі (вершина 3), розподіл за вершинами 18 та 19 проводиться таким чином: якщо значення доступності та якості транспортної інфраструктури більше 3,2, то стандарти життя у країні визначаються як найвищі. У результаті проведеного аналізу у цій категорії виявились 34 країни з дуже високими стандартами життя та 2 країни з високими.

У результаті проведеної класифікації неправильно класифікованим виявився лише один об'єкт, який належить до групи країн з низькими стандартами життя, а опинився у групі з середніми стандартами (рис. 4, 5).

	Observed very high	Observed high	Observed medium	Observed low
Predicted very high	35,00000			
Predicted high		31,00000		
Predicted medium			18,00000	1,00000
Predicted low				17,00000

Рис. 4. Передбачені та спостережені об'єкти

Інтерпретація результатів значно спрощується за допомогою графа дерева класифікації (рис. 6).

#### Висновки та перспективи подальших розвідок

Проведений модельний аналіз дає підстави зробити висновок, що ІЛР та ВВП на душу населення не спроможні однозначно оцінити реальний рівень сталого розвитку окремої країни, зокрема добробут та якість життя населення. ІЛР значно спрощує поняття «людський розвиток» та «людський потенціал»,

охоплює лише агреговану, усереднену оцінку людського прогресу в окремо взятому регіоні. Він не відображає істинного стану нерівності, бідності, безпеки людей у різних країнах світу, розширення прав і свобод, можливостей самореалізації тощо.

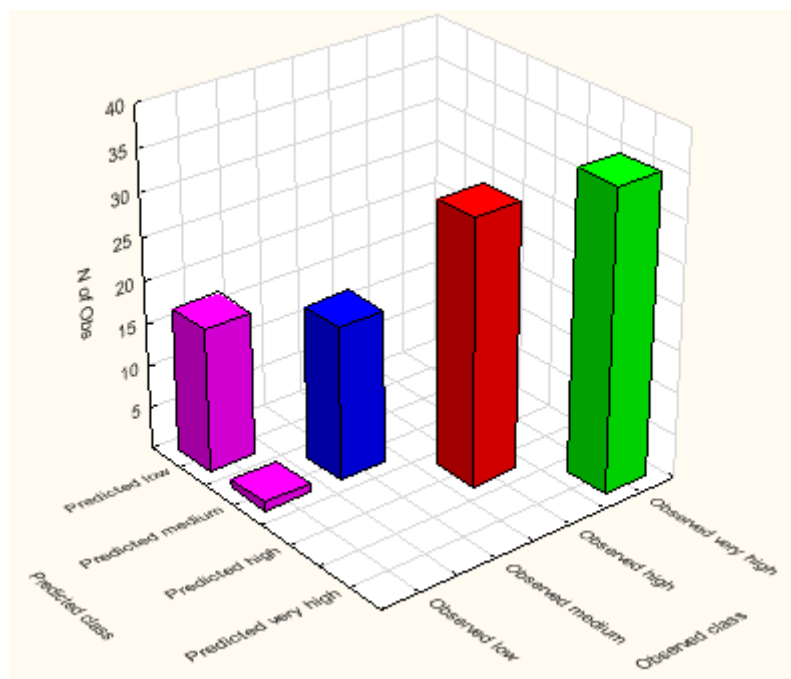


Рис. 5. 3-D діаграма матриці класифікації

Є дискусійним і саме поняття «розвиток», оскільки важко визначити його основні пріоритети. Для розвинених та багатих країн це поняття ототожнюється з важливістю захисту навколишнього середовища, тоді як країни, що розвиваються, підкреслюють необхідність базового людського та економічного розвитку. Основне питання математичного моделювання полягає в тому, як виміряти розвиток. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є перегляд існуючих показників розвитку, таких, як Індекс людського розвитку ООН або ВВП як міри соціального прогресу. Для визначення індикаторів можуть бути застосовані й інші методи, наприклад, аналіз багатокритеріальних рішень.

### Список літератури

1. Rehmeier, J. Mathematical and Statistical Challenges for Sustainability / J. Rehmeier, M. Cozzens, F. Robert // Report of a Workshop held November. – 2011.
2. Mellor W. A mathematical model and decision-support framework for material recovery, recycling and cascaded use / W. Mellor, E. Wright, R. Clift, A. Azapagic, A. Stevens // Chemical Engineering Science. – 2002. – №57. – P. 4697-4713.
3. Boulanger, P. Models for policymaking in sustainable development: The state of the art and perspectives for research / P. Boulanger, T. Brechet // Ecological Economics. – 2005. – issue 55. – P. 337-350.
4. Kissinger, M. An interregional ecological approach for modeling sustainability in a globalizing world – reviewing existing approaches and emerging directions / M. Kissinger, W. Rees // Ecological Modelling. – 2010. – vol. 221 – issue. – P. 2615-2623.
5. Faucheux, S. Models of Sustainable Development / S. Faucheux, D. Pearce, J. Proops. – Brookfield: Edward Elgar, 1996. – 384 p.
6. Todorov, V. Modelling sustainability / V. Todorov, D. Marinova // Mathematics and Computers in Simulation. – 2010. – vol. 81. – issue 7. – P. 1397-1408.
7. Ковальчук, О. Я. Математичне моделювання сталого розвитку [монографія] / О. Я. Ковальчук. – Тернопіль: ТНЕУ, 2017. – 245 с.
8. Human Development Reports 2016 [Електронний ресурс]: за даними United Nations Development Programme. – Режим доступу: <http://hdr.undp.org/en>.
9. Index of economic freedom 2016 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: Retrieved from: <http://www.heritage.org/>.
10. Current World Population 2016. – Режим доступу: <http://www.worldometers.info>.
11. GINI index (World Bank estimate). Country Ranking 2016 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.indexmundi.com>.

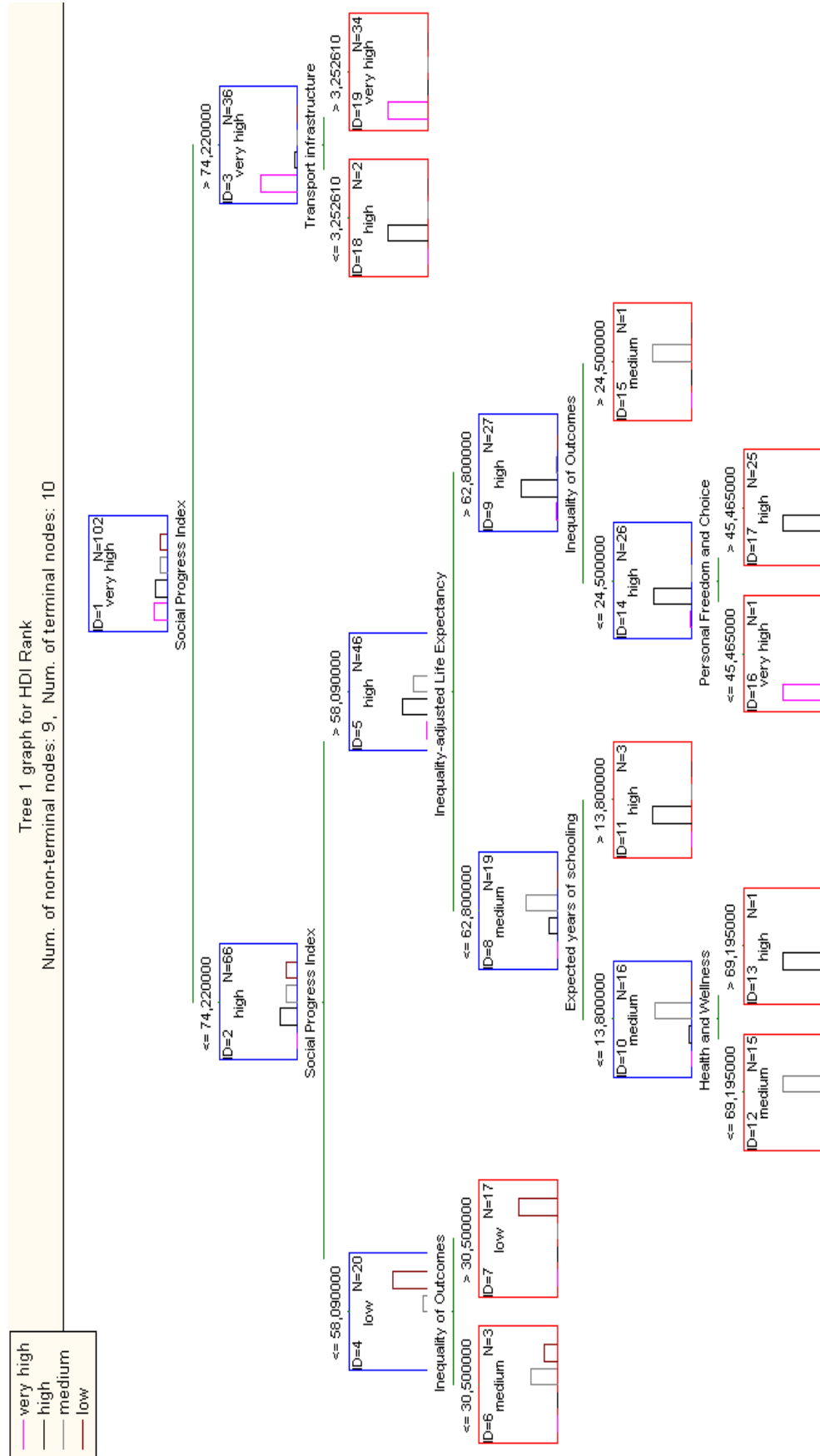


Рис. 6. Дерево класифікації країн світу за вимірниками сталого розвитку

- 
12. SPI Methodological-Report 2016 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.socialprogressimperative.org>.
  13. The Global Enabling Trade Report 2016 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://reports.weforum.org>.
  14. Word bank live [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://live.worldbank.org>.
  15. Which countries are best at converting economic growth into well-being? // World Economic Forum 2016 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.weforum.org>.
  16. Carpenter G. The Global Risks Report 2017 / G. Carpenter [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.weforum.org>.

### **References**

1. Rehmeyer, J. (2011). In Report of a Workshop held November. M. Cozzens & F. Robert (Ed.), *Mathematical and Statistical Challenges for Sustainability*.
2. Mellor, W., Wright, E., Clift, R., Azapagic, A. & Stevens, A. (2002). A mathematical model and decision-support framework for material recovery, recycling and cascaded use. *Chemical Engineering Science*, 57, 4697-4713.
3. Boulanger, P. & Brechet, T. (2005). Models for policymaking in sustainable development: The state of the art and perspectives for research. *Ecological Economics*, 55, 337-350.
4. Kissinger, M. & Rees, W. (2010). An interregional ecological approach for modeling sustainability in a globalizing world – reviewing existing approaches and emerging directions. *Ecological Modelling*, 221(21), 2615-2623.
5. Faucheux, S., Pearce, D. & Proops, J. (Eds). (1996). *Models of Sustainable Development*. Brookfield: Edward Elgar.
6. Todorov, V. & Marinova, D. (2010). Modelling sustainability. *Mathematics and Computers in Simulation*, 81(7), 1397-1408.
7. Kovalchuk, O. (2017). *Mathematical modeling of sustainable development*. Ternopil: TNEU.
8. *Human Development Reports* (2016). United Nations Development Programme. Retrieved from: <http://hdr.undp.org/en>.
9. *Index of economic freedom*. (2016). Retrieved from: <http://www.heritage.org>.
10. Current World Population. (2016). *Worldometers*. Retrieved from: <http://www.worldometers.info>.
11. *GINI index (World Bank estimate). Country Ranking* (2016). Retrieved from: <http://www.indexmundi.com>.
12. *SPI Methodological-Report*. (2016). Retrieved from: <http://www.socialprogressimperative.org>.
13. *The Global Enabling Trade Report*. (2016). Retrieved from: <http://reports.weforum.org>.
14. *Word bank live*. (2016). Retrieved from: <http://live.worldbank.org>.
15. World Economic Forum. (2016). *Which countries are best at converting economic growth into well-being?* Retrieved from: <https://www.weforum.org>.
16. Carpenter, G. *The Global Risks Report* (2017). Retrieved from: <https://www.weforum.org>.

**Стаття надійшла до редакції 02.04.2018 р.**