

6. International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems 10th Revision (ICD-10) Version for 2010 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://icd.who.int/browse10/2010/en#/X>

7. ICD-11 for Mortality and Morbidity Statistics (Version : 04 / 2019) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://icd.who.int/browse11/l-m/en#/http%3a%2f%2fid.who.int%2fcd%2fentity%2f197934298>

8. World Bank: Life expectancy at birth. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.DYN.LE00.IN>

АНОМАЛІЇ ПРИ МОНІТОРИНГУ ЛІСІВ ЗАСОБАМИ ДЗЗ, ЇХ АНАЛІЗ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЇ

Дмитро ПОБЕРЕЖНИЙ

*Національний університет «Києво-Могилянська Академія»,
Київ, Україна*

Рослинний покрив планети, зокрема лісовий, є критично важливим для функціонування екосистем, оскільки вилучає вуглець з атмосфери, насичує її киснем і підтримує стан атмосфери. Лісовий покрив є базовим у переважній більшості екосистемних послуг, а тому його збалансоване використання є основою сталого розвитку громад і суспільства. Разом з тим, ліси є джерелом різноманітних біологічних ресурсів, а їх використання завжди супроводжувалося зловживанням. Такий стан притаманний суспільствам зі слабкою економікою та соціальними проблемами.

Лісистість в Україні становить приблизно 17% території, а відтворення та розширення заліснених площ є процесом повільним і затратним. При цьому в зонах лісів і Лісостепу України практика нелегального лісокористування, зокрема заготівля деревини, все ще є значною, а в сукупності з іншими формами ресурсозаготівлі (такими, як добування бурштину) зловживання в лісовій галузі є серйозною загрозою для екологічного та економічного благополуччя населення не лише цих територій, а й усієї України. Території, укриті лісами, потребують моніторингу й захисту.

Для моніторингу рослинного покриву земної поверхні наразі широко використовуються засоби дистанційного зондування землі (ДЗЗ). Можливості цієї технології для дослідження динаміки лісового покриву, відновлення після пожеж, вітровалів, різноманітної оцінки продуктивності та можливості прогнозування стану й еволюції екосистем складно переоцінити. Для отримання інформації з супутникових знімків послу-

говуються широким спектром параметрів поверхні (зокрема індексів, що характеризують стан і динаміку рослинних угруповань). Такі показники застосовують залежно від конкретних задач.

ДЗЗ дає змогу отримати важливі дані для планів збереження об'єктів природоохоронного фонду України [1]. При моніторингу лісових біотопів дослідники послуговуються вегетаційними індексами – такими, як NDVI, MSR, EVI та ін. При цьому виникають ситуації, коли в зібраних даних зафіксовані аномалії, правильна інтерпретація яких уможливорює точний аналіз ризиків для досліджуваних територій.

Для прикладу, нерідко виникають ситуації, коли дані вегетаційного індексу для супутникових знімків з незначною різницею в часі можуть відрізнитися в кілька разів. При цьому наступна інформація не підтверджує такі зміни. Нерозуміння природи цих явищ може потенційно стати причиною помилкових рішень та спотворених уявлень про стан досліджуваної території.

У цій статті викладені й аналізуються дані, отримані в процесі дослідження лісових масивів Карпатського національного природного парку (НПП) на предмет їх цілісності та еволюції. Об'єкт дослідження – дві ділянки сумарною площею 7,95 квадратного кілометра (перша – 5.3 км², друга – 2.65 км²), розташовані на заході від села Дземброня (Верховинський район Івано-Франківської області). Їхні географічні координати такі: перша ділянка (квадратна форма), північна вершина 48°7'40.59" N 24°38'43.87" E, західна вершина 48°7'9.67" N 24°37'16.80" E, східна вершина – 48°6'22.52" N 24°39'26.48" E, південна вершина – 48°5'50.44" N 24°38'11.06" E. Друга ділянка (неправильної форми), північна вершина 48°5'15.60" N 24°40'58.88" E, західна вершина – 48°4'35.27" N 24°39'13.61" E, східна вершина – 48°4'30.66" N 24°40'55.05" E, південна вершина – 48°3'52.82" N 24°39'56.70" E.

Об'єкти природозаповідного фонду можуть містити природні та антропогенні фактори, які дослідники можуть помилково інтерпретувати як аномалії в отриманих результатах.

Методика дослідження. Векторні маски досліджуваної території створено за допомогою програми Google Earth. Об'єкт аналізу – супутникові знімки сімейства Landsat (5,7,8) [4] та архіву метеоданих [5]. Оскільки обидві метеостанції цього району досліджень не містять архівних даних з червня 2015 по липень 2016 рр. включно, а накопичення даних започатковано в 2006 році, то в дослідженні ми обмежилися даними часового періоду з 2006 по 2014 рр. Територію характеризували за допомогою вегетаційного індексу MSR (*Modified Simple Ratio*). Для розрахунків показників цього індексу використано супутникові знімки зеленої рослинності, яка поглинає електромагнітні хвилі у видимому червоному діапазоні та

відображає їх у ближньому інфрачервоному. Показники розраховано за формулою:

$$MSR = \frac{\left(\frac{NIR}{RED}\right) - 1}{\left(\sqrt{\frac{NIR}{RED}} + 1\right)} \quad (1)$$

де NIR – поглинання світла в інфрачервоному каналі, RED – червоний спектральний канал.

Вегетаційний індекс MSR обрано через меншу чутливість до шумових ефектів (у порівнянні з $NDVI$) [2], меншу залежність від ефектів відкритої земної поверхні та кута інсоляції, збільшену чутливість до фотосинтезуючої активності рослин і кращу контрастність. Супутникові знімки збирали за літні місяці (червень–серпень). Основна причина – єдине вікно вегетації для всіх знімків, доступність даних, а також наявність аномалій, притаманних цьому періодові досліджень. Для обробки супутникових знімків використано програму $QGIS$ версії 2.18.1. Піксель у нашому дослідженні репрезентував 30 м^2 земної поверхні, що достатньо для завдань з екомоніторингу.

Оскільки класифіковані таким чином знімки зустрічаються з однаковим типом аномалій в отриманих графічних та числових результатах, нижче наводимо алгоритм, використаний при обробці супутникових зображень.

1. Розраховується знімок для усіх супутникових знімків у цілому. Застосовується інструмент «растровий калькулятор». Робоча формула:

$$((NIR) / (RED) - 1) / (\text{sqrt}((NIR) / (RED)) + 1) \quad (2)$$

2. Виокремлюємо досліджувану територію з усього знімка за допомогою попередньо зробленої векторної маски цієї території. Ключ дій: *Raster -> Extraction -> Clipper*

Враховано, що при дослідженні відносно невеликих ділянок на них може потрапити тінь від хмар, які на саме вирізане зображення не потраплять. Це є типовою проблемою при компромісних рішеннях для моніторингу великих територій, коли доводиться використовувати сильно захмарені знімки з ділянками без них.

3. Для класифікації знімків використовували 6 класів.

Клас 1 – густа рослинність, суворий критерій. Сюди включено території зрілих лісів із здоровою деревиною.

Клас 2 – територія розрідженої рослинності, або слабкий критерій. Сюди включали розріджений ліс, ліс-молодняк чи ушкоджені старі дерева, чагарники.

Клас 3 – відкрита земля, поля. Звична проблематика – перехідні значення, помилково можуть втрапити чагарники (через ефект затінення

від хмар зменшується показник вегетаційного індексу), часто потрапляють береги річок та озер (вологий ґрунт).

Клас 4 – хмари. Залежно від їх типу і розміру можуть легко переходити в сусідні класи.

Клас 5 – вода. Великі хмари, річки, озера увійдуть у цей клас. Поля з іригацією та великі глибокі калюжі після дощів теж можуть бути видимі в цьому класі. При цьому вологий, болотистий ґрунт не завжди потрапляє в цей клас.

Клас 6 – об'єкти штучного походження, такі як асфальтні дороги, будівлі тощо.

Для уніфікації відображення пропонованої класифікації та кращої візуалізації використано стиль, попередньо збережений в окремому .txt файлі.

На цьому етапі зображення перестане бути фотореалістичним, і ми зустрінемося з рядом аномалій після обробки.

Оскільки важливим є отримання кількісних даних (окрім візуального спостереження просторового розподілу на класифікованих зображеннях), здійснено подальші кроки.

4. Рекласифікація. Необхідний етап для подальшого розрахунку площ тих визначених класів. Здійснено через інструмент «растровий калькулятор», формула для знімків *Landsat 4-7* така:

$$((MSR < -0.408) * 2) + ((MSR \geq -0.408 \text{ and } MSR < 0) * 1) + ((MSR \geq 0 \text{ and } MSR < 0.134) * 0) + ((MSR \geq 0.134 \text{ and } MSR < 1) * 4) + ((MSR \geq 1 \text{ and } MSR < 1.63) * 5) + ((MSR \geq 1.63) * 6) \quad (3)$$

Пікселям із значенням вегетаційного індексу *MSR* у вказаному діапазоні буде присвоєний ідентифікатор: 2 – об'єкт штучного походження, 1 – вода, 0 – хмари, 4 – відкрита земля, 5 – розріджена рослинність, 6 – густа рослинність.

5. Векторизація зображення і створення файлу стилю для візуалізації, як і в пункті 3 з класифікацією.

6. Визначення площі об'єктів. Кожному об'єкту через таблицю атрибутів визначається додаткове поле значень «площа».

7. Збираємо і сумуємо значення площ усіх об'єктів згідно з їх класами та аналізуємо.

Результати та їх обговорення. Усього було відібрано 15 зображень за період 1993–2017 рр. для першої досліджуваної ділянки та 12 зображень за період 2007–2017 рр. для другої ділянки. Також для аналізу характеру аномалій використано архівні дані температури повітря та опадів з метеостанції Ясіня, *WMO ID 33645*.

Рис. 1 та рис. 2 відображають просторовий розподіл і динаміку лісового покриття на обраних ділянках, тоді як рис. 5 і 6 показують зміни в

площі типів рослинного покриття. Загалом ці ділянки природно розвиваються і не демонструють слідів вираженого негативного впливу на них.

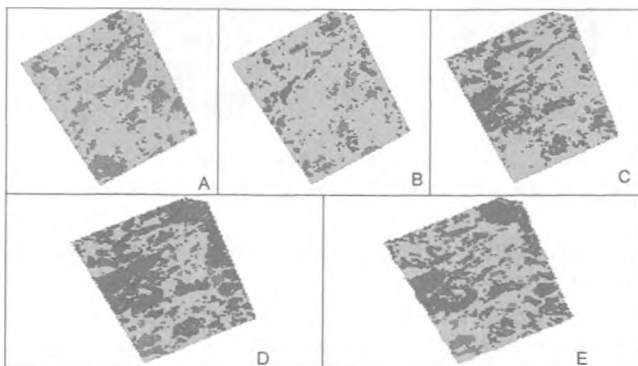


Рис. 1. Динаміка лісового покриття ділянки 1, Карпатський НПП.

Темно-зелений колір означає зрілий ліс, світло-зелений – розріджений або молодий ліс, коричневий – відкрита земля. Знімки зроблено: А) 3 липня 1993 р.; В) 14 липня 2006 р.; С) 6 серпня 2011 р.; D) 11 червня 2014 р.; Е) 3 червня 2017 р.

Щоправда, при аналізі цих даних було виокремлено аномалію, представлену на рисунках 3 та 4. На них кількість відкритого ґрунту (коричневий колір) істотно відрізняється. Також спостерігається перехід від густого до розрідженого лісу згідно з нашою класифікацією.

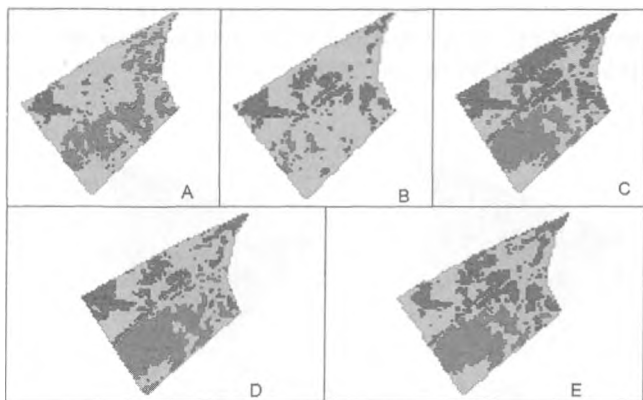


Рис. 2. Динаміка лісового покриття ділянки 2, Карпатський НПП.

Темно-зелений колір означає зрілий ліс, світло-зелений – розріджений або молодий ліс, коричневий – відкрита земля. Знімки зроблено: А) 7 липня 2007 р.; В) 15 липня 2009 р.; С) 11 червня 2014 р.; D) 19 серпня 2016 р.; Е) 3 червня 2017 р.

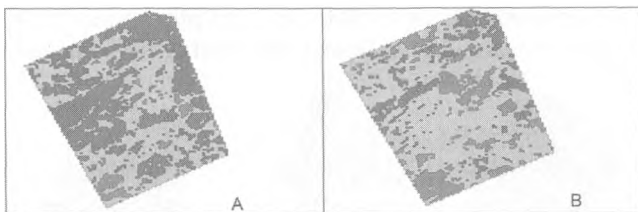


Рис. 3. Приклад аномалії, ділянка 1.

Ліворуч – знімок 11 червня 2014 р., праворуч – 14 серпня 2014 р.

Такі аномалії величин вегетаційного індексу часто можна зустріти після тривалого періоду спеки. Хоча рослини мають природний механізм, що дає змогу уникати критичного перегріву, із часом волога втрачається і листя пересихає. Відповідно сигнал вегетаційного індексу слабшає, що може бути інтерпретовано як порушення лісового покриву (наприклад, вирубування лісу) на цій території. Спеціально представлена серія знімків на рис. 1 та рис. 2 не підтверджує кризову ситуацію, яку можна було б прогнозувати в результаті аналізу знімків рис. 3 та рис. 4. Це яскравий приклад реакції рослинності на спеку, що панувала в Україні влітку 2014 року.

Саме тому слід пам'ятати головні причини, через які ці аномалії виникають у даних. По-перше, температура повітря і загальний рівень опадів за рік. Аналізуючи такі дані (рис. 7 і 8), розуміємо ситуацію на час отримання супутникового зображення. Тривалі періоди високої температури та нестачі вологи природно збільшуватимуть кількість сухої та мертвої деревини, при цьому зростає ризик пожеж, сліди яких також виглядають аномаліями при аналізі.

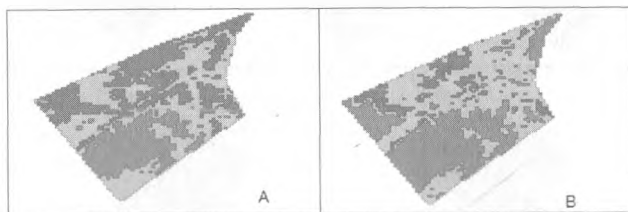


Рис. 4. Приклад аномалії, ділянка 2.

А – знімок 11 червня 2014 р., В – 14 серпня 2014 р.

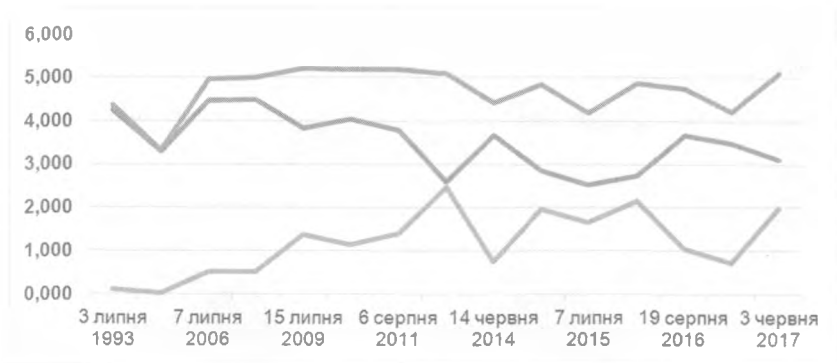


Рис. 5. Динаміка лісового покриття ділянки 1, по осі ординат – площа кластерів, км². Зелений колір – сумарний покриття, коричневий – густий ліс, синій – розріджений ліс, чагарники.

По-друге, хмарний аерозоль. Якщо моніторинг здійснюється виключно за класифікованими зображеннями, помітити тінь від хмари чи легку хмару стає неможливо. Водночас є характерні висотні хмари, майже непомітні (як димок на зображенні) навіть при візуальному огляді знімка в комбінації каналів, що дають природний колір. У *Landsat 8* є окремий канал з дуже вузьким спектром, який має чудову чутливість до цих перешкод [3].

По-третє, нещодавні опади. Якщо знімку передували дощі, залишкова волога на рослинності спричинить зменшення абсолютного значення вегетаційного індексу, що при автоматичній класифікації чи неадаптованій мануальній класифікації зображення спричинить викривлення результатів.

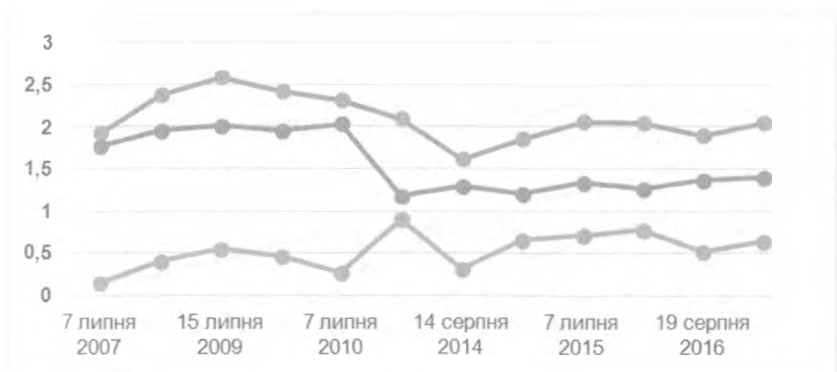


Рис. 6. Динаміка лісового покриття ділянки 2, по осі ординат – площа кластерів, км²

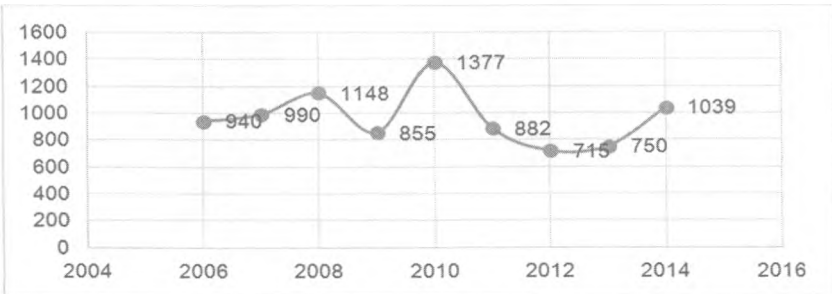


Рис. 7. Річна кількість опадів (мм) на території Карпатського НПП.

По-четверте, перехід між сенсорами. Це притаманно дослідженням, що охоплюють тривалий часовий діапазон, коли опрацьовуються знімки з різних супутників. Сенсори *Landsat 4-5* ідентичні, Ландсат-7 дещо відрізняється [6], тоді як Ландсат-8 уже має відчутну різницю в спектральному діапазоні [7]. А при переході до *Sentinel*, який відрізняється кращою роздільною здатністю [8], різниця зростає ще більше.

По-п'яте, хвороби, шкідники, вітровали, сухостій та мертва деревина вносять певні збурення в зображення. Якщо попередні пункти не є причиною аномалій, найімовірніше, ліс постраждав через ці явища. У такому випадку виникає потреба додаткового дослідження та перевірки ситуації безпосередньо на місці. Також може виявитися, що відбулася часткова санітарна рубка [2]. Оскільки роздільна здатність знімків (30 м²/піксель) не дає змоги спостерігати окремі дерева, то лише зменшення значення вегетаційного індексу стає індикатором такого типу змін.

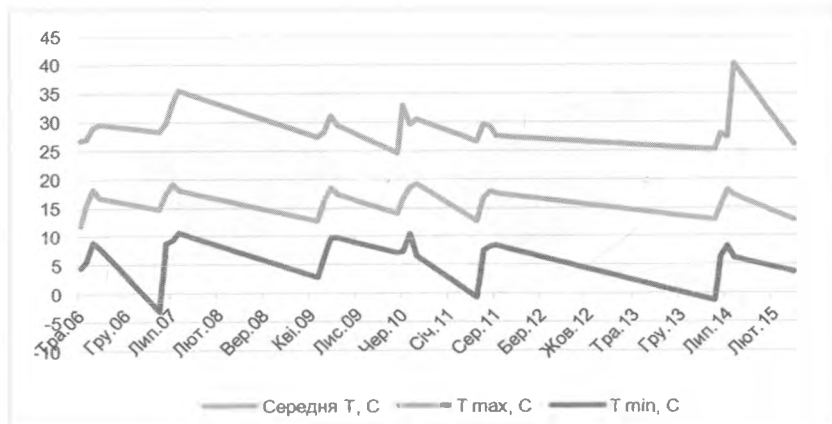


Рис. 8. Мінімальна, середня та максимальна температура (°C, вісь абсцис) за місяць на території Карпатського НПП.

Підсумовуючи вищезазначене, можна зауважити: недоречно використовувати неадаптовані таблиці класів для знімків з різних супутників, оскільки на виході матимемо гарантовану помилку в отриманих результатах. Точні значення для калібрування класифікації при таких переходах потребують подальшого дослідження.

Нормальну динаміку лісового покриву спостерігаємо на рис. 9. Щоправда, у верхній лівій частині знімка за 7 липня 2006 року спостерігається тінь від хмари.

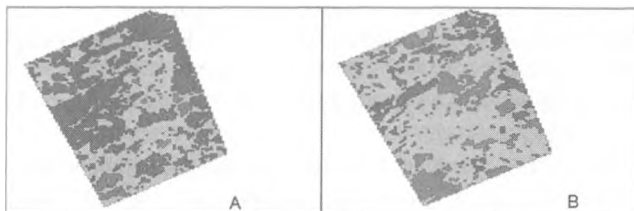


Рис. 9. Приклад нормальної динаміки між двома знімками, ділянка 1. Ліворуч – 7 липня 2006 р., праворуч – 14 липня 2006 р.

Для гірських районів на зразок Карпат отримати знімки з вільною від хмар територією для однієї зони з такою малою різницею в часі є великою рідкістю. Також їх можна використовувати для калібрування таблиць інтерпретації значень вегетаційних індексів.

Висновки

У результаті нашого дослідження виявлено позитивну динаміку розвитку лісового покриву і приклад аномалії для обраних ділянок Карпатського НПП. Різниця у значеннях вегетаційного індексу *MSR* сягала 3-кратних значень між знімками 11 червня та 14 серпня 2014 року (надто значний перерозподіл площі на класифікованих знімках). При цьому дані знімків за червень – липень 2015 року не підтверджували критичні зміни на досліджуваній території. Причиною даних значень слугувала аномально висока температура того літа, що сягала пікових значень $+40,2^{\circ}\text{C}$.

У дослідженні пропонується враховувати інші фактори для правильної інтерпретації аномальних даних, отриманих при моніторингу лісових біотопів та оцінки потенційних ризиків для таких екосистем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Борејко В. Е., Левина Г. Н. Санитарные рубки в объектах ПЗФ. Экологический вред и противозаконный вид деятельности. Киев: Логос, 2016. – С. 9–28.
2. Airn Skianis G., D. Vaiopoulos, K. Nikolakopoulos. A study of the performance of the MSR vegetation index, using probabilistic and geostatistical methods. Bulletin of the Geological Society of Greece, May 2007. – P. 2048-2057.
3. Landsat 8 Bands [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-bands/>
4. EarthExplorer [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://earthexplorer.usgs.gov/>
5. Погода в Ясені [Електронний ресурс] – Режим доступу : https://rp5.ua/Погода_в_Ясені
6. Band Combinations for Landsat 8 [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/product/imagery/band-combinations-for-landsat-8/>
7. Bandcombinations [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://web.pdx.edu/~emch/ip1/bandcombinations.html>
8. Spatial Resolution [Електронний ресурс] – Режим доступу : <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>

ЕКОЛОГІЧНА ПЛОЩИНА «ЗЕЛЕНОЇ» ЕНЕРГЕТИКИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

Максим ОЛІЙНИК

*Національний університет «Києво-Могилянська Академія»,
Київ, Україна*

Ще з середини минулого століття питання взаємодії економіки, енергетики та довкілля є суперечливим та викликає безліч дискусій серед представників різних галузей і секторів. Результат протиріч виявляється у відсутності загальної управлінської моделі цими секторами, прийнятними для різних країн світу. Насправді ж переважна більшість держав розробляє свої управлінські структури, ґрунтуючись перш за все на пріоритетах економіки й енергетики. Разом з тим, загальний базовий елемент, пов'язаний з цими секторами, для всіх країн спільний – це екологічна безпека та захист навколишнього природного середовища.