О.М. Адамовський

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕННЯ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНОГО КРИТЕРІЮ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ (НА ПРИКЛАДІ ЛІСОКОРИСТУВАННЯ)

Важливою проблемою сталого лісокористування як однієї з галузей добувної промисловості є неоднозначність мети, що ускладнює процес прийняття управлінських рішень і є надзвичайно складним різновидом невизначеності. Така невизначеність виявляється у зв'язку з багатьма незбіжностями в оцінці якості припустимих рішень щодо лісокористування, зумовлених необхідністю:

визнання соціально-економічної та екологічної ролі лісів, зокрема суспільної шкоди, пов'язаної з відсутністю лісів на малозаліснених або безлісних територіях;

залучення соціально-економічної та екологічної вартості лісів до системи національного економічного обліку, забезпечення їх раціонального використання відповідно до цілей землекористування та потреб сталого розвитку;

ефективного та раціонального використання всіх видів лісів і лісових ресурсів шляхом розвитку ефективної лісопереробної промисловості, яка забезпечує підвищення вартості вторинної обробки і торгівлі лісовою продукцією, враховуючи вартість усієї деревини та недеревної лісової продукції;

ефективного та раціонального використання лісів як палива та джерела енергії;

більш комплексного використання та підвищення економічної віддачі від лісових масивів в економічних цілях [1].

Необхідність досягнення одночасно двох якісно протилежних цілей (економічної та екологічної) виникає насамперед через те, що для забезпечення сталого розвитку лісокористувачам необхідно постійно вести лісове господарство таким чином, щоб досягати максимального еколого-економічного ефекту [2].

Процес прийняття оптимального (з точки зору забезпечення ведення сталого лісового господарства) управлінського рішення ускладнюється і через те, що ліс є надзвичайно складною динамічною екосистемою відкритого типу, яка безперервно розвивається і швидко змінюється у просторі та часі, тому описується складними нелінійними математичними залежностями.

У формальному вигляді задачу забезпечення максимального еколого-економічного ефекту щодо ведення лісового господарства доцільно відображати за допомогою множини двох критеріїв (двокритеріальна задача математичного програмування).

Лісовим власникам необхідно знайти таке рішення щодо оптимального лісокористування, яке б одночасно забезпечувало максимальний екологічний $(ECOL(a,x) \Rightarrow \max)$ та економічний $(ECON(a,x) \Rightarrow \max)$

© Адамовський Олександр Миколайович – кандидат економічних наук, доцент.
Національний лісотехнічний університет України, Львів.

ISSN 1562-109X

ефекти, що є неможливим, оскільки поліпшення значення одного з критеріїв неминуче призводить до погіршення значення іншого. Тому розв'язанням такої двокритеріальної задачі здебільшого є множина недомінованих (Парето-оптимальних) розв'язань.

З іншого боку, побудова цієї множини у більшості випадків є неможливою внаслідок складних обчислювальних процесів. Тому для розв'язання таких задач доцільно використовувати як методи згортання критеріїв, так і більш гнучкі діалогові методи.

Отже, для забезпечення максимального еколого-економічного ефекту від прийняття управлінських рішень щодо ведення лісового господарства виникає потреба у розв’язанні двокритеріальної задачі математичного програмування, яка має такий загальний вигляд:

$$ECOL(a,x) \Rightarrow \max ,$$

$$ECON(a,x) \Rightarrow \max , \; x \in X . \qquad (1)$$

Тобто лісокористувачам чи лісовласникам необхідно приймати такі рішення щодо ведення лісового господарства, які одночасно були б найкращими за екологічним та економічним критерієм. Необхідно постійно знаходити певний компроміс між екологічними та економічними цілями.

Проілюструємо сформульовану двокритеріальну задачу геометрично. Припустимо, що ми знайшли n можливих розв’язань із всієї множини допустимих. Зобразимо область допустимих розв'язань у просторі змінних (x_1, x_2), значення

критеріїв, що відповідають цим розв’язанням, відобразимо відповідно у просторі критеріїв $(ECOL, ECON)$. Кожній конкретній точці множини припусти-

мих рішень $(x_1^{(i)}, x_2^{(i)})$ відповідатиме одне і лише одне значення кожного з критеріїв $ECOL(x_1^{(i)}, x_2^{(i)})$, $ECON(x_1^{(i)}, x_2^{(i)})$ (при $i = \overline{1,n}$), хоча обернене твердження не завжди відповідатиме дійсності (декілька розв'язань можуть бути рівноцінними з точки зору значень критеріїв), тобто відповідне відображення буде гомоморфним. Здійснивши таку операцію для всіх точок припустимої області у просторі змінни[illegible] ержимо її обра[illegible] осторі [illegible]еріїв (див. рисунок).

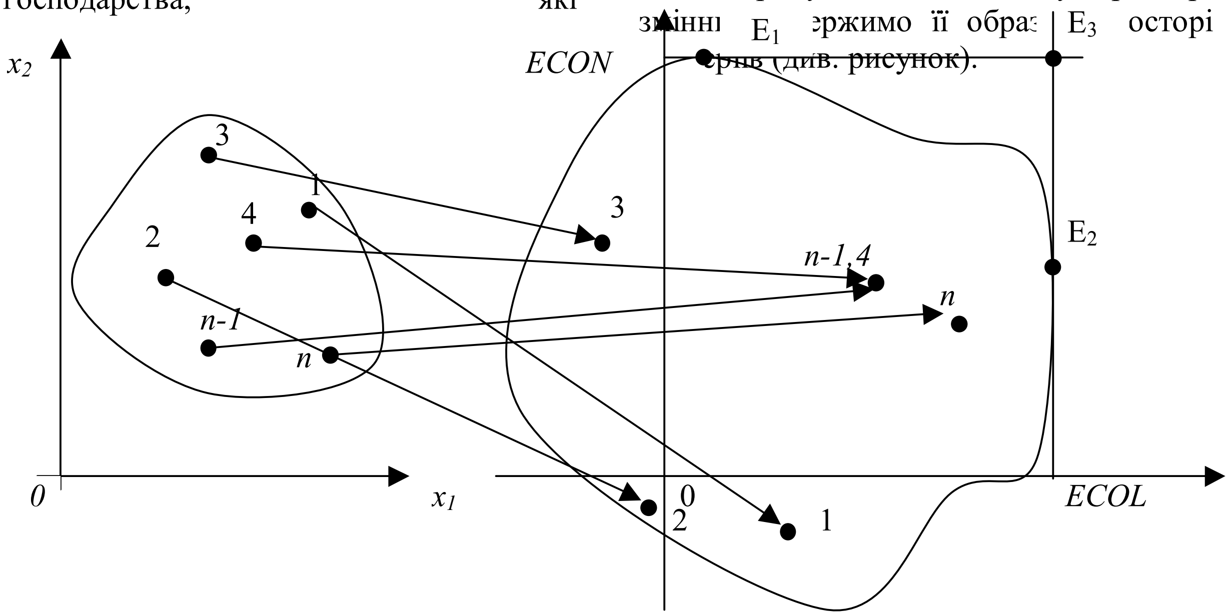

Рисунок. Відображення припустимої області з простору змінних у простір критеріїв еколого-економічного ефекту

На рисунку розв'язання *n-1* та *2* відображаються в одну й ту саму точку в просторі критеріїв, тобто є ідентичними з позиції їх якості. Крім того, вони є гіршими, ніж розв'язання *1* та *n*, у яких значення кожного з критеріїв більші, ніж у *n-1* та *2*. Розв'язання *1*, *2*, *n-1* та *n* є непорівняльними, тобто без додаткової інформації неможливо визначити, який із них є кращий – значення за одним із критеріїв для них є більші, а за іншим – менші.

Аналізуючи розв'язання, що знаходяться на кривій E_1E_2, можна дійти висновку, що вони є множиною "найкращих" розв'язань: для будь-якого іншого розв'язання з множини припустимих завжди знайдеться хоча б одне із розв'язань, що знаходяться на E_1E_2 та краще за нього (тобто таке, що його домінує).

Таким чином, розв'язання, що лежать на E_1E_2, не домінуються ніякими іншими розв'язаннями, які належать до припустимої області (Парето-оптимальні розв'язання) [3] і є у загальному випадку розв'язанням багатокритеріальної задачі.

Одним із найбільш розповсюджених способів розв'язання багатокритеріальних задач є зведення множини критеріїв до одного глобального та розв'язання класичної однокритеріальної задачі [4]. Однак застосування цього підходу має суттєві недоліки, одним із яких є те, що одержане розв'язання для деяких специфічних задач може навіть не належати до множини Парето-оптимальних.

Методи згортання критеріїв приводять первинну задачу до однокритеріальної задачі такого вигляду: $Q(ECOL(a,x),\ ECON(a,x)) \Rightarrow \max \quad x \in X$.

Найвживанішими є лінійне згортання

$$Q = c_1 \cdot ECOL(a,x) + \\ + c_2 \cdot ECON(a,x) \Rightarrow \max \tag{2}$$

та лінійне згортання нормованих критеріїв

$$Q = c_1 \cdot \frac{ECOL(a,x) - ECOL^{min}}{ECOL^{max} - ECOL^{min}} + \\ + c_2 \cdot \frac{ECON(a,x) - ECON^{min}}{ECON^{max} - ECON^{min}} \Rightarrow \max. \tag{3}$$

Для даних цільових функцій (2) і (3) застосовуються обмеження:

$$x \in X,\ c_1 + c_2 = 1,\ c_1 > 0, c_2 > 0.$$

У цих методах c_1 та c_2 – вагові коефіцієнти екологічного та економічного критеріїв, які мають відображати їх важливість, $ECOL^{min}$, $ECOL^{max}$, $ECON^{min}$, $ECON^{max}$ – мінімальне та максимальне значення відповідно екологічного та економічного критеріїв.

Основним недоліком цих методів є складність виявлення точних значень вагових коефіцієнтів – ця процедура в більшості випадків є суб'єктивною. Крім того, коефіцієнти в методі лінійного згортання мають бути розмірними величинами, тому що критерії переважно мають різну розмірність. З метою позбавлення цього недоліку у згортанні нормованих критеріїв окремі критерії спочатку нормуються (нормовані критерії є безрозмірними та змінюються в інтервалі від 0 до 1). Але внаслідок такого "вдосконалення" з'являються нормовані критерії, які не мають змістовного навантаження, і тому об'єктивне визначення вагових коефіцієнтів ще більше ускладнюється. Таким чином, довільність (спричинена багатокритеріальністю) переноситься в іншу інстанцію (встановлення значень вагових коефіцієнтів).

Інший підхід до вирішення проблеми багатокритеріальності – аксіоматичний – полягає у формулюванні множини аксіом з наступним формальним виведенням виду функції корисності (глобального критерію), за допомогою якого і здійснюється остаточний вибір. У цьому випадку виявляються всі обмеження, які побічно накладаються в разі евристичного застосування того чи іншого методу. Отже, лінійне згортання, обґрунтоване за достатньо жорстких аксіоматичних умов, як і в багатьох випадках, не виконується.

Крім того, існують й інші методи згортання, а саме – метод *ідеальної точки*. Так, на рисунку ідеальною є точка E_3 у просторі критеріїв, якій не відповідає жодне припустиме розв'язання простору змінних. Оскільки ідеальна точка здебільшого не знаходиться серед припустимих, виникає проблема знаходження точки, "найближчої" до ідеальної, яка належить до множини припустимих. Для розв'язання задачі за допомогою методу "ідеальної точки" необхідно насамперед визначити її координати і надалі визначити метрику, за допомогою якої можна було б виміряти відстань до оптимальної точки. Для визначення координат "ідеальної точки" необхідно розв'язати дві однокритеріальні задачі за кожним із критеріїв оптимізації $ECOL(a,x) \Rightarrow \max$ та $ECON(a,x) \Rightarrow \max$, $x \in X$.

Сукупність оптимальних значень критеріїв двох однокритеріальних задач $ECOL^* = \max ECOL(a,x)$, $ECON^* = \max ECON(a,x)$, $x \in X$ і визначить координати ідеальної точки $Q^* = (ECOL^*, \quad ECON^*)$ у просторі критеріїв. Якщо "ідеальна точка" належить до множини припустимих (що трапляється вкрай рідко), то розв'язання поставленої задачі одержано.

В іншому випадку визначаємо "відстань" до ідеальної точки, вводячи метрику, і розв'язуємо при цьому однокритеріальну задачу знаходження точки з числа припустимих, яка є найменш віддаленою від ідеальної.

Одним із найзрозуміліших змістовно є метод *переведення критеріїв в обмеження*, що полягає у виділенні головного критерію $ECOL(x)$ (або $ECON(x)$), за яким проводитиметься оптимізація, нормативного значення $ECON(x)$ або $ECOL(x)$ для кожного з критеріїв, що залишилися (значення критерію не може бути меншим за нормативне), та розв'язанні одержаної таким чином однокритеріальної задачі оптимізації:

$$\begin{aligned} &ECOL(x) \Rightarrow \max, \\ &ECON(x) \geq ECON^N, \ x \in X \end{aligned} \tag{4}$$

або

$$\begin{aligned} &ECOL(x) \geq ECOL^N, \\ &ECON(x) \Rightarrow \max, \ x \in X. \end{aligned} \tag{5}$$

Основними проблемами в разі застосування цього методу є труднощі з визначенням головного критерію та нормативних значень для інших критеріїв. Якщо нормативні значення обрано недостатньо великі, то не всі резерви поліпшення їх значень будуть використані. Якщо ж ці значення будуть завеликими, то задача взагалі не матиме розв'язань, оскільки область припустимих рішень виявиться порожньою.

Метод *контрольних показників* дає змогу позбутися деяких проблем, притаманних методу переведення критеріїв в обмеження. Застосовуючи цей метод, система нормативів задається для всіх критеріїв, і критерій якості представляється у вигляді

$$Q(x) = \min_{ECOL,ECON} \left\{ \frac{ECOL}{ECOL^N}; \frac{ECON}{ECON^N} \right\} \Rightarrow \max_{x \in X}. \tag{6}$$

Але й у цьому випадку залишається проблема обґрунтування значень нормативів і додається інша, а саме – знаходження розв'язання максимінної задачі.

Метод *послідовних поступок* є одним із найобґрунтованіших змістовно, і за відсутності суперечностей у перевагах особи, яка приймає рішення, може дати добрий результат. Насамперед критерії впорядковуються особою, яка приймає рішення (ОПР) за важливістю в порядку їх спадання: $ECOL \succ ECON$ чи $ECON \succ ECOL$.

Якщо у процесі вибору оптимального рішення лісокористувачами екологічний критерій розглядається як домінуючий ($ECOL \succ ECON$), то на першому кроці алгоритму розв'язується задача оптимізації за критерієм $ECOL$ та призначається поступка $\Delta ECOL$, на яку лісокористувач готовий зменшити одержане оптимальне значення критерію $ECOL^*$, щоб поліпшити значення менш важливого економічного критерію $(ECON)$. Значення економічного критерію розраховується за відомими координатами оптимуму x^*. Призначення поступки потребує введення ще одного додаткового обмеження $ECOL \geq ECOL^* - \Delta ECOL$, і таким чином розв'язуватиметься задача

$$\begin{aligned} &ECON(x) \Rightarrow \max,\ x \in X, \\ &ECOL(x) \geq ECOL^* - \Delta ECOL(x). \end{aligned} \tag{7}$$

Якщо ж лісокористувачі вважають, що важливіший економічний критерій – $ECON \succ ECOL$, то задача матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned} &ECOL(x) \Rightarrow \max,\ x \in X, \\ &ECON(x) \geq ECON^* - \Delta ECON(x). \end{aligned} \tag{8}$$

Процес розв'язання задачі завершується тоді, коли призначення поступки буде недоцільним. У разі необхідності процес можна повторити, здійснивши аналіз попередніх результатів. Таким чином, метод послідовних поступок є достатньо гнучким. Для його реалізації достатньо мати ефективний метод розв'язання однокритеріальної задачі необхідного типу.

Найгнучкішими методами, які можна застосовувати в таких задачах, є *діалогові*. Важливою рисою даних методів є можливість безпосередньої участі у процесі розв'язання задачі самого лісокористувача, який приймає необхідне для нього рішення, а це дозволяє скоригувати перебіг розв’язання та врахувати при цьому деякі неформальні моменти. У принципі, момент діалогу присутній вже при методі послідовних поступок. Адже при цьому методі на кожному кроці алгоритму звертаються до ОПР (лісокористувача) з метою одержання значення поступки для того чи іншого критерію.

Також для прийняття оптимального рішення можна застосувати алгоритм розв'язання, запропонований Джофроном і модифікований багатьма дослідниками, в якому використовуються ідеї відомого градієнтного методу [4]. Робота алгоритму починається з будь-якої точки припустимої області. На кожному етапі із залученням ОПР визначається напрям руху у просторі критеріїв та довжина кроку в цьому напрямі. Напрям руху (еквівалент градієнта) визначається шляхом опитування ОПР щодо значень коефіцієнтів заміщення критеріїв у поточній точці (проводиться опитування – яким значенням зміни за одним із критеріїв можна скомпенсувати зміну іншого). Звичайно, що напрям руху залежатиме від координат точки у просторі критеріїв. Після цього ОПР задає величину кроку в заданому напрямі та здійснюється крок – якщо його значення приводить до виходу за межі припустимої області в просторі змінних, величина кроку зменшується, щоб одержана точка належала до області припустимих значень. Процедура повторюється доти, доки ОПР не зупинить її виконання або не будуть виконані формальні умови зупинки. Цей метод висуває високі вимоги до ОПР щодо виявлення значень коефіцієнтів заміщень критеріїв.

Іншу групу методів становлять методи поступового звуження кількості розв'язань, що належать до множини Парето-оптимальних.

Діалоговий алгоритм розв'язання двокритеріальної задачі оптимізації еколого-економічних критеріїв (1) матиме вигляд

$$\begin{aligned} &ECOL(x_1, x_2) \Rightarrow \max, \\ &ECON(x_1, x_2) \Rightarrow \max, \\ &x = (x_1, x_2),\ x \in X. \end{aligned} \tag{9}$$

Розв'яжемо пару однокритеріальних задач оптимізації за кожним із критеріїв і підставленням відповідних оптимальних значень змінних визначимо іншу координату у просторі критеріїв

$$\begin{aligned} &ECOL(x_1, x_2) \Rightarrow \max, \\ &x = (x_1, x_2),\ x \in X. \end{aligned} \tag{10}$$

Результат – координати оптимальної точки $x^{(1)} = \left(x_1^{(1)}, x_2^{(1)}\right)$, оптимальне значення критерію $ECOL^{(1)} = ECOL\left(x^{(1)}\right)$ і обчислене значення критерію $ECON^{(1)} = = ECON\left(x^{(1)}\right)$.

Аналогічно для другого критерію

$$\begin{aligned} &ECON(x_1, x_2) \Rightarrow \max, \\ &x = (x_1, x_2),\ x \in X. \end{aligned} \tag{11}$$

Результат – координати оптимальної точки $x^{(2)} = \left(x_1^{(2)}, x_2^{(2)}\right)$, оптимальне значення критерію $ECON^{(2)} = ECON\left(x^{(2)}\right)$ і обчислене значення критерію $ECOL^{(2)} = ECOL\left(x^{(2)}\right)$.

Таким чином, одержуємо дві граничні точки множини Парето-оптимальних розв'язань у просторі критеріїв:

$$\begin{aligned} &Q^{(1)} = \left(ECOL\left(x^{(1)}\right), ECON\left(x^{(1)}\right)\right); \\ &Q^{(2)} = \left(ECOL\left(x^{(2)}\right), ECON\left(x^{(2)}\right)\right). \end{aligned} \tag{12}$$

Надалі обираємо середину відрізка $\left(ECOL\left(x^{(1)}\right), ECOL\left(x^{(2)}\right)\right)$:

$$ECOL^{(3)} = \frac{ECOL\left(x^{(1)}\right) - ECOL\left(x^{(2)}\right)}{2} \tag{13}$$

і розв'язуємо задачу: $ECON(x_1, x_2) \Rightarrow \Rightarrow \max$, $x = (x_1, x_2)$, $ECOL(x_1, x_2) \geq \geq ECOL^{(3)}$. Розв'язавши її і підставивши координати оптимальної точки у просторі змінних у вирази для критеріїв, одержуємо координати середньої точки: $Q^{(3)} = \left(ECOL\left(x^{(3)}\right), ECON\left(x^{(3)}\right)\right)$.

Перевага останнього методу полягає в тому, що описані кроки виконуються без втручання лісокористувача, йому подається лише графічне зображення з координатами трьох точок в області критеріїв, а також ставиться запитання: «У якому напрямку від середньої точки необхідно рухатися по осі критерію ECOL?» Залежно від відповіді інтервал пошуку звужується, переіндексовуються крайні точки, визначаються координати середньої точки, і процедура опитування повторюється. Цікаво відзначити, що в цьому випадку по суті звужується область Парето-оптимальних розв'язань, але при цьому сам лісокористувач не повинен знати її конфігурації [4].

Використання наведених моделей ефективне для аналізу політики лісового менеджменту. Навіть результати, одержані в разі реалізації найпростішого типу такої моделі, надають багато інформації для подальшого аналізу [5].

Багатокритеріальні методи із застосуванням інтуїтивної логіки та інтерактивних процедур, а також багатоваріантний аналіз надають змогу передбачати ефективність різних варіантів лісового менеджменту, зокрема, у лісозаготівельній (добувній) промисловості, враховуючи екологічні, економічні та соціальні умови.

Література

1. Програма дій "Порядок денний на XXI століття" (Agenda 21). – К: Інтелсфера, 2000. – 359 с.

2. Адамовський О.М. Обґрунтування еколого-економічного критерію / О.М. Адамовський // Науковий вісник: Менеджмент природних ресурсів, екологічна і лісова політика. – Львів: УкрДЛТУ. – 2004. – Вип. 14.2. – С. 97-103.

3. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 255 с.

4. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация: Теория, вычисления и приложения / Р. Штойер. – М.: Радио и связь 1992. – 504с.

5. Адамовський О.М. Оптимізація лісокористування в економічних дослідженнях (зарубіжний досвід) / О.М. Адамовський // Науковий вісник: До 125-річчя УкрДЛТУ. – Львів: УкрДЛТУ. – 2000. – Вип. 10.2. – С. 168-173.