

ПРИНЦИПИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЛАНДШАФТНО-ЕКОЛОГІЧНОГО КАРТУВАННЯ

Мкртчян О.С.

В статті розглядаються принципи ландшафтно-екологічного картування на основі аналізу геопросторового розподілу екологічних чинників. Описані основи оригінальної методики автоматизованої ландшафтно-екологічної класифікації і картування шляхом класифікації засобами ГІС сукупності шарів ландшафтно-екологічних індексів, що відображають основні прямі екологічні фактори.

Ключові слова: ландшафтно-екологічне картування, ЦМР, екологічні фактори, ландшафтно-екологічні індекси.

1. Постановка проблеми.

Швидке поширення сучасних геоінформаційних технологій збагатило науку про ландшафт цілим арсеналом новітніх методів досліджень, які не лише збільшують її потенціал регіональних і прикладних досліджень, але й здатні суттєво вплинути на її теоретико-методологічні основи. Адже можливості автоматизованого кількісного геопросторового аналізу даних в ГІС суттєво розширюють можливості аналізу та моделювання ландшафтних зв'язків, порівняно з традиційним ландшафтознавством з його "прив'язаністю" до паперових карт і пов'язаних з ними мануальних методів ландшафтного картування і візуальних методів аналізу.

Так, у ландшафтознавстві важливою проблемою є присутність суб'єктивізму при проведенні ландшафтних меж. Прикладом є публікація колективу ландшафтознавців Львівського університету [8], в якій подано чотири доволі відмінні варіанти карт ПТК Чорногори, створені різними дослідниками за єдиною методикою у рамках однієї наукової школи. Перевагою автоматизованих методів аналізу та синтезу даних, натомість, є чітка формалізація цих процедур, тому, використовуючи одні й ті ж первинні дані та алгоритм їхньої обробки, завжди отримуватимемо на виході однаковий результат.

2. Аналіз існуючих підходів.

Серед дослідників досі немає консенсусу щодо співвідношення між ландшафтознавством і ландшафтною екологією. Це має свої історичні причини, зокрема те, що в колишньому СРСР з його численними ландшафтознавчими школами ландшафтна екологія як наука була слабо розвинута, тоді як за межами країн колишнього соцтабору було майже невідомим ландшафтознавство. Спираючись на цей факт, деякі дослідники фактично ототожнюють ці дві науки, що мають однаковий об'єкт дослідження (ландшафт).

Проте, аналізуючи реальний зміст ландшафтознавчих і ландшафтно-екологічних досліджень, доходимо висновку, що в ландшафтознавстві ландшафт як системне поєднання компонентів з міжкомпонентними зв'язками досліджується з поліцентричних позицій, тоді як ландшафтній екології властивий моноцентричний підхід, дослідження ландшафту з позиції суб'єкта-"господаря" ландшафтно-екосистеми. Як слушно зазначає М. Гродзинський, рисою ландшафтно-екології, яка

вирізняє її з-поміж інших напрямів пізнання ландшафту, є "погляд на ландшафт очима його суб'єктів" [1, с. 18]. Питання про те, чи можуть в якості таких суб'єктів виступати неживі сутності, залишимо для роздумів філософів, практика ж ландшафтно-екологічних досліджень вчених різних країн показує, що суб'єктами, з позиції яких розглядається ландшафт, майже завжди є окремі живі організми, (рідше) їхні угруповання, а також людина та суспільство.

Якщо існує предметна відмінність між ландшафтознавством і ландшафтною екологією, то така ж відмінність повинна існувати і між принципами ландшафтного і ландшафтно-екологічного картування. При складанні ландшафтних карт дослідник прагне відобразити на одній карті усю картину геопросторової диференціації ландшафту. При цьому від орієнтується насамперед на найбільш "сильні" компоненти і чинники, які суттєво впливають на геопросторовий розподіл найбільшої кількості інших ландшафтних компонентів. При такому підході, проте, неминуче пропускаються з виду окремі чинники, що специфічно впливають на окремі геокомпоненти. В той же час, при ландшафтно-екологічному картуванні дослідник фокусує увагу лише на тих чинниках, які зумовлюють геопросторовий розподіл характеристик "суб'єкту", наприклад, рослинного покриву, тваринного світу, людського суспільства та його господарської діяльності. Ті ж чинники, які безпосередньо не стосуються суб'єкта, не відображаються на ландшафтно-екологічних картах, навіть якщо вони є дуже важливими з точки зору ландшафтно-екологічної території у цілому. Так, в ландшафтній екології англійських країн поширена ландшафтна модель "патч-коридор-матриця", в якій усі місцезонації фактично поділяються на два класи – придатні та непридатні для проживання конкретного виду тварин, після чого предметом аналізу стає просторова структура з точки зору її сприятливості для виживання і сталого проживання даного виду [10]. Проте, одночасно на Заході набули поширення й дослідження зв'язків між поширенням рослинних і тваринних видів та угруповань, і факторами середовища, в тому числі із застосуванням кількісних моделей [12], хоча такі дослідження й не відносять формально до сфери ландшафтно-екології.

Таким чином, під ландшафтно-екологічним картуванням слід розуміти насамперед картування розподілу сукупності екологічних чинників, які мають вплив на геопросторовий розподіл окремих видів, угруповань, а також (при широкому розумінні екології) на сприятливість природних умов по-відношенню до різних видів господарської та іншої діяльності людей.

Метою даного дослідження є формулювання методики детального ландшафтно-екологічного картування на основі автоматизованої класифікації цифрової моделі рельєфу (ЦМР) та верифікація даної методики з використанням даних польових спостережень на дослідних ділянках.

3. Виклад основного матеріалу.

Якщо зосередити увагу на фітоекології (включаючи сюди й екологію культурних рослин, агроекологію), то головними екологічними чинниками виступатимуть освітленість, тепло, волога та трофність (едафічні умови). Це знайшло вираз і в екологічній термінології – виділення в рамках загального поняття "екотоп" понять "кліматоп", "едафотоп", "гігротоп". В ряді випадків лімітуючими екологічними чинниками можуть також бути вміст у ґрунті певних елементів, фізико-хімічні параметри ґрунтового розчину (кислотність, окисно-відновний

потенціал), присутність в екосистемі певних тварин, різноманітне антропогенне навантаження, тощо. Відповідно, при ландшафтно-екологічному картуванні слід насамперед передати геопросторовий розподіл цих чинників. Критерієм виділення територіальних одиниць при цьому виступатиме екологічна однорідність, яку визначаємо як однорідність умов середовища по відношенню до живих організмів (зокрема, культурних рослин) та стосовно вимог основних способів землекористування.

Оскільки безпосереднє вимірювання і картування ступеня освітленості, температурного режиму, зволоженості і трофності ґрунту – завдання технічно дуже складне, незамінним інструментом ландшафтно-екологічного картування виступає ландшафтно-екологічна індикація – визначення (з певною точністю) розподілу прямих екологічних факторів за непрямыми, пов'язаними з фізіономічними компонентами і властивостями ландшафту – насамперед, рельєфом та наземним покривом (ектоярусом).

В традиційному ландшафтознавстві головними джерелами детальної геопросторової інформації про ландшафт були топографічні карти та аерофотознімки. Нині замість аерофотознімків все частіше використовують багатозональні космозображення, а замість звичного візуального аналізу і мануального оконтурення – методи комп'ютерного аналізу та класифікації. Комбінуючи за спеціальними формулами значення відбивної здатності земної поверхні у різних діапазонах спектру, одержують спектральні індекси – інтегральні кількісні показники, які характеризують певні властивості ландшафту, які відбиваються на спектральних характеристиках його ектоярусу. Так, Нормалізований вегетаційний індекс (NDVI) характеризує інтенсивність фотосинтезу, ступінь розвинутості і стан наземної фітомаси, деякі інші індекси – вміст вологи у фітомасі, вміст заліза у ґрунтах, потужність снігового покриву тощо [2].

Щодо рельєфу, то в сучасних ГІС головним способом представлення інформації про його морфологію є цифрові моделі рельєфу (ЦМР), які є регулярною матрицею перевищень, яку шляхом застосування простих математичних операторів можна перетворити на матрицю значень похилів поверхні, вертикального та горизонтального розчленування, інших морфометричних показників. Алгоритми, інтегровані в сучасні ГІС-пакети, дозволяють також обраховувати за ЦМР ряд гідрологічних параметрів (довжини ліній стоку, дренажну площу), а засоби картографічної алгебри дають змогу довільно перетворювати та комбінувати ЦМР за певними правилами. Зокрема, застосування відповідних алгоритмів дозволяє обраховувати важливі екологічні параметри, пов'язані з морфологією земної поверхні. Так, похідні від ЦМР топографічні параметри ефективно використовуються для моделювання екологічних умов місцезростань на нижчому просторовому рівні [12].

Враховуючи те важливе значення, яке має рельєф як чинник перерозподілу сонячної радіації, вологи та потоків речовини на земній поверхні, можна запропонувати ландшафтно-екологічну класифікацію рельєфу, тобто виділення на його основі територіальних одиниць, яким в силу особливостей такого перерозподілу властиві відносно однорідні значення головних екологічних факторів [3,5]. Такі територіальні одиниці пропонуємо назвати морфотопами. У [7] вони визначаються як "виділені за ознаками морфології земної поверхні та достатньою мірою екологічно однорідні територіальні одиниці, які, виходячи з характеристик

території, цілей дослідження, наявних даних та можливостей їх збору та обробки, недоцільно поділяти за геоморфогенно зумовленими внутрішніми відмінностями у природних умовах на дрібніші територіальні складові".

Нами була розроблена оригінальна методика виділення морфотопів на основі автоматизованої класифікації ЦМР. Ця методика складається з двох етапів: 1) картування індексів, які відповідають кількісним параметрам головних екологічних факторів; 2) власне класифікації засобами ГІС сукупності растрових ГІС-шарів, які відображають ці індекси. Реалізація першого етапу цієї методики схематично зображена на рис. 1.

Для апробації даної методики нами здійснено екологічну класифікацію рельєфу невеликої ділянки в околицях м. Львова, яка обіймає вододіл та верхні частини схилів двох невеликих долин басейну р. Полтви. Горизонтальна детальність (розмір піксели) ЦМР, створеної шляхом інтерполяції гіпсометричних шарів топокарти в середовищі програмного пакету Arc/Info, складає 5 м. Для верифікації результатів використовувались результати польових спостережень характеристик рослинного покриву.



Рис. 1. Схема картування прямих екологічних факторів за ЦМР

Для обрахунку параметру, який характеризує перерозподіл сонячної радіації, використовувався алгоритм, розроблений Л. Кумаром з колегами [13] та реалізований у формі макропрограми shortwave.aml середовища Arc/Info. Він дозволяє розрахувати інтегральну величину надходження короткохвильової сонячної радіації за довільний період із врахуванням ефектів затінення та атмосферного поглинання радіації при низькій висоті сонця над горизонтом, але без урахування поглинання хмарністю та довгохвильової радіації [13]. Нами за даною

програмою розраховано величину надходження сонячної радіації за найбільш важливий в екологічному відношенні період з 1 березня по 31 жовтня (рис. 2).

Як бачимо, надходження прямої сонячної радіації на круті схили північної експозиції є більш ніж вдвічі меншим, аніж на схили південних експозицій, що впливає не екологічні умови місцезростань як прямо, так і опосередковано, через зміни мікроклімату. Так, зв'язок між надходженням радіації та рясністю світлолюбного виду анемона дібровна (*Anemone nemorosa* L.) виявився статистично достовірним (критерій $t = 3,45$ при 34 ступенях свободи) [15].

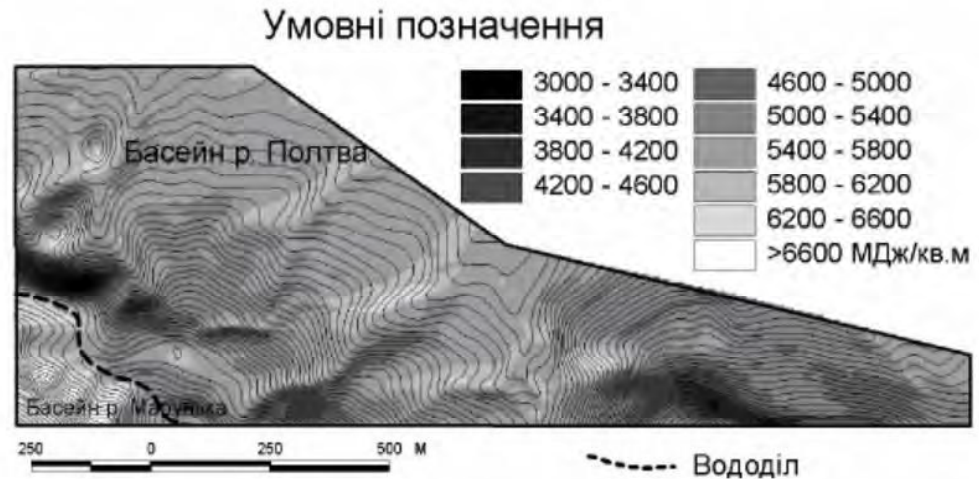


Рис. 2. Максимальна величина надходження прямої сонячної радіації на елементи рельєфу досліджуваної частини басейну з різним похилом та експозицією за період 1 березня – 31 жовтня, Мдж/м².

Для відображення перерозподілу вологи за елементами рельєфу під дією гравітації доцільно використати складений топографічний індекс (топографічний індекс вологості, СТІ), запропонований І. Муром та П. Гесслером. Цей індекс відбиває положення у ландшафтній катені та обраховується за формулою: $CTI = \ln(A_s / \tan \beta)$, де A_s – дренажна площа (площа водозбору, розрахована на одиницю довжини замикаючого контуру), β – похил поверхні [16]. Даний індекс відбиває розташування пункту в ландшафтній катені; великі його значення відповідають переважаючій акумуляції вологи, підвищеному вмісту її у ґрунті, що, у свою чергу, впливає на інші ґрунтові характеристики, мікроклімат, водний баланс, екологічні умови місцезростань. Зарубіжні дослідники включають даний індекс до числа показників, що використовуються для прогнозування характеристик ґрунтів. Так, П. Гесслер із колегами розробили статистичну ґрунтово-ландшафтну модель для прогнозування ряду ґрунтових характеристик, використовуючи такі морфометричні показники, як планова кривизна, складений топографічний індекс СТІ та дренажна площа [11]. Дана модель пояснює 65% просторової варіації ґрунтових характеристик. Індекс СТІ сам по собі пояснив 71% варіації потужності

грунтового горизонту А, 84% варіації потужності ґрунтового профілю і 78% варіації вмісту ґрунтового вуглецю [11].

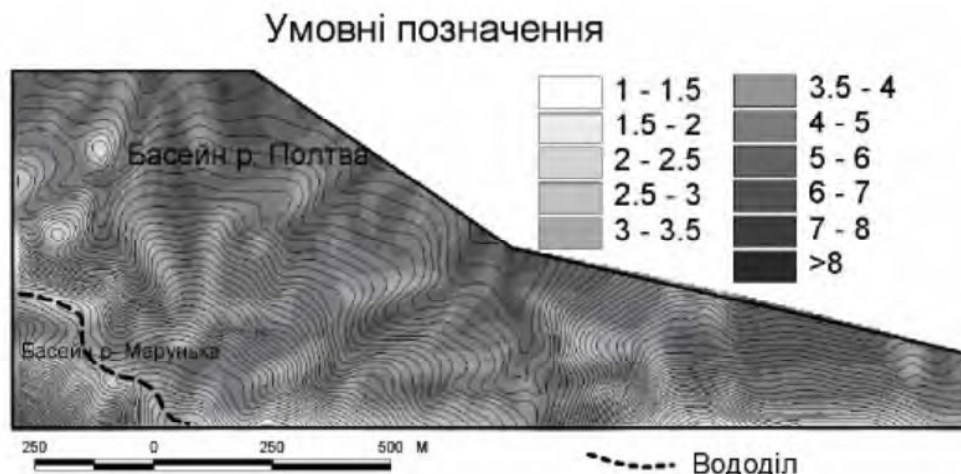


Рис. 3. Розподіл топографічного індексу вологості.

Топографічний індекс вологості (рис. 3) має найменші значення на вершинних поверхнях та верхніх частинах крутих схилів і найбільші – на нижніх увігнутих частинах схилів та у днищах долин.

Основним процесом, відповідальним за перерозподіл твердого матеріалу в даних умовах є водна ерозія. Для визначення ерозійного потенціалу рельєфу був використаний вираз із модифікованого Універсального рівняння втрат ґрунту (RUSLE) [14]:

$LS = (m+1) [A_s / a_0]^m [\sin \beta / b_0]^n$, де A_s – дренажна площа, β – похил поверхні, m і n – стандартні параметри, $a_0 = 22.1\text{м}$ – довжина і $b_0 = 0.09 = \sin(5.16^\circ)$ – похил поверхні стандартних ділянок, на яких визначались параметри моделі (див. рис. 4). Для визначення реальних обсягів змиву величину LS треба помножити на значення змінних, які характеризують інші чинники ерозії (опаді, ґрунти, рослинність тощо).

З метою екологічної класифікації елементів рельєфу та виділення відповідних територіальних одиниць (морфотопів) використано методику ітераційного кластерного аналізу, яка виділяє класи на основі аналізу природних поєднань даних (кластерів) у просторі атрибутів. Класифікацію даних здійснено шляхом послідовного застосування функцій ISOCLUSTER та MLCLASSIFY програмного пакету Arc/Info. Алгоритм, який використано у першій з цих функцій, базується на методиці мігруючих середніх, суть якої полягає у віднесенні кожного елементу (місцеположення, піксели) до класу із найближчим до нього положенням центроїду в багатовимірному просторі атрибутів (показників, які використовуються в класифікації), із наступним перерахунком положення центроїдів усіх класів. В результаті було отримано растровий шар, кожна піксела якого віднесена до одного з п'яти класів, що відповідають виділеним морфотопам (див. рис. 5). В подальшому

отриманий растровий шар було піддано автоматичному згладжуванню та векторизації для перетворення у векторний шар, в якому кожний виділ отриманих морфотопів представлений полігоном із окремим записом у таблиці атрибутів.

Умовні позначення

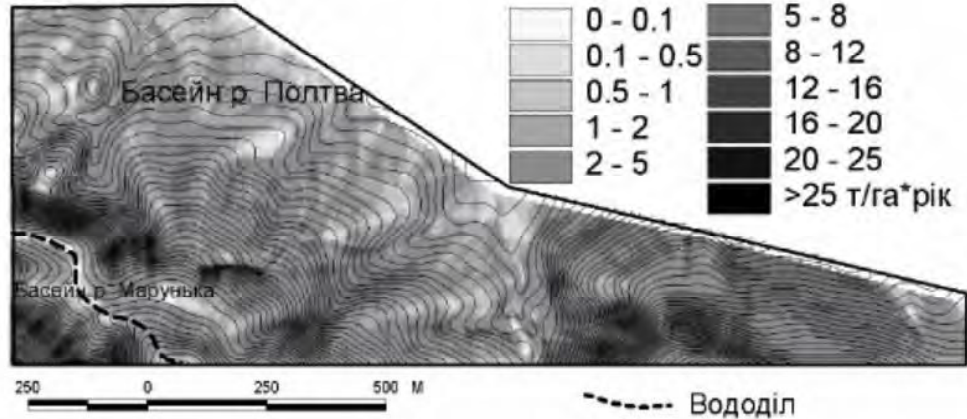


Рис. 4. Розподіл ерозійного потенціалу рельєфу.

Умовні позначення

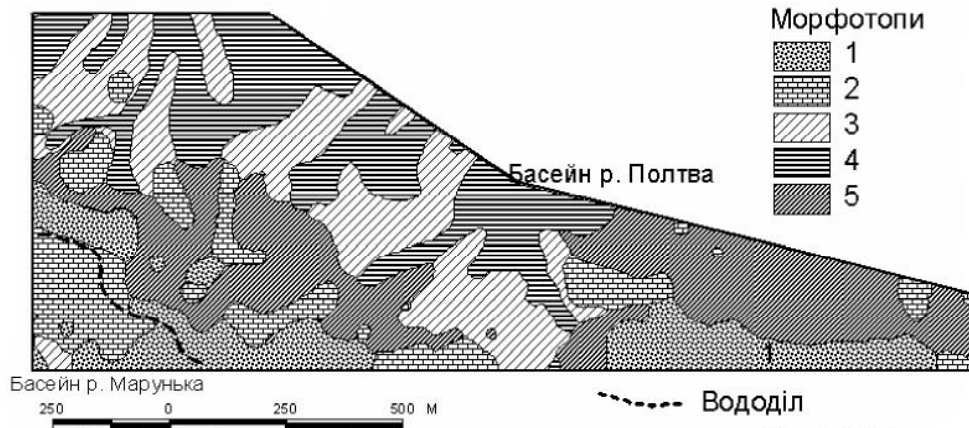


Рис. 5. Морфотопи, виділені шляхом автоматизованої класифікації ЦМР.

Із п'яти виділених таким способом морфотопів перший відповідає вузьким гребеням та крутим гравітаційним схилам; другий – виположеним вершинним поверхням, структурним ступеням на схилах та останцевим горбам; третій – випуклим пологим нижнім ділянкам схилів; четвертий – днищам балок та увігнутим нижнім ділянкам пологих схилів; п'ятий – верхнім спадистим частинам схилів. Більш детальна ландшафтна характеристика виділених морфотопів наведена в [5].

Для визначення екологічної значимості класифікації отримані морфотопи були співставлені із характеристиками рослинності. Зокрема, за спостереженнями на 46 облікових ділянках визначався зв'язок між морфотопами та рясністю анемони дібрової (*Anemone nemorosa* L.), яка перебуває у циклі вегетації навесні, а її розподіл слабо залежить від величини проективного покриття деревного ярусу. Рясність рослини визначалась за шкалою Воронова, яка включає 4 класи проективного покриття. В ході аналізу виявлений достовірний статистичний зв'язок значень рясності анемони та виділених морфотопів. Дисперсійний аналіз показав високу надійність зв'язку (значення критерію F складає 4,175 при 4 ступенях свободи, що відповідає рівню достовірності зв'язку 0,9937). Найменшим проективним покриттям характеризується морфотоп 1, найбільшим – морфотопи 3 і 2, решта морфотопів займають проміжне положення.

Морфотопи також були співставлені з характеристиками природного деревостану на 78 облікових ділянках в межах досліджуваної частини басейну. Зокрема, співставлення морфотопів з формулою деревостану виявило, що частка буку є найменшою в морфотопі 4 (бук уникає перезволожених місцеположень, де його місце у деревостані займає вільха). Навпаки, найбільша частка буку характерна для морфотопів 1 та 5, які відповідають добре дренованим крутим схилам. Морфотоп 3 характеризується суттєво більшою часткою грабу та вільхи порівняно з морфотопом 2, до буку місцями домішується береза.

Як бачимо, виділені морфотопи відповідають критерію екологічної однорідності, що засвідчується відповідними характеристиками рослинного покриву в їх межах.

Нами також було використано дану методику при ландшафтно-екологічному картуванні гірської ділянки (Верхньодністерські Бескиди). Фрагмент отриманої карти наведений на рис. 6. Як бачимо, навіть візуально автоматично проведені межі добре відображають специфіку морфогенно зумовленої ландшафтної диференціації.

Висновки

Звичайно, вичерпна ландшафтно-екологічна класифікація і ландшафтно-екологічне картування не можуть базуватись лише на характеристиках морфології земної поверхні. Наприклад, в районах зі складною літологією поверхневих відкладів остання може суттєво впливати на розподіл едафічних і гідрологічних характеристик субстрату. Так само, складний рельєф може породжувати суттєві з точки зору екології мікрокліматичні відмінності (пов'язані з температурними інверсіями тощо), які неможливо звести до відмінностей в інсоляції. В таких випадках необхідно вводити у розгляд інші екологічні чинники та застосовувати інші методи їхнього картування. Проте, кістяк даної методики при цьому лишатиметься незмінним.

Отже, суттєвими перевагами запропонованої методики є використання при класифікації прямих науково обґрунтованих екологічних факторів, та мінімум суб'єктивізму, який забезпечується автоматизованим характером класифікації. Дана методика може знайти практичне застосування при класифікації та картуванні

природно-ландшафтних умов і ресурсів в землевпорядкуванні, лісовпорядкуванні, при організації природоохоронної діяльності, тощо.

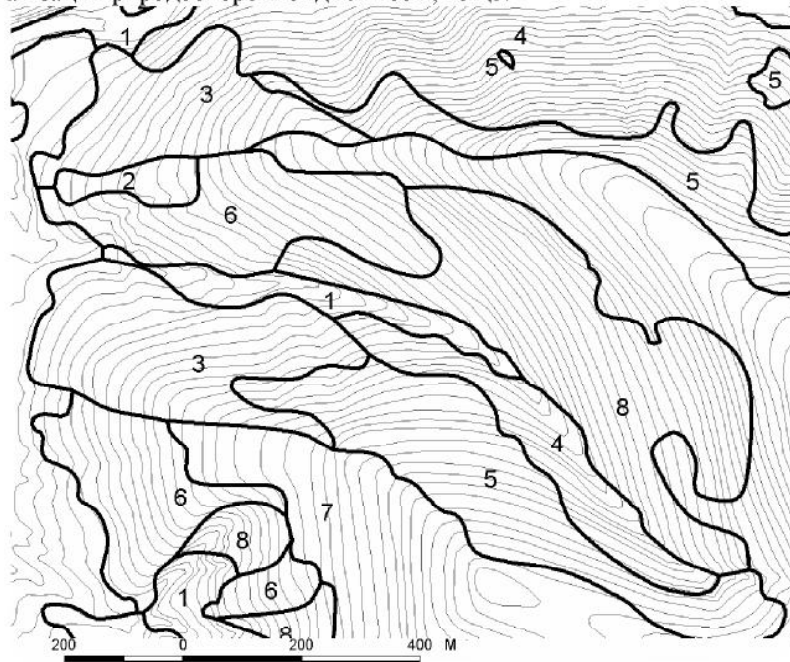


Рис. 6. Фрагмент ландшафтно-екологічної карти, отриманої шляхом автоматизованої класифікації рельєфу

Список літератури

1. Гродзинський М. Д. Точки біфуркації та етапи розвитку ландшафтної екології // Фізична географія і геоморфологія. –2008. –вип.54. –С.6-19.
2. Книжников Ю. Ф., Кравцова В. И., Татубалина О. В. Аэрокосмические методы географических исследований. М.: Изд. центр "Академия", 2004
3. Ковальчук І., Мкртчян О. Автоматизована екологічна класифікація елементів рельєфу та її застосування для вивчення річково-долинних ландшафтів // Наук. вісник Чернівецького ун-ту: Збірник наук. праць. Вип. 361: Географія. –Чернівці: Рута, 2007. –С. 17-25.
4. Ковальчук І. П., Мкртчян А. С., Круглов І. С. Автоматизированная типизация земель горно-предгорных ландшафтов на основе параметров рельефа // Рельеф и природопользование предгорных и низкогорных территорий: Материалы международной научно-практической конференции 3-7 октября 2005 г. –Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2005. –С. 133-138.
5. Мкртчян А. С. Автоматизированное выделение ландшафтных единиц путем классификации рельефа с применением ГИС // Ландшафтное планирование: общие основания, методология, технология. Труды Международной школы-конференции "Ландшафтное планирование". –М.: географический факультет МГУ, 2006. –С. 203-208.
6. Мкртчян О. С. Картування водно-повітряного режиму ґрунту та перерозподілу вологи на схилах з використанням отриманих за допомогою ГІС-аналізу топографічних індексів // Український гідрометеорологічний журнал. –2006. –№1. –С. 151-157.
7. Мкртчян О. С. Морфотопи як територіальні одиниці картування та оцінки природних умов // Наук. записки Тернопільського національного педагог. ун-ту. Сер. геогр. –2004. –№ 3. –С. 181-187.

8. Чорногірський географічний стаціонар. Навчальний посібник. –Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2003. –123 с.
9. Forman R.T.T. and Godron M. Landscape Ecology. –New York: John Wiley & Sons, 1986.
10. Forman R.T.T. and Godron M. Landscape Ecology. –New York: John Wiley & Sons, 1986.
11. Gessler P.E., Moore I.D., McKenzie N.J., Ryan P.J. Soil landscape modelling and spatial prediction of soil attributes // Int. J. Geogr. Inf. Syst. –1995. –Vol. 9. –P. 421–432.
12. Guisan A., Zimmermann N. Predictive habitat distribution models in ecology // Ecological Modelling. –2000. –№135. –P. 147–186.
13. Kumar L., Skidmore A.K., Knowles E. Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment // International Journal for Geographical Information Science. –1997. –Vol. 11(5). –P. 475-497.
14. Mitasova H., J. Hofierka, M. Zlocha, and R. L. Iverson. Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS // Int. Journal of Geographical Information Science. –1996a.–10(5). –P. 629-641.
15. Mkrtychyan A. Spatial interpolation of field data on plant abundance // Commarmot B., Hamor F. D. (eds.) Natural Forests in the Temperate Zone of Europe – Values and Utilisation. Proceedings of international conference 13-17 October 2003. –Birmensdorf, Swiss: Federal Research Institute WSL; Rakhiv: Carpathian Biosphere Reserve. –P. 314-321.
16. Moore I.D., Gessler P. E., Nielsen G. A., Peterson G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis // Journal of Soil Science Society of America. –1993. –Vol. 57. –C. 443-452.

Мкртчян А. С. Принципы автоматизированного ландшафтно-экологического картографирования.

В статье рассматриваются принципы ландшафтно-экологического картирования на основе анализа геопространственного распределения экологических факторов. Описаны основы оригинальной методики автоматизированной ландшафтной классификации и картирования путем классификации средствами ГИС совокупности слоев ландшафтно-экологических индексов, которые отображают основные прямые экологические факторы.

Ключевые слова: ландшафтно-экологическое картирование, ЦМР, экологические факторы, ландшафтно-экологические индексы.

A.Mkrtychian Principles of automatic landscape-ecological mapping

Principles of landscape-ecological mapping based on analysis of geospatial distribution of ecological factors are considered. The basics of original method of automatic landscape-ecological classification and mapping using GIS analysis and classification of raster layers of landscape-ecological indexes corresponding to basic direct ecological factors are described.

Key words: landscape-ecological mapping, DEM, ecological factors, landscape-ecological indexes.

Статья поступила в редакцию 25.07.2008 г