

DOI: 10.32347/2786-7269.2025.11.574-596

УДК 528:88

Денисюк В.М.,
denysiuk.viktor@vnu.edu.ua, ORCID: 0009-0006-9313-4244,
к.т.н., доцент **Мельник О.В.**,
hockins@vnu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5429-4038,
Волинський національний університет імені Лесі Українки

ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ЗМІН ЗЕМЛЕКОРИСТУВАНЬ В МЕЖАХ ВОДОЗБОРУ РІЧКИ ТУРІЯ

У дослідженні представлено комплексний аналіз змін водно-болотних ландшафтів у басейні річки Турія на Волині, з акцентом на їхній вплив на сталий розвиток регіону та екологічну рівновагу. Використання інноваційних підходів ГІС та дистанційного зондування Землі не лише дозволило картографувати структуру та просторовий розподіл ландшафтів, але й побудувати матриці переходів між різними типами ландшафтів, розкриваючи закономірності їх динаміки. Для візуалізації цих процесів були обраховані матриці переходів та створені Sankey-діаграми, які чітко демонструють переходи між різними класами ландшафтів, що сприяє кращому розумінню масштабу й характеру змін.

Особливу увагу було приділено екологічним викликам, пов'язаним зі змінами ландшафтів, зокрема зменшенню площ природних екосистем, які відіграють важливу роль у підтримці біорізноманіття та водного балансу. Запропоновані адаптивні стратегії для управління ландшафтами включають заходи зі збереження природних ресурсів, відновлення деградованих територій та моніторингу впливу антропогенних факторів. Завдяки високоточній класифікації, виконаній у середовищі Google Earth Engine з використанням алгоритму SmileCART, досягнуто точності аналізу 99,72%, що є вагомим досягненням для сучасних екологічних досліджень. Отримані результати відкривають нові перспективи для ефективного моніторингу, дозволяючи здійснювати детальний аналіз динаміки ландшафтів у часі та просторі. Це дослідження також підкреслює важливість впровадження інноваційних інструментів для забезпечення сталого розвитку регіону та мінімізації негативного впливу змін клімату на природні комплекси.

Ключові слова: геоінформаційні системи; дистанційне зондування Землі; Google Earth Engine; QGIS; Sankey-діаграма; земельний покрив; водозбірний басейн; річка Турія.

Постановка проблеми. Водно-болотні ландшафти Волині є важливими компонентами навколишнього середовища регіону, і вони відіграють ключову роль у функціонуванні екосистем та економічній діяльності області. Використання геоінформаційних систем (ГІС) і технологій дистанційного зондування Землі дає змогу проводити детальний аналіз земельного покриття та землекористувань і забезпечувати ефективне управління природними ресурсами.

Застосування ГІС дозволяє створювати точні карти, які відображають геопросторову структуру різних класів ландшафтів, їхню топографію, розташування ключових екосистем та динаміку змін у часі. Це сприяє детальному аналізу міжландшафтних трансформацій і дає змогу виявляти проблеми та сформулювати стратегії для збереження природних ресурсів. Застосування ГІС також дає змогу оцінювати вплив водно-болотних ландшафтів на ключові сфери, такі як сільське господарство, водопостачання та туризм.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зміни земельного покриття становлять важливий і актуальний об'єкт досліджень, що викликає великий інтерес наукової спільноти світового масштабу. Вивчення земельного покриття річкових басейнів за допомогою методів дистанційного зондування проводилось і активно здійснюється в різних країнах, зокрема: у Бразилії присвячена робота авторів Rafaella Leal, Najdacleia Almeida, Milena Dutra da Silva [31], у Бангладеші – Sameena Begum, Sultana Jahan Ophra, Arafat Hossain, Md Tasim Ferdous, Farhan Ahmed Rafid [7], в Ефіопії – R.S. Dwivedi, Sreenivas Kandrika, K.V. Ramana [11], в Індії – Jatan Debnath, Nibedita Das (Pan), Istak Ahmed, Moujuri Bhowmik [10], у Китаї – Fenglei Fan, Weng Qihao, Yunpeng Wang [13], у Шотландії – Sandy Winterbottom [36], в Україні – Burmeister C. та Schanze J. [9], Денисюка В. та Мельника О. [1].

Формулювання цілей. Дослідження спрямоване на виявлення змін земельного покриття у водозбірному басейні річки Турія на часові проміжки: 2000, 2010 та 2020 роки. Особлива увага приділяється комплексному аналізу водно-болотних ландшафтів регіону із застосуванням передових технологій, таких як дистанційне зондування, ГІС-інструменти та платформа colab.research.google.com. У контексті сучасних викликів, зокрема стрімких кліматичних змін, що значно впливають на природні екосистеми Волині, використання таких методів є надзвичайно важливим для глибокого розуміння стану та динаміки трансформацій ландшафтів досліджуваної території.

Актуальність теми дослідження. Зміна землекористування та земельного покриття (land-use/land-cover, LULC) є важливим фактором екологічних змін на локальному, регіональному та глобальному рівнях. Такі

зміни можуть бути спричинені як прямим, так і непрямим впливом людської діяльності [6, 22]. Вони здатні впливати на клімат або, навпаки, зазнавати впливу кліматичних змін. Наприклад, зміни LULC змінюють погодні умови і клімат через порушення енергетичного балансу, обміну парникових газів та води між землею поверхнею і атмосферою [32]. У свою чергу, кліматичні зміни впливають на землекористування та екосистеми, змінюючи розподіл, структуру та способи використання земельних ресурсів [34].

Різноманітні антропогенні процеси, такі як вирубка лісів, урбанізація та розширення орних земель, впливають на гідрологічні процеси, включаючи розподіл опадів, випаровування, інфільтрацію та стік [8, 24]. Водночас ці процеси мають значний вплив на продуктивність земель і біологічне різноманіття [14, 20].

Використання супутникових даних, отриманих у різні часові проміжки, забезпечує точну візуалізацію та аналіз змін ландшафтів і землекористувань. Земельний покрив (ландшафт) у цьому дослідженні визначається як біофізичний стан земної поверхні, що включає: відкриті водойми, підтоплені (заболочені) території, сільськогосподарські землі (відкритий ґрунт) сільськогосподарські землі (зелений покрив), кущі, ліси, пустощі, урбанізовані території, а також усі об'єкти, які можна виявити за допомогою наземних спостережень чи даних дистанційного зондування.

Землекористування визначається як форма людської господарської діяльності. Оскільки землекористування не може бути ідентифіковане безпосередньо методами дистанційного зондування, потрібні додаткові дані, наприклад, результати польових досліджень [15, 21, 26].

Зміна земельного покриву на різні часові періоди може стосуватися як ландшафтів, так і землекористувань. Згідно з класифікацією Гейста та співавторів [15], зміни земельного покриву поділяються на конверсію та модифікацію. Конверсія виникає, коли один тип земельного покриву повністю замінюється іншим, і така зміна легко виявляється. Модифікація, натомість, характеризується поступовими змінами в межах одного типу земельного покриву, які можуть бути менш помітними.

Наукова новизна. У цій роботі вперше проведено аналіз території водозбірного басейну річки Турія у трьох часових кроках: 2000, 2010 та 2020 рік. За допомогою геоінформаційного моделювання виявлено зміни ландшафтів для восьми класів, досліджено переходи між ними та встановлено основні причини й наслідки цих процесів. Для кількісної оцінки змін обчислено матриці переходів класів ландшафтів, а для наочного представлення динаміки перетворень створено Sankey-діаграми.

Значущість проведеного дослідження посилюється у контексті глобальних кліматичних змін та зростаючого антропогенного навантаження на природне середовище Волинської області. Виявлені тенденції дозволяють сформулювати науково-обґрунтовані рекомендації щодо раціонального використання природних ресурсів, впровадження екологічно-орієнтованих практик та забезпечення сталого розвитку регіону з мінімальним негативним впливом на довкілля.

Мета і методи дослідження. У цій роботі використано комплекс методів дистанційного зондування та ГІС, які дозволяють точно вимірювати та аналізувати зміни ландшафтів і землекористувань. Наприклад, порівнюючи картографічні дані, отримані за різні часові проміжки, можна виявити перехід від одного типу земельного покриття до іншого. Результатом такого порівняння є як табличні дані (матриці) переходів, так і графічні візуалізації, що демонструють зміни між класами земельного покриття [23, 28, 33].

Зміни ландшафтів, у поєднанні з кліматичними змінами, стали катализатором для моделювання довгострокових трансформацій водного та речовинного балансу [27, 29, 30].

Для досягнення основної мети дослідження необхідно реалізувати наступні кроки:

(I) створення детальної ландшафтної карти досліджуваної території для 2000, 2010 та 2020 років, ґрунтуючись на класифікації супутникових даних;

(II) проведення оцінки точності отриманих результатів;

(III) здійснення статистичного аналізу змін земельного покриття в межах водозбірної басейну річки Турія;

(IV) аналіз переходів між класами покриття та створення Sankey-діаграм переходів із використанням інструментів платформи colab.research.google.com.

Таким чином, дослідження покликане забезпечити глибоке розуміння змін у природних ландшафтах і розкрити потенціал сучасних технологій для моніторингу й управління екосистемами.

Наукові результати та їх обґрунтування

Територія дослідження

Річка Турія бере свій початок у заболоченій улоговині на північних схилах Волинської височини, поблизу села Затурці. Її русло тече через Поліську низовину, де в верхів'ї спрямовується на північний захід, а в середній та нижній частинах переходить на північний схід і північ. Зливаючись з Прип'яттю на північному заході села Щитинь, річка завершує свій шлях. Важливою складовою гідрологічної системи є водосховище в місті Ковель, що виконує не тільки регулювальну функцію, а й підтримує екологічну рівновагу в басейні річки. Екосистема нижньої течії річки охороняється в межах

гідрологічного заказника місцевого значення “Турський”, що сприяє збереженню біорізноманіття та природної спадщини регіону.

Річкова долина Турії має трапецієподібну форму, з шириною, яка досягає 2 км, а в пониззі, де річка втрачає свою чіткість, простягається до 3-4 км. Заплава, з характерною двосторонньою конфігурацією, має ширину від 0,3-0,8 км у верхній частині та досягає 3-4 км поблизу гирла, з великою частиною, що характеризується заболоченістю. Водозбірний басейн річки багатий на стариці та озера, які додають унікальності ландшафту. Річище річки звивисте, протяжність поглиблених і розширених ділянок складає 45 км, з варіацією ширини від 8-10 м до 25 м на плесах і розширених ділянках. Похил річки мінімальний – 0,37 м/км, що зумовлює повільну течію води. Басейн річки значною мірою заболочений і заліснений, а також містить численні озера. 20% території басейну перебуває під впливом меліорації. Річка замерзає в грудні, а скресає наприкінці березня, відновлюючи свою динаміку з початком весняного потоку [5].

Річка належить до басейну річки Прип'ять, будучи її правою притокою першого порядку. Витоки річки розташовані на півночі села Садівські Дубини, на висоті 241 м. над рівнем моря. Турія протікає через три адміністративні райони Волині: Володимир-Волинський, Ковельський та Камінь-Каширський.

Досліджуваний водозбірний басейн річки Турія розташований на заході України, переважно в північно-західній частині Волинської області, зокрема охоплює Поліську низовину та частину Волинської височини (Рис. 1). Турія впадає в річку Прип'ять і межує з водозбірними басейнами інших річок: на сході – з річками Стохід і Цир, на півдні – з Лугою, на заході – з річками Луга та Вижівка, а на півночі – з річкою Прип'ять. Річка Прип'ять, в свою чергу, є частиною басейну річки Дніпро, яка впадає в Чорне море. [5].

Обчислена площа водозбірного басейну річки Турія становить 3055,70 км², а загальна довжина її водотоків досягає 5738,39 км. Крайня північна точка басейну розташована на північних околицях села Щитинь, де річка Турія впадає в Прип'ять. Крайня південна точка водозбору розташована на півночі села Садівські Дубини, де і витікає річка Турія. Єдиним містом на території водозбору є Ковель. Досліджувана область характеризується активно розвинутою сільськогосподарською діяльністю та високою щільністю населення в сільських районах [27, 29].

У цьому дослідженні для отримання точних карт змін ландшафтів з 10-річними інтервалами було застосовано класифікацію з відповідним масштабом, що дозволяє параметризувати різноманітні типи ландшафтів. Для цього використано потужний інструмент Google Earth Engine, який об'єднує величезні обсяги супутникових знімків і геопросторових даних, надаючи

можливість виконувати аналіз на глобальному рівні. Ця платформа стала надійним помічником для вчених і дослідників, які використовують її для виявлення змін, картографування глобальних тенденцій та вимірювання різноманітних змін на земній поверхні [16].

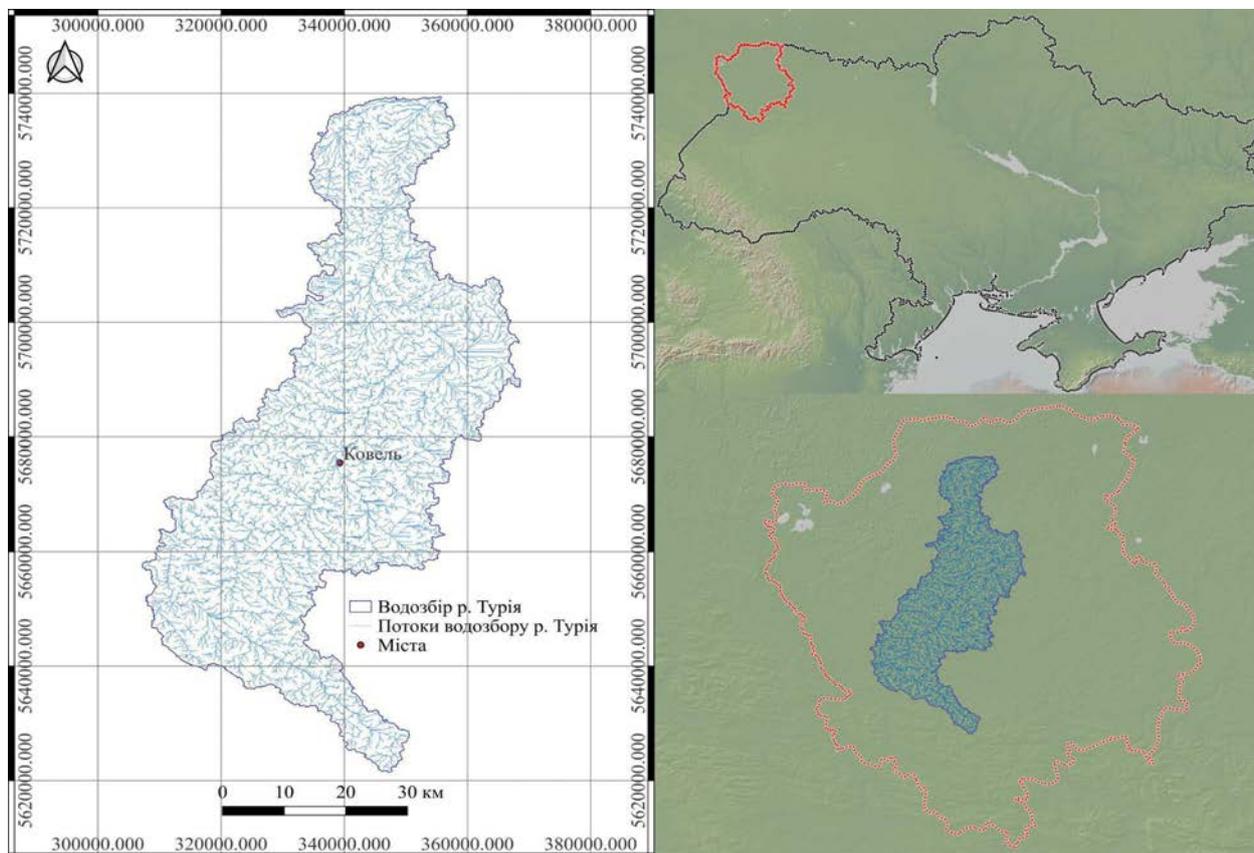


Рис. 1. Територія дослідження: Водозбір річки Турія. Україна з виділеним фрагментом Волинської області; Волинська область з виділеним фрагментом водозбору річки Турія
Дані та попередня обробка

Супутникові зображення Landsat 7 є важливим джерелом високоякісної інформації для досліджуваного регіону на задані часові проміжки. Платформа Landsat була вибрана через свою здатність забезпечувати безперервні дані на протязі довгих періодів часу. Для аналізу змін ландшафтів між 2000 та 2020 роками використовувались три ключові часові кроки: 2000, 2010 та 2020 рік (див. Табл. 1).

Таблиця 1

Супутникові сцени використані для трьох часових кроків

| Часовий крок | Часовий проміжок | Супутниковий сенсор | Геометрична роздільна здатність |
|--------------|------------------|---------------------|---------------------------------|
| 2000 | 01.05-01.06 | Landsat-7 | 30×30 |
| 2010 | 01.05-01.06 | Landsat-7 | 30×30 |
| 2020 | 01.05-01.06 | Landsat-7 | 30×30 |

Кожен часовий проміжок представлений сценою на період місяця травня, який характеризуються найменшою хмарністю та найменшою кількістю опадів. Для якісної класифікації ландшафтів усі супутникові зображення виправлені на атмосферу та мають географічну прив'язку та просторову роздільну здатність 30×30 м. [18, 30, 33].

Як додаткове джерело даних, сцени Google Earth Pro використовуються для отримання наземних правдивих завіркових даних, особливо для часового кроку 2000 року.

Процес класифікації супутникових знімків Landsat 7 у Google Earth Engine

Використання бінарних дерев рішень для класифікації є непараметричним підходом до розпізнавання образів. Дерево рішень забезпечує ієрархічне представлення простору ознак, в якому x_i вибірки розподілені по класах w_j ($j = 1, 2, \dots, k$) відповідно до результату, отриманого в результаті виконання рішень, прийнятих в послідовності вузлів, в яких гілки дерева розходяться. Тип дерева рішень, що використовується в даній роботі, докладно розглядається в роботі [17], внесок якої був узагальнений в алгоритм CART (Classification And Regression Trees).

Цей підхід полягає в тому, що дерева можуть бути використані не тільки для класифікації об'єктів на дискретне число груп, але і як альтернативний підхід до регресійного аналізу, при якому значення змінної відповіді (залежної) повинно оцінюватися з урахуванням значення кожної змінної в наборі пояснювальних (незалежних) змінних. Бінарні дерева рішень складаються з множинного поділу простору ознак на два підпростори, з кінцевими вузлами, пов'язаними з класами w_j . Бажане дерево рішень - це дерево, яке має відносно невелику кількість гілок, відносно невелике число проміжних вузлів, від яких ці гілки розходяться, і високий поріг прогнозування, при якому об'єкти правильно класифікуються на кінцевих вузлах.

CART передбачає виявлення та побудову бінарного дерева рішень на основі вибірки тренувальних даних, для яких відома правильна класифікація. Число об'єктів в двох підгрупах, визначених на кожному двійковому розділі, що відповідають двом гілкам, що виходять з кожного проміжного вузла, послідовно зменшується, так що для отримання хороших результатів потрібна досить велика навчальна вибірка.

Дерево рішень починається з кореневого вузла t , з якого виходить змінна в просторі ознак мінімізує ступінь домішки двох пов'язаних вершин. Використовуючи визначення, наведене в [25], міра домішки у вузлі t , що позначається $i(t)$, має вигляд, як показано в наступному рівнянні (1),

$$i(t) = - \sum_{j=1}^k p(w_j | t) \log p(w_j | t) \quad (1)$$

де $p(w_j | t)$ - частина паттернів x_i , віднесена до класу w_j по вершині t .

Потім кожна некінцева вершина розбивається на дві наступні вершини, t_L і t_R , так що p_L , p_R є частками сутностей, переданих новим вершинам t_L і t_R , відповідно. Найкращим поділом є той, який максимізує різницю, наведену в (2):

$$\Delta i(s, t) = i(t) - p_L i(t_L) - p_R i(t_R) \quad (2)$$

Дерево рішень росте шляхом послідовних поділів до тих пір, поки не буде досягнута стадія, на якій не відбувається значного зниження ступеня домішки з подальшим додатковим поділом s . При досягненні цієї стадії вершина t не ділиться далі і автоматично стає кінцевою вершиною. Клас w_j , пов'язаний з кінцевим вузлом t , є класом, який максимізує умовну ймовірність $p(w_j | t)$.

Основним джерелом актуальної інформації щодо наявних класів ландшафтів та землекористувань на місцевості були польові дослідження у 2020 році на території Камінь-Каширського та Ковельського районів, а саме в селах: Щитинь, Тойкут, Бузаки та безпосередньо у місті Ковель на території яких наявні усі розглянуті в дослідженні класи ландшафтів.

Таблиця 2

Схема класифікації ландшафтів [2, 3, 4]

| Клас ландшафту | Опис класу |
|---|---|
| 1 | 2 |
| 0 - (В) відкриті водойми | Відкриті водойми (наземні води) поділяються на природні (річки, озера) і штучні (водосховища, канали); |
| 1 - (ПЗ) підтоплені (заболочені) території | Заболочені території - це надмірно зволожені ділянки, що розташовані у зоні надмірного зволоження на понижених елементах рельєфу або на слабо дренованих, вирівняних, плоских територіях, а також на окраїнах боліт з вологолюбною трав'яною рослинністю. |
| 2 - (СГ) сільськогосподарські землі (відкритий ґрунт) | Сільськогосподарські угіддя, які систематично обробляються і використовуються під посіви сільськогосподарських культур. |
| 3 - (СЗ) сільськогосподарські землі (зелений покрив) | Сільськогосподарські угіддя, які вкриті зеленим покривом. Пасовища – земельні угіддя вкриті багаторічною трав'яною рослинністю і систематично використовуються для випасання худоби. Сіножаті – земельні угіддя вкриті багаторічною трав'яною рослинністю, які систематично використовуються для сінокосіння. |
| 4 - (К) кущі | Кущі (чагарники) – земельні ділянки, які не входять до лісового фонду, зайняті полезахисними лісовими смугами, іншими захисними або озеленювальними деревно-чагарниковими насадженнями, деревами або групами дерев на землях сільськогосподарських підприємств. |

| Клас ландшафту | Опис класу |
|----------------------------|---|
| 1 | 2 |
| 5 - (Л) ліси | Лісові землі – це земельні ділянки покриті лісом, включаючи лісові культури, що зімкнулися. |
| 6 - (П) пустощі | Пустощі – згарища або зруби, які більше 10 років знаходяться в безлісому стані. Зруби – площі, на яких деревостан вирубаний, а молоді дерева не зімкнулися. Території на яких яскраво виражені відсутність будь-якого покриву безрослинні або сильно деградовані землі і зазвичай мають високу концентрацію пісків. |
| 7 - (У) урбанізовані землі | Урбанізована місцевість – це місцевість, частина (ділянка), район території з усіма її компонентами (населеними пунктами, об'єктами архітектури та промисловості, соціально-культурними спорудами та шляхами сполучення). |

Таблиця 3

Кількість полігонів вибірки для різних часових кроків при обробці супутникових зображень Landsat-7 в Google Earth Engine для оцінки точності

| | 2000 | 2010 | 2020 |
|---|-----------------------------|------|------|
| Клас ландшафту | Кількість полігонів вибірки | | |
| 0 - (В) відкриті водойми | 8 | 13 | 15 |
| 1 - (ПЗ) підтоплені (заболочені) території | 3 | 3 | 2 |
| 2 - (СГ) сільськогосподарські землі (відкритий ґрунт) | 17 | 9 | 34 |
| 3 - (СЗ) сільськогосподарські землі (зелений покрив) | 6 | 5 | 14 |
| 4 - (К) кущі | 3 | 4 | 8 |
| 5 - (Л) ліси | 7 | 9 | 24 |
| 6 - (П) пустощі | 1 | 2 | 6 |
| 7 - (У) урбанізовані землі | 10 | 6 | 16 |
| Кількість елементів вибірки | 3014 | 3493 | 4544 |

Оцінка точності

При виконанні контрольованої класифікації можуть виникати різноманітні помилки, зумовлені спектральною схожістю між класами або помилками користувача при визначенні областей інтересу. Для оцінки точності класифікації земельного покриву та вимірювання похибок отриманих зображень було проведено відповідні дослідження. Одним із найпоширеніших методів оцінки точності є розрахунок матриці похибок [12], що передбачає порівняння класифікованих даних з контрольними для відповідної кількості одиниць класифікації. З отриманої матриці похибок визначають загальну точність класифікації, яка є відношенням правильно класифікованих елементів до загальної кількості елементів вибірки.

Для перевірки класифікації була застосована оцінка точності з використанням 30% контрольних точок. Еталонні значення, що вводяться дослідником, базуються на даних, що підтверджують достовірність земельного

покриву. У цьому контексті точність виробника враховує помилки пропуску, що виникають через неповне відображення спостережуваного аспекту на місцевості, яка не була класифікована на карті. Точність користувача оцінює помилки пропуску і можливість віднесення пікселя до певної категорії. Використання даних Landsat 7 з просторовою роздільною здатністю 30 м дозволяє здійснювати розрахунки для мінімальної площі 0,337 га.

Матриця похибок була розрахована для оцінки точності класів землекористування та земельного покриву, зокрема, за допомогою чотирьох статистичних показників точності: загальної точності (OA), точності виробника (PA), точності користувача (UA) та коефіцієнта Карра (κ). Найбільш репрезентативним з них є загальна точність (OA). За результатами проведеної оцінки точності, загальна точність класифікації, виконаної за допомогою класифікатора SmileCART, склала 99,72%, що підтверджує високу ефективність алгоритму та ретельний вибір контрольних ділянок [1].

Висновки

У результаті виконаної класифікації отримано детальні растрові зображення, в яких кожен піксель набув чіткої ідентичності відповідно до свого класу, візуалізованого у вибраній колірній палітрі. Використовуючи розроблену методику та навчальні вибірки на основі попередніх досліджень [1], вдалося здійснити контрольовану класифікацію території водозбірного басейну річки Турія в середовищі Google Earth Engine (GEE), а фінальне оформлення та аналіз проведено у QGIS.

Результати класифікації дозволяють простежити трансформації ландшафтів упродовж 2000, 2010 та 2020 років, що графічно відображено на Рис. 3 у системі координат WGS 84 | UTM zone 35N. В основі аналізу лежать супутникові знімки Landsat-7, які забезпечили можливість оцінки змін у структурі земельного покриву.

Виявлення змін ландшафтів на основі отриманої інформації

Динаміка трансформацій ландшафтів розкрита через порівняльний аналіз площ окремих класів, що дозволяє не лише виявити зміни, а й зробити висновки щодо тенденцій розвитку території. Ці зміни представлені у вигляді графічних матеріалів, що забезпечують наочне сприйняття просторових процесів (див. Рис. 2).

Таблиця 5

Результати зміни ґрунтового покриву між 2000, 2010 та 2020 роками у %

| Рік\Клас ландшафту | В | ПЗ | СГ | СЗ | К | Л | П | У |
|--------------------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|
| 2000 | 0,70 | 0,85 | 39,16 | 11,72 | 8,05 | 34,18 | 0,42 | 4,92 |
| 2010 | 0,51 | 1,10 | 26,04 | 18,52 | 8,18 | 43,10 | 0,09 | 2,48 |
| 2020 | 0,69 | 1,01 | 32,85 | 16,01 | 7,78 | 38,56 | 0,32 | 2,77 |

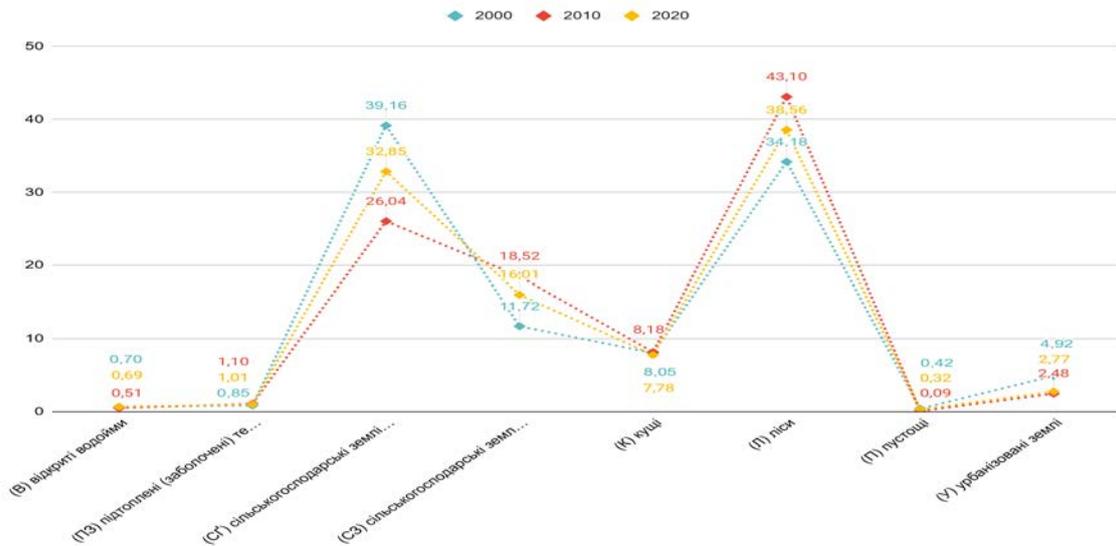


Рис. 2. Графік результатів зміни ґрунтового покриття між 2000, 2010 та 2020 роками у %

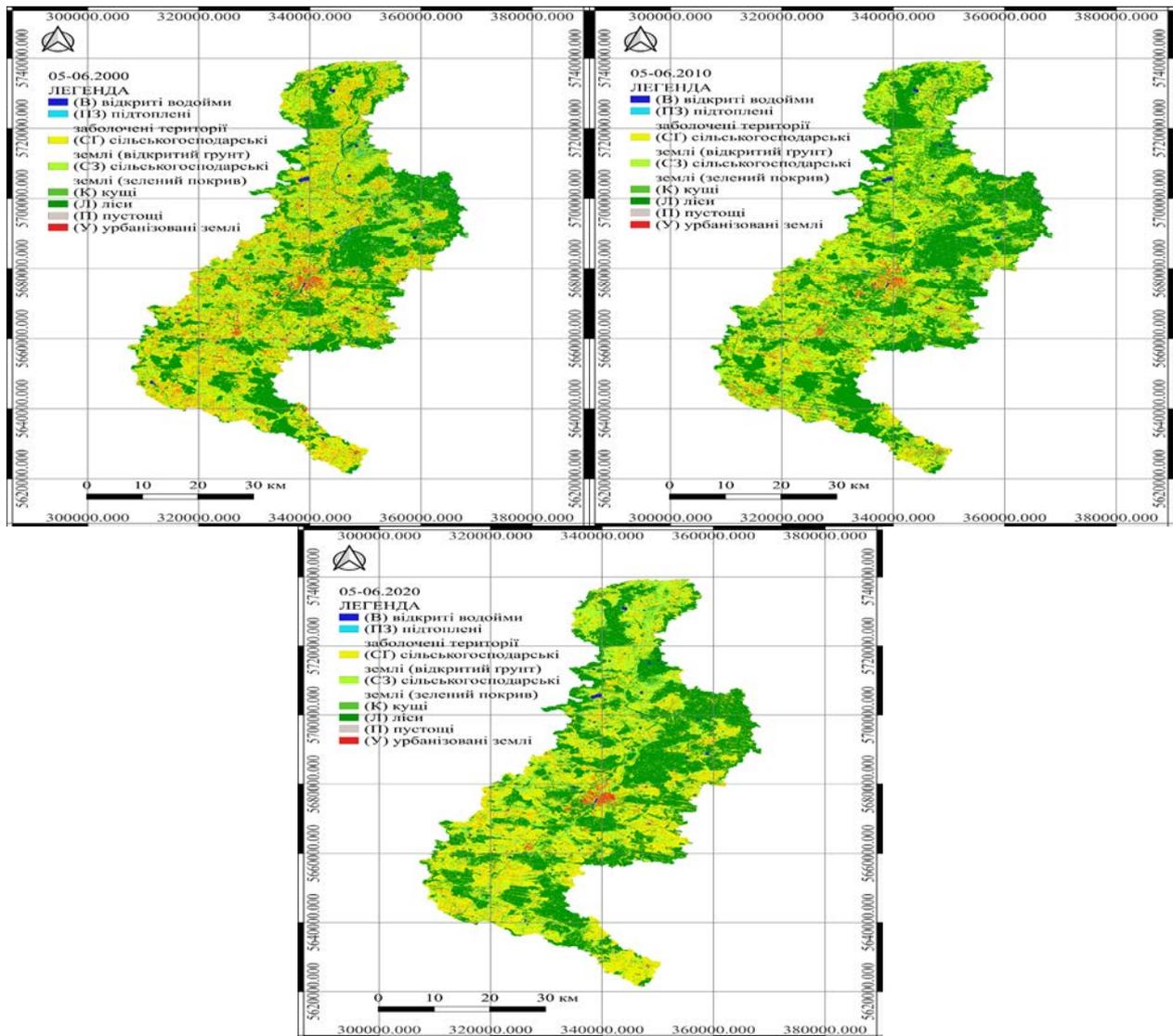


Рис. 3. Результати контрольованої класифікації в GEE водозбору р. Турія на 2000, 2010 та 2020 рік відповідно (система координат WGS 84 | UTM zone 35N)

Дистанційний моніторинг є одним із найефективніших методів детального аналізу змін ландшафтів, що дозволяє розробляти стратегії контролю, збереження природного балансу та охорони навколишнього середовища в регіоні. Динаміка змін ландшафтів у межах усіх виділених класів представлена на картографічних матеріалах (див. Рис. 3).

Площі (С1) сільськогосподарських земель (відкритого ґрунту) зменшуються з 2000 року з сумарних 39,16% до 32,85% на 2020 рік. Площі (В) відкритих водойм можна вважати сталими оскільки за 20 років відбулась лише незначна зміна з 0,70% до 0,69%; території (С3) сільськогосподарських земель (зеленого покриву) збільшуються з 2000 року з сумарних 11,72% до 16,01% на 2020 рік. Загальну картину площ сільськогосподарських угідь можна вважати сталою, оскільки (С1) сільськогосподарські землі (відкритого ґрунту) та (С3) сільськогосподарські землі (зеленого покриву) найбільше взаємозаміняють одна одну з урахуванням сівозмін і сумарно для трьох часових кроків площі в даних типах ландшафтів у відсотках складають на 2000 рік - 50,88%, на 2010 рік - 44,56% та на 2020 рік - 48,86%. Площі лісів зазнали незначних змін в сторону зростання з 34,18% до 38,56% з 2000 по 2020 рік. Зростання площ лісів спостерігалось у проміжку між 2000 та 2010 роками з 34,18% до 43,10%. Із дослідження помітно, що території пустощів (П) спадають.

Площа земель вкритих (К) кущами в основному також залишається сталою. Сильна систематична зміна відбувається між (С1) сільськогосподарськими землями (відкритого ґрунту) та (С3) сільськогосподарськими землями (зеленого покриву), а також між (Л) лісами та (К) кущами, що можна побачити на Senkey-діаграмах (Рис. 4, 5, 6).

Значні зміни спостерігаються навколо населених пунктів оскільки площі (У) урбанізованих земель значно зменшились з 4,92% у 2000 році до 2,77% у 2020 році, що спричинено розформуванням колгоспних господарств, та зменшення виробничого потенціалу регіону. Багато територій під (С3) сільськогосподарськими землями (зеленого покриву) було перетворено на (С1) сільськогосподарські землі (відкритого ґрунту) для ведення особистого господарства, що в порівнянні можна побачити на супутникових сценах 2000 і 2010 року (Рис. 3). Інші систематичні зміни для категорії сільськогосподарських земель (С1) (відкритого ґрунту) полягають у тому, що вона систематично перетворюється в основному на (С3) сільськогосподарські землі (зеленого покриву) на (Л) ліси та на (К) кущі, щодо категорії (С3) сільськогосподарських земель (зеленого покриву) - то вона в основному змінюється на сільськогосподарські землі (С1) (відкритого ґрунту) та на (Л) ліси (Табл. 6).

Таблиця 6

Динаміка зростання/спадання площ ландшафтів

| Крок в роках | 2000-2010 | 2000-2010 | 2010-2020 | 2010-2020 |
|---|---------------------|------------------|---------------------|------------------|
| Клас ландшафту | Δ % 10 років | Δ % 1 рік | Δ % 10 років | Δ % 1 рік |
| (В) відкриті водойми | -0,19 | -0,02 | +0,18 | +0,02 |
| (ПЗ) підтоплені (заболочені) території | +0,25 | +0,03 | -0,09 | -0,01 |
| (СГ) сільськогосподарські землі (відкритий ґрунт) | -13,12 | -1,31 | +6,82 | +0,68 |
| (СЗ) сільськогосподарські землі (зелений покрив) | +6,79 | +0,68 | -2,50 | -0,25 |
| (К) кущі | +0,12 | +0,01 | -0,39 | -0,04 |
| (Л) ліси | +8,91 | +0,89 | -4,53 | -0,45 |
| (П) пустощі | -0,33 | -0,03 | +0,23 | +0,02 |
| (У) урбанізовані землі | -2,44 | -0,24 | +0,29 | +0,03 |

Дослідження трансформацій ландшафтів у межах водозбірного басейну річки Турія дозволило отримати важливі статистичні дані, що свідчать про суттєві зміни у просторі та структурі ландшафтів досліджуваного регіону. Аналіз і практичне застосування отриманих результатів можуть сприяти оптимізації використання природних ресурсів та забезпеченню їх раціонального управління.

Для більш наочного відображення ландшафтних змін було сформовано матриці (Табл. 7, 8, 9) та Senkey-діаграми переходів (Рис. 4, 5, 6).

Таблиця 7

**Матриця переходів класів ландшафтів на основі результатів
контрольованої класифікації в ГЕЕ водозбору р. Турія між 2000 та 2010
роком відповідно**

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|-------|-------|--------|--------|--------|---------|------|-------|
| 0 | 10539 | 1020 | 1490 | 520 | 575 | 9299 | 5 | 168 |
| 1 | 439 | 943 | 2587 | 771 | 1946 | 22061 | 5 | 39 |
| 2 | 1418 | 12948 | 527035 | 313512 | 146750 | 273686 | 1875 | 52285 |
| 3 | 430 | 4756 | 108728 | 172876 | 44641 | 61491 | 218 | 4809 |
| 4 | 306 | 4179 | 98512 | 61985 | 35707 | 70781 | 130 | 1851 |
| 5 | 3782 | 11530 | 59544 | 36936 | 31838 | 1013813 | 214 | 2938 |
| 6 | 33 | 60 | 8614 | 2699 | 1544 | 392 | 83 | 834 |
| 7 | 236 | 1870 | 77523 | 39348 | 14681 | 11699 | 535 | 21157 |

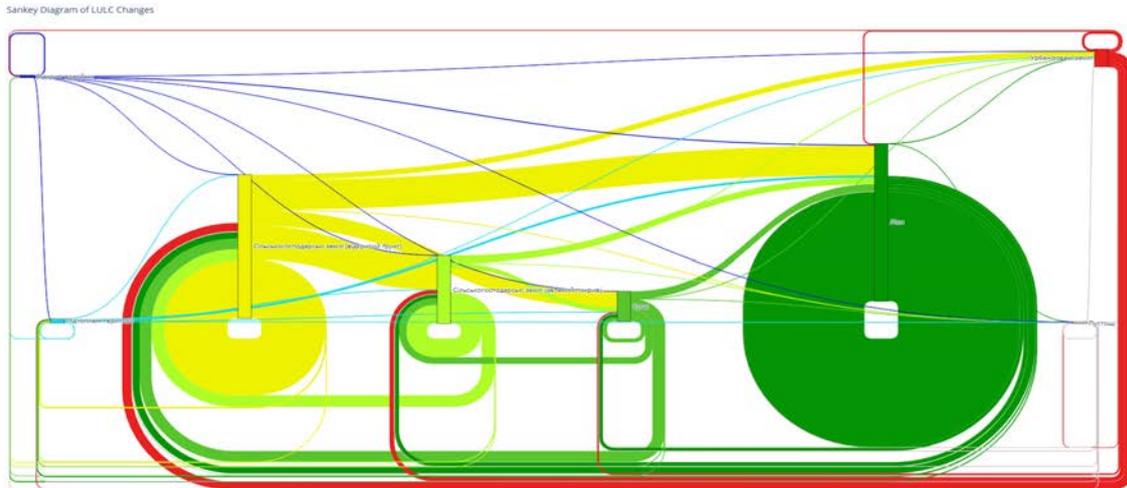


Рис. 4. Sankey-діаграма переходів класів ландшафтів на основі результатів контрольованої класифікації в GEE водозбору р. Турія між 2000 та 2010 роком відповідно

Таблиця 8

Матриця переходів класів ландшафтів на основі результатів контрольованої класифікації в GEE водозбору р. Турія між 2010 та 2020 роком відповідно

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|------|-------|--------|--------|-------|---------|------|-------|
| 0 | 9662 | 63 | 1695 | 563 | 282 | 4342 | 27 | 549 |
| 1 | 739 | 263 | 9891 | 4328 | 3014 | 17697 | 106 | 1268 |
| 2 | 1681 | 7109 | 482551 | 145520 | 83056 | 116537 | 5589 | 41990 |
| 3 | 2146 | 12485 | 287973 | 227659 | 49877 | 31757 | 2135 | 14615 |
| 4 | 822 | 4057 | 120407 | 52860 | 34369 | 56374 | 1049 | 7744 |
| 5 | 8188 | 9852 | 153999 | 102676 | 91925 | 1081358 | 1664 | 13560 |
| 6 | 5 | 32 | 1994 | 223 | 47 | 104 | 133 | 527 |
| 7 | 73 | 270 | 56966 | 9853 | 1723 | 1169 | 309 | 13718 |

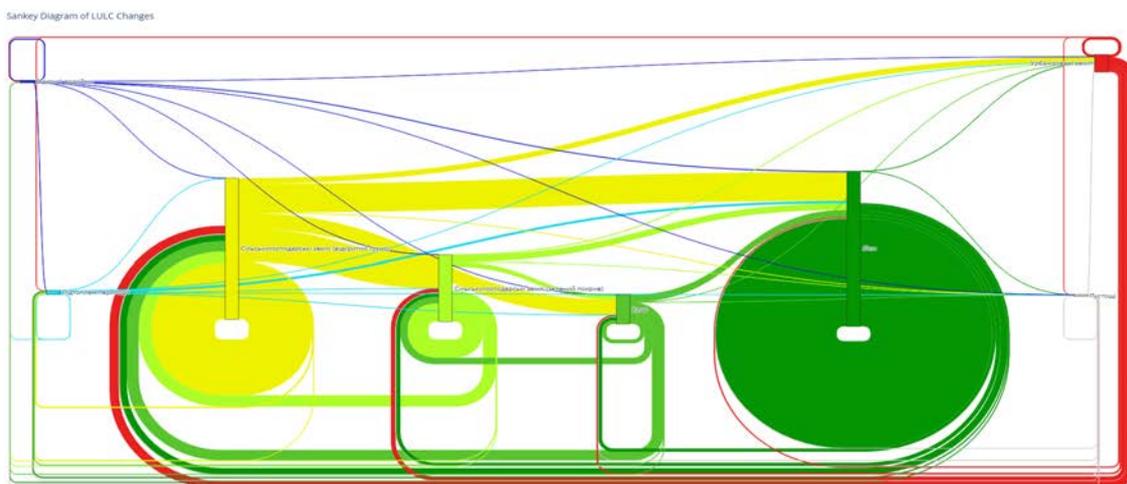


Рис. 5. Sankey-діаграма переходів класів ландшафтів на основі результатів контрольованої класифікації в GEE водозбору р. Турія між 2010 та 2020 роком відповідно

Таблиця 9

Матриця переходів класів ландшафтів на основі результатів контрольованої класифікації в GEE водозбору р. Турія між 2000 та 2020 роком відповідно

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|-------|-------|--------|--------|--------|--------|------|-------|
| 0 | 11600 | 186 | 2538 | 1537 | 903 | 5892 | 19 | 941 |
| 1 | 559 | 129 | 2311 | 1919 | 2091 | 21274 | 25 | 483 |
| 2 | 4055 | 17170 | 650737 | 262295 | 126369 | 214527 | 6452 | 47904 |
| 3 | 1399 | 8003 | 152134 | 131947 | 38895 | 53744 | 1335 | 10492 |
| 4 | 750 | 3389 | 94585 | 49522 | 34068 | 83187 | 875 | 7075 |
| 5 | 4581 | 4258 | 105014 | 66392 | 52878 | 917207 | 1265 | 9000 |
| 6 | 19 | 33 | 9966 | 1908 | 556 | 940 | 237 | 600 |
| 7 | 353 | 963 | 98191 | 28162 | 8533 | 12567 | 804 | 17476 |

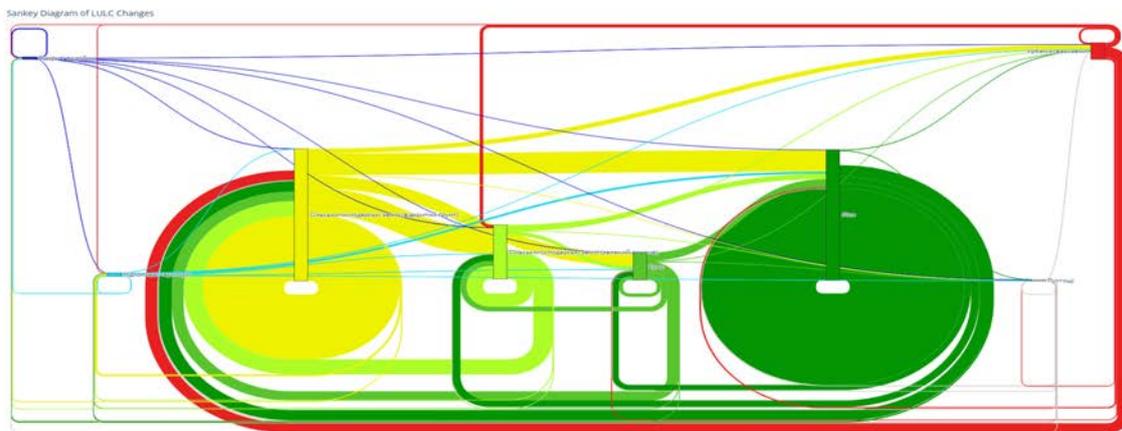


Рис. 6. Sankey-діаграма переходів класів ландшафтів на основі результатів контрольованої класифікації в GEE водозбору р. Турія між 2000 та 2020 роком відповідно

Комплексне дослідження статистичних даних щодо змін земної поверхні у досліджуваному регіоні на різні часові проміжки дозволяє оцінити масштаби впливу людської діяльності на природні екосистеми. Просторові трансформації ландшафтів можуть бути зумовлені як кліматичними так і антропогенним чинниками. Отримані дані моніторингу є цінною основою для розробки стратегій раціонального природокористування, контролю за змінами довкілля та впровадження ефективних заходів з охорони природи. Це особливо важливо для території водозбірного басейну річки Турія оскільки раніше такого роду дослідження регіону не проводились, а також для забезпечення екологічної рівноваги Волинської області в цілому.

Рекомендації подальшого дослідження. Подальші дослідження в цьому напрямку сприятимуть глибшому розумінню взаємозв'язку між природними процесами та людською діяльністю, що, своєю чергою, дозволить запобігти можливим екологічним проблемам, пов'язаним із нераціональним використанням природних ресурсів.

Список використаних джерел:

1. Денисюк В., Мельник О. Дистанційний моніторинг змін землекористувань у межах водозбору річки Стохід. *Географічний часопис Волинського національного університету імені Лесі Українки*. 2024. № 4. С. 138–150.
2. Загальна гідрологія /За ред. В.К. Хільчевського і О.Г. Ободовського: Підручник. – 2-ге вид., доповнене. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2008. 399 с. 3.
3. Паньків З.П. Земельні ресурси: Навч. посібник. – Видавн. центр ЛНУ імені І. Франка. Львів, 2008. 272 с.
4. Перелік угідь згідно з Класифікацією видів земельних угідь (КВЗУ) URL:<https://shels.com.ua/document.htm?doc=471>. (дата звернення: 24.01.2025).
5. Турія (притока Прип'яті) В Вікіпедія. URL:[https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%83%D1%80%D1%96%D1%8F_\(%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%BE%D0%BA%D0%B0_%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BF%27%D1%8F%D1%82%D1%96\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%83%D1%80%D1%96%D1%8F_(%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%BE%D0%BA%D0%B0_%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BF%27%D1%8F%D1%82%D1%96)). (дата звернення: 24.01.2025).
6. Armenteras, D., Rodríguez, N., Sua, S., & Romero, M. (2005). Patterns and causes of deforestation in the Colombian Amazon. *Ecological Indicators*, 6, 353. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.03.014>. (дата звернення: 24.01.2025).
7. Begum, S., Ophra, S. J., Hossain, A., Ferdous, M. T., & Rafid, F. A. (2024). Land Cover Change using GIS and RS Techniques of the Padma River Floodplain in the Three Adjacent Districts in Bangladesh. *Jagannath University Journal of Science*, 10(1), 43–54. <https://doi.org/10.3329/jnujsci.v10i1.71249>. (дата звернення: 24.01.2025).
8. Bradshaw, J., Hoelscher, P., & Richardson, D. (2007). An Index of Child Well-Being in the European Union. *Social Indicators Research*, 80. <https://doi.org/10.1007/s11205-006-9024-z>. (дата звернення: 24.01.2025).
9. Burmeister, C., & Schanze, J. (2016). Retrospective Analysis of Systematic Land-Cover Change in the Upper Western Bug River Catchment, Ukraine. *ACC Journal*, 22(1), 7–18. <https://doi.org/10.15240/tul/004/2016-1-001>. (дата звернення: 24.01.2025).
10. Debnath, J., Das (Pan), N., Ahmed, I., & Bhowmik, M. (2017). Channel migration and its impact on land use/land cover using RS and GIS: A study on Khowai River of Tripura, North-East India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(2), 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.01.009>. (дата звернення: 24.01.2025).
11. Dwivedi, R.S., Sreenivas, K., & Ramana, K.V. (2005). Cover: Land-use/land-cover change analysis in part of Ethiopia using Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(7), 1285–1287. <https://doi.org/10.1080/01431160512331337763>. (дата звернення: 24.01.2025).
12. Ee.Classifier.confusionMatrix | Google Earth Engine | Google for Developers. <https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-classifier-confusionmatrix>. (дата звернення: 24.01.2025).

13. Fan, F., Weng, Q., & Wang, Y. (2007). Land Use and Land Cover Change in Guangzhou, China, from 1998 to 2003, Based on Landsat TM /ETM+ Imagery. *Sensors*, 7(7), 1323–1342. <https://doi.org/10.3390/s7071323>. (дата звернення: 24.01.2025).
14. Geist, H.J., & Lambin, E.F. (2002). Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation. *BioScience*, 52(2), 143. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0143:PCAUDF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0143:PCAUDF]2.0.CO;2). (дата звернення: 24.01.2025).
15. Geist, H., McConnell, W., Lambin, E. F., Moran, E., Alves, D., & Rudel, T. (2006). Causes and Trajectories of Land-Use/Cover Change. В E.F. Lambin & H. Geist (Ред.), *Land-Use and Land-Cover Change* (с. 41–70). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-32202-7_3. (дата звернення: 24.01.2025).
16. Google Earth Engine. URL:<https://earthengine.google.com..> (дата звернення: 24.01.2025).
17. Gordon, A.D., Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R.A., & Stone, C.J. (1984). Classification and Regression Trees. *Biometrics*, 40(3), 874. <https://doi.org/10.2307/2530946>. (дата звернення: 24.01.2025).
18. Griffiths, P. (2013). Utilizing the depth of the Landsat archive to reconstruct recent land change in the Carpathian ecoregion [doctoral Thesis, Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II]. <https://doi.org/10.18452/16827>. (дата звернення: 24.01.2025).
19. Krasovskiy, H.Ya., Shumeiko, V.O., Klochko, T.O., & Sementsova, N.I. (2018). Information technologies for monitoring the environmental consequences of amber production in Ukraine. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*, 2(18), 107–117. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2018-2\(18\)-107-117](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2018-2(18)-107-117) (дата звернення: 24.01.2025).
20. Lambin, E.F., & Geist, H. (Ред.). (2006). *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts*. Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-32202-7>. (дата звернення: 24.01.2025).
21. Lambin, E.F., Turner, B.L., Geist, H.J., Agbola, S.B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Coomes, O.T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P.S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E.F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P.S., Richards, J.F., ... Xu, J. (2001). The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11(4), 261–269. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3). (дата звернення: 24.01.2025).
22. Manandhar, R., Odeh, I., & Ancev, T. (2009). Improving the Accuracy of Land Use and Land Cover Classification of Landsat Data Using Post-Classification Enhancement. *Remote Sensing*, 1. <https://doi.org/10.3390/rs1030330>. (дата звернення: 24.01.2025).
23. Manandhar, R., Odeh, I.O.A., & Pontius, R.G. (2010). Analysis of twenty years of categorical land transitions in the Lower Hunter of New South Wales, Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 135(4), 336–346. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.10.016>. (дата звернення: 24.01.2025).

24. Mahmood, R., Pielke Sr, R., Loveland, T., & Mcalpine, C. (2015). Climate Relevant Land Use and Land Cover Change Policies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97, 150421134152009. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00221.1> (дата звернення: 24.01.2025).
25. McLachlan, & J., G. (1992). Discriminant analysis and statistical pattern recognition. (p. 129–167) <https://doi.org/10.1002/0471725293>. (дата звернення: 24.01.2025).
26. Nations, F. and A.O. of the U., & Programme, U.N.E. (1999). *The Future of Our Land: Facing the Challenge*. <https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/32745>. (дата звернення: 24.01.2025).
27. Pluntke, T., Pavlik, D., & Bernhofer, C. (2014). Reducing uncertainty in hydrological modelling in a data sparse region. *Environmental Earth Sciences*, 72(12), 4801–4816. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3252-3>. (дата звернення: 24.01.2025).
28. Pontius, R.G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101(2–3), 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>. (дата звернення: 24.01.2025).
29. Schanze, J., Trümper, J., Burmeister, C., Pavlik, D., & Kruhlov, I. (2012). A methodology for dealing with regional change in integrated water resources management. *Environmental Earth Sciences*, 65(5), 1405–1414. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1311-6>. (дата звернення: 24.01.2025).
30. Seegert, J., Berendonk, T.U., Bernhofer, C., Blumensaat, F., Dombrowsky, I., Fuehner, C., Grundmann, J., Hagemann, N., Kalbacher, T., Kopinke, F.-D., Liedl, R., Leidel, M., Lorz, C., Makeschin, F., Markova, D., Niemann, S., Röstel, G., Schanze, J., Scheifhacken, N., ... Krebs, P. (2014). Integrated water resources management under different hydrological, climatic and socio-economic conditions: Results and lessons learned from a transdisciplinary IWRM project IWAS. *Environmental Earth Sciences*, 72(12), 4677–4687. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3877-2>. (дата звернення: 24.01.2025).
31. Silva Leal, R.S.L., Almeida, N.V., & Silva, M.D.D. (2023). Impacts of changes in land cover and land use on the hydrological cycle of the Tapuio River sub-basin/AL. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 13(4), 497–511. <https://doi.org/10.29150/jhrs.v13.4.p497-511>. (дата звернення: 24.01.2025).
32. Sleeter, R., Sleeter, B.M., Williams, B., Hogan, D., Hawbaker, T., & Zhu, Z. (2017). A carbon balance model for the great dismal swamp ecosystem. *Carbon Balance and Management*, 12(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s13021-017-0070-4>. (дата звернення: 24.01.2025).
33. Takada, T., Miyamoto, A., & Hasegawa, S.F. (2010). Derivation of a yearly transition probability matrix for land-use dynamics and its applications. *Landscape Ecology*, 25(4), 561–572. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9433-x>. (дата звернення: 24.01.2025).
34. Turner, M.G., & Gardner, R.H. (2015). *Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2794-4>. (дата зв.: 24.01.2025).
35. Uhl, A., Melnyk, O., Melnyk, Y., Manko, P., Brunn, A., & Fesyuk, V. (2024). Remote sensing monitoring of changes in forest cover in the Volyn region: A cross section for the

first two decades of the 21st century. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series «Geology. Geography. Ecology», 60, Article 60. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-19>. (дата звернення: 24.01.2025).

36. Winterbottom, S.J. (2000). Medium and short-term channel planform changes on the Rivers Tay and Tummel, Scotland. *Geomorphology*, 34(3–4), 195–208. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(00\)00007-6](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(00)00007-6). (дата звернення: 24.01.2025).

Denysiuk Viktor, PhD, Associate Professor **Melnyk Oleksandr**,
Lesya Ukrainka Volyn National University

THE REMOTE MONITORING OF CHANGES IN LAND USE WITHIN THE BOUNDARIES OF THE TURIIA RIVER CATCHMENT

The study presents a comprehensive analysis of changes in wetland landscapes within the Turia River basin in Volyn, focusing on their impact on the sustainable development of the region and ecological balance. The use of innovative GIS approaches and remote sensing technologies not only allowed for the mapping of the structure and spatial distribution of landscapes but also facilitated the construction of transition matrices between different landscape types, revealing the patterns of their dynamics. To visualize these processes, transition matrices were calculated and Sankey diagrams were created, clearly demonstrating transitions between various landscape classes, contributing to a better understanding of the scale and nature of the changes. Special attention was paid to the environmental challenges associated with landscape changes, particularly the reduction of natural ecosystem areas that play a crucial role in maintaining biodiversity and water balance. The proposed adaptive strategies for landscape management include measures for conserving natural resources, restoring degraded areas, and monitoring the impact of anthropogenic factors. Thanks to the high-precision classification performed in the Google Earth Engine environment using the SmileCART algorithm, an analysis accuracy of 99.72% was achieved, which is a significant accomplishment for modern environmental research. The results provide new opportunities for effective monitoring, enabling detailed analysis of landscape dynamics over time and space. This study also highlights the importance of integrating innovative tools to ensure the sustainable development of the region and minimize the negative impacts of climate change on natural complexes.

Keywords: geoinformation systems; remote sensing of the Earth; Google Earth Engine; QGIS; Sankey Diagram; land cover; catchment basin; Turia river.

REFERENCES:

1. Denysiuk V., Melnyk O. The remote monitoring of changes in land use within the boundaries of the Stokhid river catchment. *Geographical Journal of the Lesya Ukrainka Volyn National University*. 2024. No. 4. P. 138–150. {in Ukrainian}.
2. Khilchevskyi V.K., Obodovskyi O.H. (ed.) (2008) *General hydrology: Textbook – 2nd edition., supplemented*. Kyiv University Publishing and Printing Center. Kyiv, 399 p. - ISBN 978-966-439-016-0. {in Ukrainian}.
3. Pankiv Z.\P. (2008). *Land resources: Study guide*. – Ivan Franko LNU Publishing Center. Lviv, 272 p. {inUkrainian}.
4. List of lands according to the Classification of Types of Land (CTL). <https://shels.com.ua/document.htm?doc=471>. {in Ukrainian}. (date of access: 24.01.2025).
5. Turiia (tributary of the Prypiat) In Wikipedia. [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%83%D1%80%D1%96%D1%8F_\(%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%BE%D0%BA%D0%B0_%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BF%27%D1%8F%D1%82%D1%96\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%83%D1%80%D1%96%D1%8F_(%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%BE%D0%BA%D0%B0_%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BF%27%D1%8F%D1%82%D1%96)). {in Ukrainian}. (date of access: 24.01.2025).
6. Armenteras, D., Rodríguez, N., Sua, S., & Romero, M. (2005). Patterns and causes of deforestation in the Colombian Amazon. *Ecological Indicators*, 6, 353. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.03.014>. {in English} (date of access: 24.01.2025).
7. Begum, S., Ophra, S.J., Hossain, A., Ferdous, M.T., & Rafid, F.A. (2024). Land Cover Change using GIS and RS Techniques of the Padma River Floodplain in the Three Adjacent Districts in Bangladesh. *Jagannath University Journal of Science*, 10(1), 43–54. <https://doi.org/10.3329/jnujsci.v10i1.71249>. {in English} (date of access: 24.01.2025).
8. Bradshaw, J., Hoelscher, P., & Richardson, D. (2007). An Index of Child Well-Being in the European Union. *Social Indicators Research*, 80. <https://doi.org/10.1007/s11205-006-9024-z>. {in English} (date of access: 24.01.2025).
9. Burmeister, C., & Schanze, J. (2016). Retrospective Analysis of Systematic Land-Cover Change in the Upper Western Bug River Catchment, Ukraine. *ACC Journal*, 22(1), 7–18. <https://doi.org/10.15240/tul/004/2016-1-001>. {in English} (date of access: 24.01.2025).
10. Debnath, J., Das (Pan), N., Ahmed, I., & Bhowmik, M. (2017). Channel migration and its impact on land use/land cover using RS and GIS: A study on Khowai River of Tripura, North-East India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(2), 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.01.009>. {in English} (date of access: 24.01.2025).

11. Dwivedi, R.S., Sreenivas, K., & Ramana, K.V. (2005). Cover: Land-use/land-cover change analysis in part of Ethiopia using Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(7), 1285–1287. <https://doi.org/10.1080/01431160512331337763>. {in English} (date of access: 24.01.2025).
12. Ee.Classifier.confusionMatrix | Google Earth Engine | Google for Developers. URL:<https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-classifier-confusionmatrix>. {in English} (date of access: 24.01.2025).
13. Fan, F., Weng, Q., & Wang, Y. (2007). Land Use and Land Cover Change in Guangzhou, China, from 1998 to 2003, Based on Landsat TM /ETM+ Imagery. *Sensors*, 7(7), 1323–1342. <https://doi.org/10.3390/s7071323>. {in English} (date of access: 24.01.2025).
14. Geist, H.J., & Lambin, E.F. (2002). Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation. *BioScience*, 52(2), 143. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0143:PCAUDF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0143:PCAUDF]2.0.CO;2). {in English} (date of access: 24.01.2025).
15. Geist, H., McConnell, W., Lambin, E.F., Moran, E., Alves, D., & Rudel, T. (2006). Causes and Trajectories of Land-Use/Cover Change. BE.F. Lambin & H. Geist (Ред.), *Land-Use and Land-Cover Change* (с. 41–70). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-32202-7_3. {in English} (date of access: 24.01.2025).
16. Google Earth Engine. URL:<https://earthengine.google.com>. (date of access: 24.01.2025).
17. Gordon, A.D., Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A., & Stone, C.J. (1984). Classification and Regression Trees. *Biometrics*, 40(3), 874. <https://doi.org/10.2307/2530946>. {in English} (date of access: 24.01.2025).
18. Griffiths, P. (2013). Utilizing the depth of the Landsat archive to reconstruct recent land change in the Carpathian ecoregion [doctoral Thesis, Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II]. <https://doi.org/10.18452/16827>. {in English} (date of access: 24.01.2025).
19. Krasovskyi, H.Ya., Shumeiko, V.O., Klochko, T.O., & Sementsova, N.I. (2018). Information technologies for monitoring the environmental consequences of amber production in Ukraine. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*, 2(18), 107–117. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2018-2\(18\)-107-117](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2018-2(18)-107-117). {in English} (date of access: 24.01.2025).
20. Lambin, E.F., & Geist, H. (Ред.). (2006). *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts*. Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-32202-7>. {in English} (date of access: 24.01.2025).

21. Lambin, E.F., Turner, B.L., Geist, H.J., Agbola, S.B., Angelsen, A., Bruce, J.W., Coomes, O.T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P.S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E.F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P.S., Richards, J.F., ... Xu, J. (2001). The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11(4), 261–269. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3). {in English} (date of access: 24.01.2025).
22. Manandhar, R., Odeh, I., & Ancev, T. (2009). Improving the Accuracy of Land Use and Land Cover Classification of Landsat Data Using Post-Classification Enhancement. *Remote Sensing*, 1. <https://doi.org/10.3390/rs1030330>. {in English} (date of access: 24.01.2025).
23. Manandhar, R., Odeh, I.O. A., & Pontius, R.G. (2010). Analysis of twenty years of categorical land transitions in the Lower Hunter of New South Wales, Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 135(4), 336–346. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.10.016> {in English} (date of access: 24.01.2025).
24. Mahmood, R., Pielke Sr, R., Loveland, T., & Mcalpine, C. (2015). Climate Relevant Land Use and Land Cover Change Policies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97, 150421134152009. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00221.1>. {in English} (date of access: 24.01.2025).
25. McLachlan, & J., G. (1992). Discriminant analysis and statistical pattern recognition. (p. 129–167) <https://doi.org/10.1002/0471725293>. {in English} (date of access: 24.01.2025).
26. Nations, F. and A.O. of the U., & Programme, U.N.E. (1999). The Future of Our Land: Facing the Challenge. <https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/32745>. {in English} (date of access: 24.01.2025).
27. Pluntke, T., Pavlik, D., & Bernhofer, C. (2014). Reducing uncertainty in hydrological modelling in a data sparse region. *Environmental Earth Sciences*, 72(12), 4801–4816. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3252-3>. {in English} (date of access: 24.01.2025).
28. Pontius, R.G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101(2–3), 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>. {in English} (date of access: 24.01.2025).
29. Schanze, J., Trümper, J., Burmeister, C., Pavlik, D., & Kruhlov, I. (2012). A methodology for dealing with regional change in integrated water resources management. *Environmental Earth Sciences*, 65(5), 1405–1414.

<https://doi.org/10.1007/s12665-011-1311-6>. {in English} (date of access: 24.01.2025).

30. Seegert, J., Berendonk, T.U., Bernhofer, C., Blumensaat, F., Dombrowsky, I., Fuehner, C., Grundmann, J., Hagemann, N., Kalbacher, T., Kopinke, F.-D., Liedl, R., Leidel, M., Lorz, C., Makeschin, F., Markova, D., Niemann, S., Röstel, G., Schanze, J., Scheifhacken, N., ... Krebs, P. (2014). Integrated water resources management under different hydrological, climatic and socio-economic conditions: Results and lessons learned from a transdisciplinary IWRM project IWAS. *Environmental Earth Sciences*, 72(12), 4677–4687. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3877-2>. {in English} (date of access: 24.01.2025).

31. Silva Leal, R.S.L., Almeida, N. V., & Silva, M.D.D. (2023). Impacts of changes in land cover and land use on the hydrological cycle of the Tapuio River sub-basin/AL. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 13(4), 497–511. <https://doi.org/10.29150/jhrs.v13.4.p497-511>. {in English} (date of access: 24.01.2025).

32. Sleeter, R., Sleeter, B.M., Williams, B., Hogan, D., Hawbaker, T., & Zhu, Z. (2017). A carbon balance model for the great dismal swamp ecosystem. *Carbon Balance and Management*, 12(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s13021-017-0070-4>. {in English} (date of access: 24.01.2025).

33. Takada, T., Miyamoto, A., & Hasegawa, S.F. (2010). Derivation of a yearly transition probability matrix for land-use dynamics and its applications. *Landscape Ecology*, 25(4), 561–572. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9433-x>. {in English} (date of access: 24.01.2025).

34. Turner, M.G., & Gardner, R. H. (2015). *Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2794-4>. {in English} (date of access: 24.01.2025).

35. Uhl, A., Melnyk, O., Melnyk, Y., Manko, P., Brunn, A., & Fesyuk, V. (2024). Remote sensing monitoring of changes in forest cover in the Volyn region: A cross section for the first two decades of the 21st century. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series «Geology. Geography. Ecology»*, 60, Article 60. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-19>. {in English} (date of access: 24.01.2025).

36. Winterbottom, S. J. (2000). Medium and short-term channel planform changes on the Rivers Tay and Tummel, Scotland. *Geomorphology*, 34(3–4), 195–208. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(00\)00007-6](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(00)00007-6). {in English} (date of access: 24.01.2025).