

О.О. Воронков, А.А. Євдокімов, К.О. Дубцов

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

ГЕОІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ ІНТЕНСИВНОСТІ ОПАДІВ

У роботі проаналізовано технологічні особливості побудови геоінформаційної моделі для дослідження інтенсивності опадів на території України. Опрацювання вихідних даних виконано за допомогою програмного засобу SAGA GIS, зокрема, проведено геообробку, обмеження даних адміністративними границями України, групування за сезонами та визначено розподіл інтенсивності опадів територією України.

Ключові слова: моделювання, інтенсивність опадів, база геоданих, геообробка, сезонність, програмні модулі, SAGA GIS.

Постановка проблеми

В останні десятиліття спостерігається дедалі відчутніша зміна кліматичних умов на планеті. Одним з найголовніших аспектів цих змін є розподіл інтенсивності опадів, дослідження якого важливе для кращого розуміння кліматичних процесів та розвитку стійких стратегій у різних галузях. Помітне виснаження водних ресурсів, спричинене зростанням впливу змін у кліматі, вимагає комплексного моніторингу стану навколишнього середовища та впровадження науково обґрунтованих заходів зі збереження та розвитку водних, а також пов'язаних з ними земельних та інших природних ресурсів. Розробка таких заходів вимагає попереднього аналізу з метою прогнозування екологічних ризиків і запобігання негативним наслідкам надзвичайних ситуацій, як-от катастрофічні повені, підтоплення територій, тривалі посухи, висихання водойм або гостра нестача питної води тощо.

Геоінформаційне моделювання інтенсивності опадів є процесом створення її просторового цифрового відображення на підставі географічної інформації. Подальший аналіз дає змогу отримати аналітичну інформацію щодо просторового розподілу інтенсивності опадів, виявлення територій з високим рівнем вразливості, прогнозування катастрофічних повеней тощо. Це забезпечить науково-інформаційну підтримку під час прийняття управлінських рішень у питаннях раціонального використання, відтворення та охорони природних ресурсів, а також зменшення впливу екологічних ризиків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Унаслідок зміни клімату в людства виникає низка гострих екологічних проблем, що стосується, зокрема, стану водних ресурсів та характеру опадів. Розв'язанню цих проблем приділяють увагу багато вітчизняних та зарубіжних дослідників.

Так, автори [1] стверджують, що доступність та

якість води залежать від кількості опадів: у разі значної кількості опадів запаси чистої води можуть навіть збільшитись, у протилежному разі запаси чистої води скорочуються, що має особливе значення для сільського господарства, муніципальних і промислових потреб та ін. Інтенсивність і тривалість опадів негативно впливає на якість води, забруднюючи водні об'єкти та створюючи повені, що може пошкодити інфраструктуру або перевантажити систему водопостачання.

У звіті [2] проведено оцінку можливих змін водних ресурсів України, спричинених змінами клімату. За прогнозними розрахунками через збільшення опадів водні ресурси зростатимуть на більшій частині території України, тільки на півдні та у Закарпатті – зменшаться. Але через інформаційну невизначеність опадів застосовувані для розрахунків водно-балансові моделі дають істотну невизначеність прогнозів. Отже, атмосферні опади є одним з важливих факторів впливу як на гідрологічний режим річок, так і на загальні обсяги водних ресурсів.

Згідно з монографією [3], кліматичні зміни збільшують частоту повеней та посух, що робить вразливим сільське господарство. Для запобігання наслідкам цих явищ потрібен аналіз динаміки кліматичних змін та просторового розповсюдження процесів деградації агроландшафтів, а також нові методи виявлення посушливих явищ. На думку авторів, для розв'язання завдань оптимізації вологозабезпеченості доцільне застосування сучасних геоінформаційних технологій і даних дистанційного зондування Землі, що зумовлене здатністю супутникових спостережень до оперативної екстраполяції даних на великі території і точністю оцінок розповсюдження негативних впливів на сільськогосподарські території.

Автори статті [4] визначили, що зміна клімату впливає на характер опадів, значно зрушує їх просторово-часову структуру, чим викликає проблеми для управління водними ресурсами і призводить

до економічних та інших втрат. Стале управління водними ресурсами потребує розуміння наслідків зміни клімату, тому в умовах невизначеності кліматичних змін та їх впливу на гідрологічний цикл доцільне моделювання та аналіз гідрокліматичних умов та екстремальних гідрологічних явищ.

У роботі [5] встановлено залежності між інтенсивністю, тривалістю і частотою опадів на території Південної Кореї. Прогноз передбачає істотне зростання інтенсивності опадів у більшості територій наприкінці поточного століття, а її просторовий розподіл відповідатиме мінливості клімату.

У документі [6] пропонується вимірювання змін у стані довкілля та визначення їх зв'язків з економічною системою. Для реєстрації цих відомостей розроблена Система еколого-економічного обліку (СЕЕО ЕО), яка є просторовою інтегрованою статистичною основою для організації біофізичної інформації. Призначення екосистемного обліку полягає у відстеженні змін у площі та стані екосистем, визначенні зв'язків цієї інформації з чинниками економічної та людської діяльності для оцінки внеску природи в економіку, визначення запасів окремих ресурсів та обліку витрат на екологічні заходи з метою отримання комплексної картини. Основою для прийняття рішень щодо обмеження наслідків зміни клімату, забезпечення сталого розвитку та збереження біорізноманіття має слугувати аналіз впливу економічної та іншої людської діяльності на довкілля. Екосистемний облік забезпечує отримання індикаторів сталого розвитку для підтримки інтегрованого еколого-економічного аналізу та екосистемних індексів для моніторингу біорізноманіття.

В аналітичній доповіді [7] зазначено, що український сегмент міжнародної інформаційної системи GEOSS передбачає моніторинг процесу реалізації цілей сталого розвитку шляхом оцінювання індикаторів сталого розвитку у соціально значущих областях. Індикатори для моніторингу сталого розвитку отримують із супутникових спостережень, що має низку переваг, зокрема, своєчасність статистичних результатів, а отже, зменшення за рахунок цього частоти обстежень, висока точність та забезпечення деталізації індикаторів. Визначено цілі, завдання та індикатори, які можна оцінити за супутниковими даними. Наприклад, індикатор «Рівень водного стресу: забір прісної води як частка наявних ресурсів прісної води» обчислюють за істотними змінними (EV) річкових потоків, озер, підземних вод та опадів. Для цього попередньо визначають продукт істотної змінної (EV Product), до якого відносять опади. Періодичність спостереження залежно від завдання має бути щомісячною або щодобовою, або кожні 3 години; вимоги до розрізнення становлять 25 км. Автори відзначають, що опрацювання великих обсягів даних та ефективність застосування супутнико-

вої інформації свідчать про досягнення нового технологічного рівня, що вимагає істотної модернізації геопросторових і статистичних систем.

Автори статті [8] вважають, що повноцінне впровадження системи еколого-економічного обліку обмежене недостатнім обсягом точних даних для індикаторів сталого розвитку та пропонують інтеграцію міжнародних процесів отримання та опрацювання даних та їх аналізу з використанням геоінформаційних систем для отримання додаткової інформації, яка потрібна для аналізу.

У статті [9] з метою спрощення пропонують універсальну типологію характеристик стану екосистем, яка ґрунтується на зрозумілих традиційних екологічних концепціях. Автори вважають, що ця нова типологія стану екосистем створить змістовну структуру звітності для рахунків стану екосистем, що сприятиме її стандартизації та широкому застосуванню.

Аналітичний документ [10] за результатами огляду європейського досвіду картування та оцінки екосистем визначає, що картування екосистем полягає насамперед у їх просторовому розмежуванні за певною типологією та залежить від мети й масштабу картування. Отже, картування надає інформацію про просторове поширення та є вихідною точкою для оцінювання стану кожної екосистеми. Інструмент картування та оцінки екосистемних послуг – це набір ГІС-інструментів, що має містити моделі різних екосистемних послуг для їх аналізу або для відстеження змін, спричинених змінами земної поверхні.

У роботі [11] відзначається значущість опадів для життя на Землі та пропонується використання методів штучного інтелекту для визначення зв'язків кліматичних змін з гідрологічними реакціями, а також для ефективнішого моделювання та прогнозування. Наведено приклад моделювання нелінійного зв'язку річкового стоку з метеорологічними явищами. Використання методів штучного інтелекту може сприяти розробці управлінських рішень та оптимальному екологічному плануванню.

Мета статті

Мета роботи полягає у створенні просторової моделі інтенсивності опадів на території України для визначення низки їх характеристик та вивчення динаміки за допомогою засобів геоінформаційного аналізу.

Виклад основного матеріалу

Основні властивості ландшафтної структури території України визначає її розташування переважно у помірному кліматичному поясі. За ландшафто-генетичним принципом на території України виділяють два класи ландшафтів: рівнинні і гірські. Клас рівнинних ландшафтів охоплює три великих фізико-географічних зони: лісостепову, зону змішаних лісів та степову зону. Зі свого боку, за ступенем

континентальності клімату і рельєфом вказані зони поділяють на провінції та на фізико-географічні області. До класу гірських ландшафтів входять Кримські гори та Українські Карпати. Мета такого розділення території полягає у забезпеченні науково обґрунтованого використання природних ресурсів та запровадженні відповідних природоохоронних заходів.

Лісостепова фізико-географічна зона охоплює територію від Передкарпаття до меж Середньоросійської височини, її протяжність становить 1100 км, а площа дорівнює 202 тис. км² (34 % території України). За даними минулих років [12] річний рівень опадів на заході зони становить 650 мм, на сході – 450 мм, зона характеризується ландшафтами лісостепового типу.

Зона змішаних лісів розташована у північній частині України і за природним ландшафтом є Українським Поліссям. Протяжність зони змішаних лісів із заходу на схід становить 750 км, площа – понад 113 тис. км² (19 % території України). Середній річний рівень опадів дорівнює 550–650 мм [12]. Ландшафти фізико-географічної зони змішаних лісів характеризуються великою зволоженістю і заболочуванням (понад 70 % земель), середня лісистість зони змішаних лісів становить 30 %.

Степова фізико-географічна зона охоплює південну і східну частини території України, простягається із заходу на схід майже на 1000 км. Площа степової фізико-географічної зони становить 240 тис. км² (40 % території України). Для степової фізико-географічної зони характерними є найменша зволоженість та найбільший тепловий потенціал, значна посушливість території і часта повторюваність посух, суховіїв, пилових бур та засоленість ґрунтів, особливо в південній смузі, що спричинює формування степових ландшафтів. Лісистість степової зони становить 3 %. Річна кількість опадів зменшується від 450 мм на півночі до 300–350 мм на півдні [12].

До зони Українських Карпат, окрім гір, належать Передкарпаття та Закарпатська низовина. Гори і передгір'я зволожуються надмірно. За рік в передгір'ях випадає 800–1000 мм, у горах – 1500–1600 мм опадів [12]. Надмірне зволоження і гірський рельєф сприяли розвитку розгалуженої гідрографічної мережі. Зона Українських Карпат є лісною територією України, де зосереджено 20 % площі її лісів.

Кліматологічні дослідження в Україні ведуться з кінця XIX – початку XX ст. Систематична публікація результатів кліматичних спостережень почалась у 1925 році з наукових праць про вивчення режиму атмосферних опадів та фундаментальних кліматичних карт [12]. У 50-ті роки були виконані кліматологічні розробки для будівництва каскаду гідроелектростанцій на Дніпрі, Південноукраїнського каналу та інших гідротехнічних споруд України, опубліковані кліматологічні характеристики основ-

них фізико-географічних зон України та наукові монографії. Зі змінами клімату через вплив природних та антропогенних факторів в Україні на початку 80-х років кліматичні дослідження відновились. Було розроблено нові методи вивчення коливань у кліматі, одержано неспростовні докази глобального потепління, що згладжується через особливості просторово-часового розподілу температурного поля планети. На початку 2000-х років розроблений «Кліматичний кадастр України», в якому враховано рекомендації Всесвітньої метеорологічної організації. Кліматичний кадастр містить величезний фактичний матеріал метеорологічних спостережень за період 1961–1990 років та екстремальні значення за весь період спостережень. У Кадастрі оновлено кліматологічні показники і представлено нові, які доповнюють і розширюють інформацію щодо режиму клімату України. Цей період часу визначений Всесвітньою метеорологічною організацією як стандартний, що відбиває сучасні кліматичні умови та рекомендований до застосування для об'єктивної характеристики сучасного клімату.

Розподіл атмосферних опадів на території України залежить від пересування повітряних мас, що визначається розміщенням областей високого та низького атмосферного тиску і характером рельєфу. З Атлантичного океану на територію України надходять вологі повітряні маси, що просуваються за напрямом із заходу й північного заходу на схід і південний схід, втрачаючи вологу. Отже, на рівнинній території середня річна кількість атмосферних опадів на північному заході та півночі становить 600–700 мм та зменшується на сході до 450–500 мм на рік і далі на півдні і південному сході – до 350 мм на рік. Найбільша середня річна норма випадає у горах, зокрема у Карпатах вона сягає 1000–1500 мм. Тип річного ходу атмосферних опадів континентальний з літнім максимумом у червні та липні й зимовим мінімумом у січні та лютому [12].

Головною вимогою багатьох завдань з дослідження природних ресурсів та явищ є оперативність отримання вихідних даних та їх постійне оновлення. Це питання сьогодні можна вирішити шляхом використання даних дистанційного зондування завдяки можливості вільного отримання результатів супутникових зйомок та швидкому розвитку геоінформаційних технологій [2, 3]. Дані дистанційного зондування, отримані зі штучних супутників Землі, мають растрову структуру. Істотною перевагою цих даних є можливість їх аналізу безпосередньо у растровому форматі без витрат часу на їх векторизацію, яка є складним у виконанні та трудомістким процесом. Зокрема у геоінформаційних системах, гідрологічні дані найчастіше застосовують у растровій формі, з якої можна отримати межі географічних об'єктів, інформацію про типи ґрунтів або про переважний вид рослинності на

досліджуваній території та ін. Джерелом вихідних матеріалів для геоінформаційних систем є також радарні знімки, отримані із SAR-супутників. Головна перевага радарних зйомок полягає у незалежності від часу та погоди, чутливості до нерівностей поверхні, вмісту вологи та можливості у певних випадках передавати інформацію про підповерхневі явища.

На сьогодні поряд із традиційною картографічною інформацією у геоінформаційних технологіях все ширше застосовують дані дистанційного зондування, що надходять, зокрема, із супутників [7]. Їх питома вага стійко зростає, що зумовлює потреба отримання актуальної оперативної інформації, яку спроможні задовольнити дані дистанційного зондування Землі. Але від різних супутникових систем надходять дані різних форматів, які зазвичай містять кілька растрових зображень, що отримані з різних вихідних датчиків та у різних спектральних діапазонах. Це ускладнює технологію їх опрацювання, а отже, зумовлює необхідність стандартизації обміну просторовими даними. Сьогодні задача конвертації один з одним різних форматів даних практично розв'язана для усіх форматів, але проблемною є практична реалізація єдиного стандарту для користувачів. Єдиний стандарт має з урахуванням структури файлів даних прописати протоколи обміну, набори функцій та параметрів функцій [2].

У растровій моделі даних просторова інформація закодована як прямокутна матриця за рядками і стовпцями, тож розташування кожної клітинки растра у просторі визначає номер стовпця і номер рядка. Під час растеризації зображень стовпці зазвичай розміщують у напрямі з півночі на південь, а рядки – із заходу на схід. Географічну прив'язку растрових зображень виконують за координатами x , y верхнього лівого кута растра та за розміром клітинок і кількістю рядків та стовпців. У растрових форматах файлів найчастіше застосовують квадратні клітинки, але іноді використовують клітинки трикутної або шестикутної форми. Трикутна растрова мозаїка придатна для моделювання тривимірних поверхонь. У шестикутній мозаїці, клітинки якої є рівними правильними шестикутниками, всі сусідні комірки еквідистантні, тобто в них постійна відстань між центрами шестикутних клітинок. Важливою перевагою растрових моделей просторових даних є поєднання семантичної і позиційної інформації. У структурі растрових даних клітинки растра зберігають значення тематичних атрибутів, якими можуть бути, наприклад, середнє значення висоти земної поверхні, концентрація забруднювальних речовин, температура, довжина гідрографічної мережі та ін. Крім тематичної інформації, растр може зберігати коефіцієнт відбиття світла поверхні або інтенсивність випромінювання в інфрачервоному або мікрохвильових частинах спектра тощо, але одночасно це спричинює істотний недолік растрів – вимогу до великої ємності пам'яті комп'ю-

тера. Растрові структури зручні для відображення ієрархічно організованої географічної інформації, до різновиду якої належать квадротомічні структури растрових даних, тобто квадродерева, в яких кожен вищий рівень є узагальненням інформації за чотирма клітинками нижчого рівня. Отже, квадродерево являє собою деревоподібний граф, ступінь вершини кожного вузла якого дорівнює 4, тобто розмір клітинки кожного вищого шару в 4 рази перевищує нижній. Використання квадротомічних структур растра забезпечує швидкий доступ до даних та істотну економію машинної пам'яті.

Для побудови просторової геоінформаційної моделі дуже важливим є вибір програмного забезпечення, за допомогою якого виконують моделювання та опрацювання вихідних даних, оскільки саме програмне забезпечення визначає ефективність розв'язання задачі [10]. На підставі вивчення, аналізу та порівняння функціональних можливостей та переваг низки програмних продуктів для організації та аналізу метеорологічної інформації як найбільш придатний було обрано програмний продукт SAGA GIS. Він безпосередньо спрямований на створення географічних баз даних та картографічних основ, на моделювання цифрових шарів та візуалізацію картографічних даних.

SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) є системою для автоматизованого геонаукового аналізу, розробленою для реалізації просторових алгоритмів. Програмний продукт SAGA GIS містить повний набір геофізичних методів аналізу, велику кількість опцій візуалізації та відкритий вхідний код. Перевагами SAGA GIS є наявність блоків для проведення розрахунків форм поверхні, освітлення, міграції речовин та енергії, а також наявність можливостей гідрологічного аналізу. У цій програмній системі наявні бібліотеки геостатистичного аналізу, наприклад, Geostatistics–Regression для оцінювання взаємозв'язків з використанням регресійного аналізу, а також бібліотека Simulation–Hydrology для гідрологічного моделювання, яка надає можливості симуляції поверхневого стоку, оцінювання складу ґрунтової вологи, вивчення особливостей перерозподілу стоку в невеликих басейнах [13]. Окрім простих загальноприйнятих операцій опрацювання даних, програмна система SAGA реалізує актуальні підходи до аналізу даних, а частина модулів поєднує сучасні аналітичні алгоритми.

Завдяки відкритості вихідного коду розширення системи можливе шляхом використання мови програмування Python та консольних скриптів. Аналогами SAGA вважаються системи GRASS та ILWIS, оскільки саме вони вміщують більшість алгоритмів та функціональних можливостей просторового аналізу.

У цій роботі для формування вихідних даних застосовано сайт Глобального центру кліматології опадів (Global Precipitation Climatology Centre – GPCC) Німецької метеорологічної служби Deutscher

Wetterdienst (DWD), яка здійснює короткочасний і довгостроковий запис, моніторинг, дослідження й оцінку метеорологічних процесів в атмосфері, її структурі та складі. Збір та аналіз даних DWD проводить за підтримкою Всесвітньої метеорологічної організації, що є спеціалізованою установою ООН. Всесвітня метеорологічна організація реалізує міжнародне співробітництво у питаннях стану та зміни атмосфери Землі, її взаємодії з сушею та океанами, погоди та клімату і розподілу водних ресурсів. Отримані з сайту GPCC дані є продуктом моніторингу щомісячної глобальної кількості опадів на поверхні суші. Ці дані отримують з бази даних станцій метеорологічних спостережень у кодовій формі у реальному часі та у складі місячного звіту передають перелік даних як щомісячне статистичне зведення у кодовій формі CLIMAT. Доступ до метеорологічних даних забезпечує Глобальна телекомунікаційна система (GTS) Всесвітньої метеорологічної організації через 2 місяці після місяця аналізу. Цей продукт містить місячні підсумки у звичайній сітці широти / довготи з просторовою роздільною здатністю $1,0^\circ \times 1,0^\circ$ та $2,5^\circ \times 2,5^\circ$.

Для аналізу застосовано дані з розміром растра 1 градус з часовим періодом – щомісячні дані за 2022 рік. Доступні для завантаження файли містять дані про опади, як-от їх загальний обсяг і розподіл за рідкими та твердими видами. Передусім дані растрових шарів підлягають геообробці, зокрема для них потрібно встановити систему координат. З цією метою застосований модуль програмного засобу SAGA GIS «Set Coordinate Reference System». Задані параметри датуму та координатної системи WGS84, обрані шари даних, для яких треба встановити систему координат. У результаті виконання процедури геообробки для всіх шарів даних про опади встановлено єдину систему координат WGS84.

Наступним кроком опрацювання вихідних даних виконано обрізку знімків для виокремлення потрібної території дослідження. Це покращить візуальне подання області дослідження і прискорить процеси опрацювання даних. Область вирізання знімка задається контурами іншого растрового або векторного шару. У нашому випадку для подальшої роботи потрібно обмежити дані адміністративними межами України, оскільки дослідженню підлягає розподіл інтенсивності опадів саме на цій території. Дані про межі України отримані із сайту, що містить інформацію про межі країн світу, «NaturalEarth» у формі shp-файлу. Обрізання даних виконано за допомогою модуля «Clip Grids (Interactive)» програмного засобу SAGA GIS шляхом зазначення системи координат шару адміністративних меж України WGS84 і шарів з даними про інтенсивність опадів. Встановлення єдиної системи координат WGS84 для усіх шарів геоінформаційної моделі дозволило ви-

рішити завдання щодо обмеження метеорологічних даних потрібною територією. Проте WGS84 є географічною системою координат, у якій застосовані кутові одиниці вимірювання координат, нульовий меридіан і датум. Зручнішими для виконання аналізу метеорологічних даних є системи координат, розроблені для плоскої поверхні. Ці системи координат описують географічне положення і форму просторових об'єктів за допомогою координат x та y , а у растрах – за допомогою рядків та стовпців.

Отже, для виконання аналізу метеорологічних даних географічну систему координат WGS84 перетворено на проєкційну. При виконанні цієї процедури як проєкційну систему координат обрано систему UTM 36N. Це декартова система координат, осі якої – східна та північна (E, N), одиниця виміру – метр. Зона використання розташована між 30° та 36° східної довготи у північній півкулі між екватором та 84° північної широти. До її меж належить багато країн, серед яких Україна. Для трансформації системи координат обрано модуль програмного засобу SAGA GIS «Coordinate Transformation», в опціях якого для всіх шарів з даними про опади зазначили систему координат WGS84 / UTM zone 36N. На цьому етапі, після виконання низки процедур, дані можна вважати підготовленими для проведення аналітичних досліджень.

Для проведення аналізу найперше дані були згруповані за сезонами, тобто отримано сумарну кількість опадів за кожним сезоном. Для виконання цієї процедури застосовано модуль «Grid Calculator», що дозволяє обчислити суму растрових даних за пікселями. У процесі групування даних за сезонами для вибору потрібних сезонних даних сформовано команду:

Zobjects (2022_01_p._2.2022_02_p._2.2022_12_p._2.)
(1)

та формулу для розрахунку суми даних за три зимові місяці:

$$g_1 + g_2 + g_3. \quad (2)$$

Результат розрахунку збережений з ім'ям Winter_All. Аналогічно опрацьовані дані для решти сезонів року.

Аналіз розподілу інтенсивності опадів у зимовий період показує, що найбільша кількість опадів припадає на західну частину України, а саме на територію Закарпаття, південь Львівської та захід Івано-Франківської областей, де її значення дорівнюють 211 мм/рік. Окрім того, велика інтенсивність опадів спостерігається у північній частині Сумської області (188 мм/рік), у Рівненській області (155 мм/рік), Житомирській (173 мм/рік) та Київській (182 мм/рік) областях. Визначається досить явно виражена частина

території від центру до південної частини України, на якій інтенсивність опадів взимку стало зменшується. Так, найменша інтенсивність опадів спостерігалась у Одеській (68 мм/рік), Миколаївській (73 мм/рік) та Херсонській (80 мм/рік) областях.

Протягом весни інтенсивність опадів розподілена таким чином. Найбільша інтенсивність опадів спостерігалась на півночі країни, а саме у Сумській (173 мм/рік) та Чернігівській (212 мм/рік) областях, а також на півночі Полтавської (173 мм/рік), Київської (154 мм/рік), Житомирської (149 мм/рік) областей, на північному заході Харківської області (161 мм/рік) та на Закарпатті (158 мм/рік). Менша інтенсивність опадів припала на Миколаївську область (67 мм/рік), захід Херсонської (89 мм/рік) та південь Одеської (88 мм/рік) і Хмельницької (79 мм/рік) областей.

Улітку найбільша інтенсивність опадів прийшла на захід та центр північної частини території України (213–231 мм/рік та 217 мм/рік, відповідно). Найменша інтенсивність опадів, що становила 121–80 мм/рік, прийшла на південно-східні та південно-західні території.

В осінньому періоді інтенсивність опадів була порівняно високою. Так, найбільша інтенсивність опадів спостерігалась на Закарпатті (280–248 мм/рік), на півдні Львівської області (248 мм/рік), на заході Івано-Франківської області (248 мм/рік), на півночі Київської області (245 мм/рік), у Житомирській області (237 мм/рік) та сході Луганської області (226 мм/рік). У центральній частині України восени спостерігалась більша інтенсивність опадів, ніж в інші сезони року. Найменша інтенсивність опадів припала на захід Запорізької (96–87 мм/рік) та схід Херсонської (100 мм/рік) областей. Привертає увагу чітко визначена територія з меншою інтенсивністю опадів у напрямку північних територій країни.

Для визначення частин території, на яких випадає найбільша кількість опадів, побудовано шар, що містить максимальні значення інтенсивності опадів. Для цього за допомогою модуля «Mosaicking» шляхом накладання растрових шарів один на одного здійснений вибір за максимальним значенням. Як результат, побудовано розподіл максимальної інтенсивності опадів за всіма сезонами року. Для цього у модулі «Grid Calculator» за допомогою відповідних формул визначили потрібні дані про максимальні значення за кожним сезоном. Результат моделювання розподілу максимальної інтенсивності опадів за сезонами року подано на рис. 1. Найбільша інтенсивність опадів мала місце в осінньому періоді року: вона покриває понад 50 % території України. Менша інтенсивність опадів спостерігалась у літньому періоді: покриває територію близько 40 %. У весняному періоді максимальна кількість опадів припадає на північ території країни та схід Запорізької області. Найменша кількість опадів у річному вимірі спостерігається взимку.

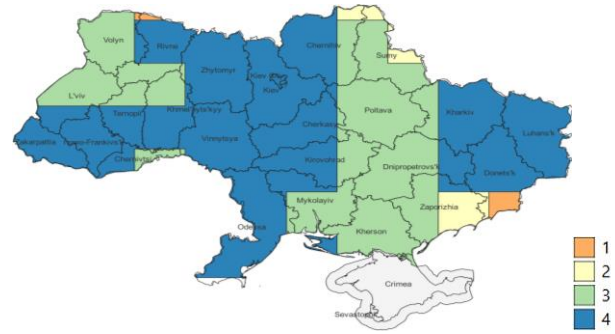


Рис. 1. Розподіл максимальної інтенсивності опадів за сезонами року: 1 – зима; 2 – весна; 3 – літо; 4 – осінь

На рис. 2 наведено розподіл інтенсивності опадів територією України за весь 2022 рік.

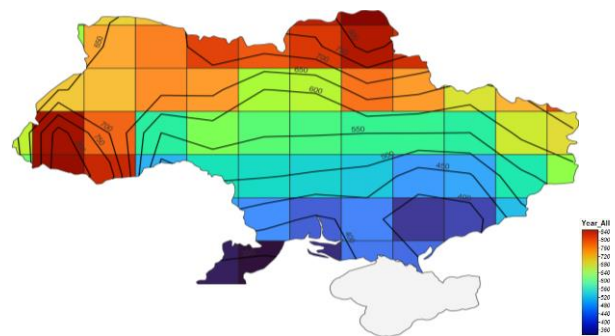


Рис. 2. Розподіл інтенсивності опадів у 2022 році

Найменша інтенсивність опадів мала місце у південній частині, що вказує на більш сухий клімат у цьому районі. Ця інформація корисна для вирішення питань сільського господарства, водопостачання та екосистем, що потребують достатньої кількості опадів для нормального функціонування. Низька інтенсивність опадів для ефективного управління водними ресурсами може вимагати запровадження певних заходів та розробки стратегій адаптації до посушливих умов. У північному та західному напрямках на карті спостерігається помірне зростання інтенсивності опадів. Це може вказувати на сприятливіші кліматичні умови в районах, де опади розподілені рівномірніше. Така інформація може бути важливою для планування сільськогосподарських угідь, водопостачання та розвитку інфраструктури у цих областях. Найбільша інтенсивність опадів, що відображається на карті, має місце у Карпатських горах та у північній частині України, що свідчить про значну кількість опадів, що випадають у цих районах. Ця інформація так само може мати важливе значення для біорізноманіття, гідрологічних процесів та водних систем, а також для різних галузей, наприклад, туризму та рекреації, пов'язаних із природними ресурсами цих гірських районів. Проведене порівняння отриманих з аналізу числових значень інтенсивності опадів у 2022 році (рис. 2) зі стандартними, що визначені Всесвітньою метеорологічною

організацією, показала відсутність істотних змін.

Загалом результати моделювання розподілу інтенсивності опадів подають цінну інформацію для розуміння кліматичних умов та їх впливу на навколишнє середовище і на людську діяльність у різних сферах. Ними можна скористатись як основою для розробки стратегій сталого розвитку, вжиття заходів для адаптації до змін клімату та оптимізації заходів щодо використання ресурсів певної території.

Висновки

У статті розглянуто технологію опрацювання гідрологічних даних, обґрунтовано вибір програмного забезпечення, а також виконано аналіз та інтерпретовано отримані результати.

Вивчено ландшафтну структуру території України та сформовано щомісячні вихідні дані за 2022 рік. За допомогою програмного продукту SAGA GIS метеорологічні дані були опрацьовані з метою підготовки їх до аналізу. Зокрема, дані було згруповано за сезонами та визначено розподіл інтенсивності опадів у кожному з періодів року, розподіл максимальної інтенсивності опадів за сезонами року, тобто визначено території, у яких інтенсивність опадів найбільша за сезонами, а також визначено частини території, на яких випадає найбільша кількість опадів. Порівняння отриманих з аналізу числових значень інтенсивності опадів у 2022 році зі стандартними, що визначені Всесвітньою метеорологічною організацією, показало відсутність істотних змін, що можна пояснити тим, що для порівняння застосували середні значення інтенсивності опадів. У подальшому викликає зацікавленість аналіз екстремальних значень інтенсивності опадів.

Проведене дослідження сприятиме розширенню знань про просторову варіабельність опадів та про фактори, що впливають на їх розподіл. Результати матимуть практичну значущість для різних сфер та для прийняття рішень щодо адаптації до змін клімату. Ними можна скористатись як для наукових досліджень, так і для практичних застосувань у галузях, пов'язаних з керуванням опадами та кліматичними змінами.

Література

1. The Effect of Climate Change on Water Resources and Programs [Електрон. ресурс] / Watershed Academy Web. – Електрон. текст. дані. – 2009. – Режим доступу: https://cfpub.epa.gov/watertrain/moduleFrame.cfm?parent_object_id=2469
2. Сніжко С. Аналіз впливу кліматичних змін на водні ресурси України / С. Сніжко, О. Шевченко, Ю. Дідовець. – Київ : Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2021. – 68 с.
3. Агроекологічний супутниковий моніторинг : монографія / О. Г. Тараріко, О. В. Сиротенко, Т. В. Ільєнко, Т. Л. Кучма ; Інститут агроекології і природокористування НААН. – Київ : Аграр. наука, 2019. – 204 с.
4. Xander Wang. The Impacts of Climate Change on the Hydrological Cycle and Water Resource Management / Wang Xander, Liu Lirong // Water. – 2023. – 15(13):2342.

<https://doi.org/10.3390/w15132342>

5. Doi M.V. Addressing Climate Internal Variability on Future Intensity-Duration-Frequency Curves at Fine Scales across South Korea / Manh Van Doi, Jongho Kim // Water. – 2021. – 13(20):2828. <https://doi.org/10.3390/w13202828>
6. System of Environmental-Economic Accounting Ecosystem Accounting Final Draft. Version 5 February 2021. – Regime of access: https://unstats.un.org/unsd/statcom/52nd-session/documents/BG-3f-SEEA-EA_Final_draft-E.pdf
7. Перспективи використання супутникової інформації для моніторингу досягнення цілей сталого розвитку України : аналітична доповідь [Електронний ресурс]. – Київ : Інститут космічних досліджень НАН України і ДКА України, 2020. – 88 с. – Режим доступу : <https://files.nas.gov.ua/PublicMessages/Documents/0/2020/12/201211203540797-7518.pdf>
8. Cerilli, S. A sustainability scoreboard for crop provision in Europe [Electronic resource] / S. Cerilli, A. La Notte, D. Pisani, S. Vallecillo, & F. N. Tubiello. – Electronic text data. – Ecosystem Services, 2020. – 46, 101194. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101194>
9. Czuć, B. A common typology for ecosystem characteristics and ecosystem condition variables [Electronic resource] / B. Czuć, H. Keith, A. Driver, B. Jackson, E. Nicholson & J. Maes. – Electronic text data. – One Ecosystem. – 2021. 6. e58218. <https://doi.org/10.3897/oneeco.6.e58218>
10. Екосистемні послуги та гідроенергетика: пілотне застосування європейських інструментів у річкових басейнах країн Східного партнерства. Кейс України : аналітичний документ / Р. Гаврилюк, О. Станкевич-Волосянчук, С. Савченко ; Національний екологічний центр України. – Електрон. текст. дані. – Київ, 2021. – 32 с. – Режим доступу: https://necu.org.ua/wp-content/uploads/2021/02/policy_ecosystem_services_ukraine_web.pdf
11. Visualization Techniques for Climate Change with Machine Learning and Artificial Intelligence [Electronic resource] / S. Sukanya, J. Sabu // Visualization Techniques for Climate Change with Machine Learning and Artificial Intelligence. – 2023. – P. 55-76. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99714-0.00008-X>
12. Кліматологічні дослідження та перспективи їх розвитку [Електрон. ресурс] / Український гідрометеорологічний центр Державної служби України з надзвичайних ситуацій : сайт – Електрон. текст. дані. – Київ, 2022. – Режим доступу: <https://www.meteo.gov.ua/ua/Klimatologichni-doslidzhennya>, вільний (дата звернення: 05.01.2024).
13. Батурінець А. Г. Огляд програмних засобів для аналізу та візуалізації гідрологічних даних / А. Г. Батурінець, С. В. Антоненко // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій. – 2019. – Т. 23. – С. 3-14. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/apatit_2019_23_3 (дата звернення: 10.05.2024).

References

1. The Effect of Climate Change on Water Resources and Programs / Watershed Academy Web. (2009). https://cfpub.epa.gov/watertrain/moduleFrame.cfm?parent_object_id=2469
2. Snizhko S., Shevchenko O., Didovets Yu. (2021). Analiz vplyvu klimatychnykh zmin na vodni resursy Ukrainy. Kyiv: Tsentr ekolohichnykh initsiatyv «Ekodii».
3. Tarariko O. H., Syrotenko O. V., Iliencko T. V., Kuchma T. L. (2019). Ahroekolohichni suputnykovyi monitorynh : monohrafiia ; Instytut ahroekolohii i pryrodokorystuvannia NAAN. Kyiv: Ahrar. nauka.
4. Xander Wang, Lirong Liu. (2023). The Impacts of Climate

- Change on the Hydrological Cycle and Water Resource Management. Water, (15(13)), 2342. <https://doi.org/10.3390/w15132342>
5. Doi M.V., Kim J. (2021). Addressing Climate Internal Variability on Future Intensity-Duration-Frequency Curves at Fine Scales across South Korea. Water, (13(20)):2828. <https://doi.org/10.3390/w13202828>
6. System of Environmental-Economic Accounting Ecosystem Accounting: Final Draft. Version 5. (2021). https://unstats.un.org/unsd/statcom/52nd-session/documents/BG-3f-SEEA-EA_Final_draft-E.pdf
7. Perspektyvy vykorystannia sputnykovoi informatsii dlia monitorynhu dosiahnennia tsilei staloho rozvytku Ukrainy : analitychna dopovid za rezultatamy vykonannia kompleksnoi prohramy NAN Ukrainy «Aerokosmichni sposterezhennia dovkillia v interesakh staloho rozvytku ta bezpeky yak natsionalnyi sehment proektu Horyzont-2020 ERA-PLANET» (ERA-PLANET/UA) u 2018-2020 rokakh. (2020). <https://files.nas.gov.ua/PublicMessages/Documents/0/2020/12/201211203540797-7518.pdf>
8. Cerilli, S., La Notte, A., Pisani, D., Vallecillo, S., & Tubiello, F. N. (2020). A sustainability scoreboard for crop provision in Europe. Ecosystem Services, 46, 101194. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101194>
9. Czúcz, B., Keith, H., Driver, A., Jackson, B., Nicholson, E., & Maes, J. (2021). A common typology for ecosystem characteristics and ecosystem condition variables. One Ecosystem, 6, e58218. <https://doi.org/10.3897/oneeco.6.e58218>
10. Havryliuk R., Stankevych-Volosianchuk O., Savchenko S. (2021). Ekosystemni posluhy ta hidroenerhetyka: pilotne zastosuvannia evropeiskyykh instrumentiv u rikhkovykh baseinakh krain Skhidnoho partnerstva. Keis Ukrainy: analitychnyi dokument. – Kyiv: Natsionalnyi ekolohichnyi tsentr Ukrainy.
11. Sukanya S., Sabu J. (2023). Visualization Techniques for Climate Change with Machine Learning and Artificial Intelligence. (Pages 55-76). ScienceDirect. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99714-0.00008-X>
12. Klimatolohichni doslidzhennia ta perspektyvy yikh

rozvytku. Ukrainskyi hidrometeorolohichnyi tsentr Derzhavnoi sluzhby Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii. (2022). <https://www.meteo.gov.ua/ua/Klimatolohichni-doslidzhennia>

13. Baturinets, A. & Antonenko, S. (2019). Overview of software for analysis and visualization of hydrological data. Actual problems of automation and information technology. 23. 10.15421/431901.

Рецензент: д-р екон. наук, проф. К.А. Мамонов, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

Автор: ВОРОНКОВ Олександрович
кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – oleksii.voronkov@kname.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6905-0098>

Автор: ЄВДОКИМОВ Андрій Анатолійович
кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – mariamyronenko87@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7538-8922>

Автор: ДУБЦОВ Кирило Олександрович
здобувач магістерського рівня освіти
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – kyrylo.dubtsov@kname.edu.ua

GEOGRAPHIC INFORMATION MODEL OF PRECIPITATION INTENSITY

O. Voronkov, A. Yevdokimov, K. Dubtsov

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The paper analyses the technological features of building a geoinformation model to study the precipitation intensity in Ukraine. Analysis of natural phenomena requires promptness in obtaining and updating initial data. For this reason, today, geoinformation technologies most often use remote sensing data, mainly in raster format. We collected the raw data on precipitation intensity from the Global Precipitation Climatology Centre website of the German Meteorological Service (DWD). It is monthly data for 2022 in raster format with a raster size of 1 degree.

For the organisation and analysis of geographical information, we chose the most suitable new software product, SAGA GIS, designed for geoscientific analysis automation. The advantages of this system are the availability of a complete set of geophysical analysis methods, the spatial algorithms implementation, and open-source code.

After data loading, we geoprocessed the data, in particular, using the SAGA software module 'Set Coordinate Reference System' and selected the WGS84 coordinate system for the required layers. To prepare the data for analytical studies, we limited them to the administrative boundaries of Ukraine and transformed the WGS84 coordinate system into a UTM 36N projection. Using SAGA analytical tools, we grouped the data by season. Then, we determined the distribution of precipitation intensity over the territory for each season, identifying areas with the highest and lowest precipitation intensity and a part of the territory with the highest annual precipitation.

The results of this work may have practical significance for various sectors of the economy and decision-making on adaptation to climate change. They can be relevant both for scientific research and practical application in fields related to environmental assessment.

By supplementing the model with data for other subsequent or previous periods, it will be possible to determine trends in precipitation intensity by regions of Ukraine or physiographic zones of its territory.

Keywords: modelling, precipitation intensity, geodatabase, geoprocessing, seasonality, software modules, SAGA GIS.