

УДК 551.588+ 551.581.1
PACS: 92.60.Ry+92.60.hf

ОСНОВНІ НАПРЯМКИ СУЧАСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЗАЄМОДІЇ КЛІМАТУ І ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ

Л. А. Писаренко¹, С. В. Краковська^{1,2}

¹Український гідрометеорологічний інститут ДСНС
України та НАН України, пр. Науки, 37, 03028, Київ, Україна,
² Державна установа Національний антарктичний науковий центр МОН України,
буль. Тараса Шевченка, 16, 01601, Київ, Україна
lolinal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2885-0213>

Метою дослідження є аналіз та оцінка існуючих методів вивчення взаємозв'язку між кліматом та підстильною поверхнею. Тип підстильної поверхні, у тому числі й землекористування, здійснює вплив на формування клімату через фізичні та хімічні властивості (альbedo, шорсткість, хімічний склад тощо). Клімат у свою чергу впливає на підстильну поверхню через метеорологічні параметри (температуру і вологість повітря, опади, вітер тощо) та спричиняє як циклічні, так і незворотні її зміни. Ці процеси підсилюються антропогенними факторами, які мають значний вплив на процеси взаємодії «підстильна поверхня-клімат» наприклад, через зміну типу землекористування, яка зазвичай призводить до додаткової емісії хімічних сполук. Виділено три основні сучасні напрямки досліджень взаємодії клімату та змін у землекористуванні/ підстильній поверхні, які реалізуються із залученням супутникових спостережень, використанням геоінформаційних систем та чисельного моделювання. Перший напрямок полягає у моніторингу й визначенні циклічних змін і трансформації підстильної поверхні під дією природних та антропогенних чинників за допомогою супутникового моніторингу та наземних метеорологічних спостережень із застосуванням ГІС. Незважаючи на значний технічний прогрес та велику кількість досліджень, що проводилися нещодавно для визначення динаміки змін підстильної поверхні за різні часові інтервали, досі залишаються проблеми з наявністю хмарності й затіненням від орографічних та інших об'єктів. Другий напрямок стосується вивчення впливу змін підстильної поверхні на хімічний склад повітря у граничному шарі атмосфери та регіональні кліматичні умови. Чимало досліджень присвячено впливу різних типів підстильної поверхні, таких як ліси, пасовища, поля, міське середовище тощо, на кліматичні характеристики, а також потоки речовин, наприклад, CO₂. Одним з складних та актуальних питань залишається вплив лісів помірних широт на клімат. Третій напрямок пов'язаний із моделюванням змін підстильної поверхні й регіональних кліматичних умов. За останнє десятиріччя просторова роздільна здатність моделей значно зросла і, як результат, представлення взаємодії між атмосферою та підстильною поверхнею значно покращилося. Проаналізовано основні проблеми та виклики сучасних досліджень взаємозв'язку клімату та підстильної поверхні, більшість із яких пов'язані із недосконалістю методів супутникового моніторингу та чисельного моделювання. Найперспективнішими визначено онлайн-інтегровані чисельні моделі атмосфери, які включають зворотні зв'язки між метеорологічними параметрами та хімічним складом атмосфери, на який, у тому числі, впливає підстильна поверхня як на глобальному, так і на регіональному рівнях. Однак, розрахунки деяких фізичних процесів в моделях потребують вдосконалення: трансформації радіаційних потоків, мікрофізика хмар, взаємодія хмара-аерозоль-опади і параметризації деяких типів підстильної поверхні та їх взаємодії з граничним шаром атмосфери.

Ключові слова: зміна клімату; природокористування; підстильна поверхня; граничний шар атмосфери; кліматична модель; супутниковий моніторинг; антропогенна діяльність

1. ВСТУП

Підстильна поверхня нарівні з сонячною радіацією та циркуляцією атмосфери є одним із трьох основних факторів формування клімату

[1]. Стан підстильної поверхні через особливості орографії та типу покриву впливає на радіаційний і тепловий баланси, розподіл опадів, деяких атмосферних явищ, вологості повітря,

швидкості й напрямку вітру безпосередньо в граничному шарі атмосфери (ГША), вертикальні межі якого змінюються залежно від форм рельєфу. Сніговий покрив, ґрунти, рослинність, зміна типу природокористування (наприклад, заміна лісів на посіви сільськогосподарських культур або пасовища) впливають на перерозподіл сонячної радіації та температури у ГША через альbedo, параметр шорсткості та евапотранспірацію, що являє собою сумарну кількість вологи, що випаровується з поверхні ґрунту, водної поверхні та рослин [1-5]. Більш того, зміни рослинного покриву безпосередньо впливають на вміст малих газових складових нижніх шарів атмосфери [6, 7].

Тип покриву змінюється під впливом природних чинників, таких як чергування пір року та тривалості світлового дня, зокрема, у помірних широтах. Ці фактори впливають на стан рослинності й зумовлюють чергування періоду спокою та вегетації.

Вагомим чинником трансформації підстильної поверхні є антропогенна діяльність, що проявляється через особливості природокористування, зміни співвідношення частки земель під різними видами господарської діяльності, а саме: зрошення та осушення земель, насадження та вирубка лісів, перетворення лісових масивів на сільськогосподарські угіддя або житлові масиви, створення водосховищ тощо [7, 8].

Таким чином, зміна підстильної поверхні відбувається в результаті сукупної дії як циклічних природних факторів, так і внаслідок зміни клімату та діяльності людини. Тобто, підстильна поверхня постійно впливає на клімат і, в той же час, постійно трансформується під впливом кліматичних змін та антропогенної діяльності, формуючи при цьому складні взаємозв'язки в екосистемі. Ці взаємозв'язки діють через різноманітні фізичні, хімічні та біологічні процеси [7, 9, 10].

На сучасному етапі розвитку науки проведення досліджень окремих фізичних процесів та механізмів бажано виконувати не лише на основі аналізу спостережень та даних вимірів, а й залучати новітні методи моделювання задля отримання оптимальної кількості інформації щодо фізичних процесів в атмосфері. Сучасні кліматичні й метеорологічні моделі базуються на вирішенні системи рівнянь гідро- та термодинаміки, складаються з багатьох окремих блоків, які готують вхідні дані, параметризують реальні фізичні процеси, представляють у графічному та інших форматах

результати моделювання [11-15].

Усі сучасні метеорологічні та кліматичні моделі, незалежно від мети використання, обов'язково потребують наявності параметрів, що описують підстильну поверхню (рельєф та тип покриву), а також різноманітні взаємозв'язки між змінами підстильної поверхні та метеорологічних характеристик. Найскладніші з моделей також включають блоки, що описують зміни хімічного складу атмосфери внаслідок, наприклад, викидів забруднюючих речовин та летких органічних сполук з природних й антропогенних джерел [12-16]. Тому використання чисельних моделей в останні десятиріччя призвело до актуалізації проведення експериментальних і теоретичних досліджень взаємозв'язків у системі «підстильна поверхня – біосфера – атмосфера» [12-21].

Мета оглядової статті полягає в аналізі сучасних підходів та найбільш актуальних напрямків дослідження взаємного впливу змін підстильної поверхні, хімічного складу атмосфери та кліматичних характеристик.

Сучасні дослідження взаємозв'язку клімату та підстильної поверхні проводяться у трьох основних напрямках:

- загальний моніторинг та дослідження змін підстильної поверхні, зумовлених природними чинниками й антропогенною діяльністю людини;
- дослідження впливу змін підстильної поверхні на вміст хімічних складових атмосфери і на регіональні кліматичні умови;
- моделювання змін підстильної поверхні та регіональних кліматичних умов у їх взаємозв'язку, у тому числі і для розробки оптимальних заходів планування господарської діяльності людини.

2. ЗАГАЛЬНИЙ МОНІТОРИНГ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ

Основні зміни підстильної поверхні в останні десятиріччя зумовлені як антропогенною діяльністю людини, в основному через зміни природокористування, так і кліматичними змінами, що також можуть трансформувати тип покриву [7, 17, 18]. Моніторинг таких змін реалізують із залученням наземних і супутникових вимірювань та із застосуванням геоінформаційних систем (ГІС). Це дозволяє практично у режимі реального часу проаналізувати зміни підстильної поверхні у просторі й часі та діагностувати природу цих

трансформацій [8, 19, 20].

Рушійною силою у дослідженнях взаємодії «підстильна поверхня – клімат» стало створення з 90-х років наземної мережі вимірювань FLUXNET. Мережа FLUXNET – комплекс сучасних станцій різних країн світу з розширеною програмою метеорологічних й актинометричних спостережень разом із вимірами різноманітних характеристик рослинності, у тому числі й фотосинтезу, та потоків окремих газів, аерозолів, пилу та інших домішок у системі «атмосфера-підстильна поверхня». Ці дані використовують як вхідну додаткову інформацію для доповнення метеорологічних і кліматичних моделей з метою якісного прогнозу і досліджень, наприклад, якості повітря [22].

Використання даних наземних та супутникових спостережень, а також чисельного моделювання і методів історичної реконструкції (з XVI ст.) , представлених у [18, 19], показали значний вплив змін підстильної поверхні на регіональні кліматичні умови і потоки хімічних сполук у ГША. При цьому найбільші трансформації підстильної поверхні виявлено у результаті змін саме у природокористуванні. Встановлено, що просторова неоднорідність 10-12 км вже є достатньою для формування мезомасштабної циркуляції, зокрема конвективних процесів. Тому урбанізація й постійне зростання розмірів міст суттєво впливають на мікрокліматичні та регіональні кліматичні особливості. Також за останні десятиріччя виявлено значне зменшення площі лісів як у результаті вирубки, так і кліматичних змін [7, 18, 19]. Використання супутників Landsat, Envisat, GLASS та MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Terra/Aqua, із залученням ГІС-інструментів дозволило оцінити приріст органічної речовини, зміни продуктивності рослин та їхньої біомаси [23].

Розвиток моніторингу та дослідження змін підстильної поверхні дозволив перейти до вивчення його впливу на колообіг води, вуглецю та тепла в атмосфері [23-26]. Зокрема, активно досліджувалися зміни індексу листкової поверхні, що відіграє важливу роль у потоках вологи та вуглекислого газу в атмосфері [23-25]. Верифікація різних алгоритмів розрахунків значень індексу листкової поверхні за супутниковими даними виявила, що деякі з них більше підходять для лісів, у той час як інші – для трав'яного покриву [23].

Для можливості вивчення та аналізу змін рослинного покриву, його впливу на клімат,

вдосконалення існуючих моделей, а також створення програм щодо розробки стратегій із адаптації та пом'якшення антропогенного впливу на кліматичну систему, зібрана та розроблена база даних за період 2008-2012 рр. з використанням супутникових даних MODIS/Terra (Aqua) з просторовою роздільною здатністю 0,05° з покриттям від 60°S до 80°N та з часовим кроком 1 місяць [27]. База даних MODIS [28] включає наступні параметри: альbedo, денна та нічна температура підстильної поверхні землі, довгохвильове випромінювання земної поверхні, прихований потік тепла, отриманий шляхом об'єднання даних рослинного покриву, альbedo, індекса листкової поверхні та частки поглиненої фотосинтетичної активної радіації. Отримана інформація комбінувалася з даними про короткохвильову відбиту радіацію й довгохвильове випромінювання земної поверхні супутника CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) з розмірною сіткою 1° і даними щорічної карти рослинного покриву, який включає дані за 1992-2015 [28]. Аналіз зазначених супутникових даних дозволив виділити 2 класи трансформації підстильної поверхні: 1 клас з 6 найбільш поширеними і 2 клас з 45 специфічними трансформаціями рослинного покриву [27].

У публікаціях [29-36] зроблено огляд можливих інструментів для моніторингу та методів інвентаризації лісу як різновиду підстильної поверхні за допомогою супутників Landsat за рядами даних з 1972 року. Зокрема, авторами в різних країнах визначалися таксаційні показники лісів: вік, висота, зімкнутість крон, визначення дефоліації; оцінку біомаси лісових насаджень та їх пошкодження; зміну підстильної поверхні на прикладі заростання лісом сільськогосподарських земель. Для верифікації встановлювався зв'язок між таксаційними показниками, що отримані з ділянки під сосною, та можливості їх дешифрування за допомогою знімків Landsat певних спектральних каналів, нормалізованого вегетаційного індексу (NDVI) та індексу вологості Wetness [29, 30, 35]. Індекс NDVI також використовується для оцінки біомаси лісу та ідентифікації ділянок придатних для відновлення лісу, а також його пошкоджень від різних чинників. Проведено картування лісових екосистем за допомогою верифікації супутникових зображень Landsat з певних спектральних каналів та наземних польових ділянок [29, 35, 36]. Ці супутникові дані

використовують як вхідну інформацію для багатьох моделей як кліматичних, так і моделей землекористування.

Проводилась оцінка зміни площ під посівами, лісами та містами для території Європейського союзу за допомогою карт, створених в рамках програми The coordinated information on the European environment (CORINE) та MODIS за період 1990-2006 рр. Встановлено, що загальна площа під посівами зменшилася в основному у Східній Європі внаслідок розширення території пасовищ. У той самий час, площа лісів зросла особливо у Західній та Південній Європі. Але найбільше в Європі зросла площа міст – на 16820 км² (21%) [37].

В Україні проводилася кількісна оцінка ймовірності виникнення посухи за допомогою даних супутників NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Створено карти небезпечності посухи та вразливості до неї шляхом оцінки ризиків посушливості за картою площ під сільськогосподарськими культурами та отриманими екстремальними значеннями індекса здоров'я рослинності [38]. Виконано класифікацію сільськогосподарських культур та побудовано карти для вегетаційного періоду за допомогою супутникових знімків на прикладі Київської області в рамках проекту JECAM (Joint Experiment for Crop Assessment and Monitoring). Для цього використано дані декількох супутників MODIS, Landsat-8, Proba-V, Spot-4,5, Radarsat, Sentinel-1 [39]. За допомогою відкритої бази даних різних супутників Google Earth Engine (GEE) проведено картування сільськогосподарських культур для тієї ж території [40], проте її можна використовувати для різноманітних задач.

За нормалізованим вегетаційним індексом NDVI за даними супутників NOAA бази Global Inventory Monitoring and Modeling System (GIMMS) визначалася динаміка змін підстильної поверхні для України за період 1982-2013 рр. Встановлювався взаємозв'язок індексу з такими змінними величинами як вологість ґрунту і середня місячна температура повітря та сума опадів з бази Climate Research Unit (CRU). Встановлено, що NDVI корелює з вологістю ґрунту в основному на сході України – 12% від загальної площі, з опадами у центральній частині України та на крайньому півдні, з температурою повітря цей зв'язок є найвищим та охоплює 31,5% території України. Найвища кореляція між NDVI і вологістю ґрунту виявлена для пасовищ та луків; найнижча – на ділянках під лісами між NDVI й опадами [41], вочевидь

через те, що опади можуть впливати на лісовий покрив із затримкою у часі.

За допомогою знімків високої роздільної здатності з використанням даних Geo-Wiki створено гібридну карту сільськогосподарських і покинутих земель колишнього СРСР до 2010 року на основі статистичних даних та попередніх досліджень [42].

3. ВПЛИВ ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ НА ВМІСТ ХІМІЧНИХ СКЛАДОВИХ АТМОСФЕРИ І НА РЕГІОНАЛЬНІ КЛІМАТИЧНІ УМОВИ

Емісія та вміст парникових газів в атмосфері, таких як діоксид вуглецю CO₂, метан CH₄, оксид азоту N₂O, що спричинюють зростання температури повітря та інші наслідки зміни клімату (перерозподіл опадів [43], хмарності [44], збільшення кількості та інтенсивності небезпечних гідрометеорологічних явищ [4] тощо), є предметом важливої уваги в тому числі і Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (МГЕЗК). В Узагальненому П'ятому звіті МГЕЗК поряд з інформацією про сучасні кліматичні зміни, що зумовлені в основному антропогенною діяльністю, та про проєкції цих змін на майбутнє до кінця ХХІ століття, оцінено їх вплив на навколишнє середовище та запропоновано стратегії щодо запобігання зміні клімату й адаптації до нього міст, прибережних територій, лісів тощо на найближчу і віддалену перспективу [45].

Результати досліджень потоків радіації в атмосфері дали відповідь на питання впливу пожеж у бореальних лісах на альbedo, що є вагомим кліматоутворювальним чинником. Оцінено ефекти впливу лісових пожеж на регіональні кліматичні умови на різних часових масштабах [46, 47]. Для оцінки викидів хімічних сполук в атмосферу створено бази даних із використанням супутників MODIS та біогеохімічної моделі Carnegie–Ames–Stanford Approach (CASA). Ця база даних містить інформацію з 1997 року про глобальну площу пожеж, емісії сполук вуглецю, що виділялися під час горіння, включаючи його суху частку [48].

У статті [49] за допомогою відповідних моделей та даних спостережень, які враховують не тільки гідрометеорологію, а й біогеохімічні процеси та біогеографію, описано вплив лісів тропічної, помірної і бореальної зон на кліматичні умови, а також зворотні зв'язки. Зокрема зазначається, що взаємозв'язки між лісами помірної зони та кліматом ще недостатньо відомі. Хоча вже у сучаснішій

статті [50] зазначено, що ліси помірної зони компенсують антропогенний вплив на клімат через зниження температури повітря у порівнянні з пасовищами й посівами сільськогосподарських культур, проте у деяких роботах зазначено протилежне [51], оскільки трав'яний покрив має вище альbedo. Відомо, що вплив лісів помірної зони на кліматичні та метеорологічні умови залежить від таких факторів як доступність води (опадів, рівень залягання ґрунтових вод) і, відповідно, ступеня зволоженості ґрунту. З одного боку, за достатньої кількості вологи у ґрунті у теплий період року відбувається охолодження території через евапотранспірацію та потоки прихованого тепла, а з іншого – ліси помірної зони мають темне забарвлення, тому для них характерне нижче альbedo і вище поглинання радіації, що сприяє нагріванню навколишнього середовища [51]. Хвойні ліси є досить поширеними на території Центральної та Східної Європи у помірній зоні і вміщують в собі велику кількість вуглецю, проте є дуже чутливими до шкідників. Тому в [50] зауважено, що майбутні зміни клімату можуть сприяти вивільненню CO₂ у хвойних лісах.

Тропічні ліси через низьке альbedo повинні спричиняти зростання приземної температури повітря, проте за рахунок високої евапотранспірації вони нівелюють ефект потепління на відміну від, наприклад, пасовищ. У посушливі роки з явищем Ель-Ніньйо спостерігається інтенсивніше вивільнення CO₂ тропічними лісами в атмосферу. Бореальні ліси також підвищують зростання приземної температури повітря через їх низьке альbedo, зокрема, взимку у порівнянні з безлісими площами. У той же час, екосистеми бореальних лісів роблять значний вклад у накопичення та вивільнення CO₂. Зміни клімату через підвищення температури призводять до зміщення межі лісу в напрямку полюсу, що зумовлює скорочення хвойних лісів [49].

Кількісна оцінка впливу змін підстильної поверхні на потоки вуглецю в атмосферу для бореальних лісів Середнього Сибіру показала, що ґрунти в лісових екосистемах відіграють значну роль, так як можуть відповідати за 40–80% від загальної емісії [52]. Вимірювання сезонних та добових потоків CO₂ під час вегетаційного періоду над різними типами підстильної поверхні дозволили встановити незначні зміни над ділянками без надґрунтового покриву, а найбільші флуктуації спостерігалися для ділянки з потужним надґрунтовым покривом

під мішаним лісом. Виявлено, що зростання потоків CO₂ відбувалося на початку вегетаційного періоду через зростання температури підстильної поверхні. Натомість її підвищення в середині періоду та зниження вологості ґрунту, навпаки, призводило до зниження цих потоків. Отримані результати надзвичайно важливі для моделювання та врахування факту про переважання вивільнення CO₂ внаслідок «дихання» підстильної поверхні над поглинанням лісами. Це може спричинити перетворення екосистеми з стоку у джерело емісії CO₂, особливо при заміщенні хвойних лісів листяними або мішаними через зміну надґрунтового покриву, оскільки для останніх необхідна менша кількість CO₂ для процесів фотосинтезу [52].

В Україні проводилися подібні експерименти з вимірювання поглинання CO₂ на півдні у найбільшому штучно створеному лісі Європи з використанням газометричного методу для двох порід хвойних дерев – сосни звичайної і сосни кримської. Встановлено, що остання поглинає більшу кількість CO₂. Інтенсивність фотосинтезу починає зростати у травні для обох порід, а максимум фотосинтезу припадає на липень [53]. Досліджувалися потоки CO₂ на прикладі модельних степових екосистем із штучною зміною кількості опадів за вегетаційний період. Виявлено нелінійні залежності між опадами та диханням ґрунту, яке має значний внесок у емісію CO₂. Встановлено, що найвища інтенсивність потоків CO₂ зафіксована у квітні, а найнижча – у жовтні. Знайдено позитивні залежності між потоками CO₂ та опадами: при штучному збільшенні опадів на 60% спостерігається зростання емісії, а при зменшенні на 40% - відповідно зниження [54]. Проводилося вимірювання потоків CO₂ та CH₄ за допомогою супутників для території України загалом і для кожної адміністративної області та виявлена загальна тенденція до зростання концентрації CO₂ [55].

Відомо, що розширення території міст (урбанізація), зокрема у Європі [37], зумовлює перетворення великої кількості природних ландшафтів на штучні з такими видами покриттів як асфальт, бетон та інші, що змінює їх фізичні властивості. Вищевказані поверхні є водонепроникними, поглинають від 60 до 95% сонячної радіації та довго утримують тепло [56, 57], сприяючи зростанню температури повітря і, відповідно, формуванню міського острова тепла. Забудова у місті також впливає на утворення місцевої циркуляції повітря, перерозподіл опадів

та вітру тощо. Промислові об'єкти й автотранспорт у містах забруднюють та змінюють хімічний склад атмосферного повітря у ГША тощо [58]. Встановлено, що у міському повітрі кількість аерозолів є на 15-20% вищою, ніж над сільською територією. Вони зменшують надходження сонячної радіації і виступають ядрами конденсації та сприяють утворенню локальних хмар [59]. Показано, що особливості сезонного та річного ходу забруднюючих речовин у ГША, а також зсуви періодів з максимальними значеннями, залежать від змін умов природокористування та рівня антропогенного навантаження на конкретній території для деяких великих міст [60, 61].

4. МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІН ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ ТА РЕГІОНАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ

Моделювання, наразі, є одним із основних засобів для вивчення та аналізу різних процесів, що протікають в атмосфері, гідросфері, біосфері тощо, відтворення даних процесів, створення певних штучних умов, та є чи не єдиним з інструментів для прогнозування погоди та клімату. Розвиток комп'ютерних потужностей зумовив активізацію досліджень і чисельного моделювання впливу змін підстильної поверхні на вміст хімічних складових атмосфери й на регіональні кліматичні умови. Зокрема, більшість глобальних кліматичних моделей, застосованих для побудови кліматичних проєкцій і оцінок МГЕЗК, розраховувалися з використанням різних сценаріїв емісії парникових газів із врахуванням впливу підстильної поверхні [7, 17, 18, 45].

Для території України за даними глобальних та регіональних кліматичних моделей з використанням трьох SRES-сценаріїв (Special Report on Emissions Scenarios) створені кліматичні проєкції для найближчого майбутнього, на середину і на віддалену перспективу до кінця XXI сторіччя для таких основних показників як приземна середня річна, місячна температура повітря, кількість опадів та середні місячні, сезонні й річні поля хмарності [62, 63], а також для спеціалізованих, таких як дат переходу температури повітря через 0, 5, 10, 15°C навесні й восени та тривалості відповідних періодів [64].

В університеті Гельсінкі розроблено модель динаміки аерозольних часток різних розмірів UHMA (University of Helsinki Multicomponent Aerosol model) для моделювання їх утворення,

росту та розповсюдження в тропосфері за ясного неба. Модель враховує емісію аерозолів різної природи, тобто дозволяє оцінити можливі зміни надходження аерозолів після змін характеристик підстильної поверхні. UHMA дозволяє працювати з такими частками як оксид вуглецю, аміак, мінеральний пил, сульфатна кислота, водорозчинні органічні сполуки, нерозчинні у воді органічні сполуки та включає такі процеси як формування й ріст нових часток, конденсацію, коагуляцію та сухе осадження. Дана модель є базовою для інших моделей у відтворенні динаміки аерозолей, проте, у моделі відсутній механізм вологого осадження, який потрібен для розгляду ситуацій із туманами [6].

Одним із найбільш перспективних інструментів для проведення досліджень взаємозв'язку змін підстильної поверхні та клімату є онлайн-інтегрована модель Enviro-HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) [9]. Застосування метеорологічних та хімічних блоків дозволяє отримати велику кількість характеристик. Можливість зміни типу підстильної поверхні в моделі (гіпотетична вирубка лісу, зміна меж забудови, тощо) й розрахунки для минулих років дозволяють проаналізувати окремі випадки, наприклад, природних і техногенних пожеж та порівняти результати із реальною ситуацією.

Надзвичайно актуальним, але і доволі складним, є моделювання впливу змін підстильної поверхні для розробки оптимальних заходів планування господарської діяльності людини. Один із найбільш вдалих прикладів таких досліджень виконано у рамках Національного плану лісонасадження у Данії [11]. На основі моделювання гіпотетичних варіантів зміни підстильної поверхні та різних варіантів урбанізації за допомогою моделі Enviro-HIRLAM досліджено можливу зміну кліматичних характеристик території. Застосування різних сценаріїв лісонасадження дозволило отримати можливе зниження температури до 3,25°C у міському середовищі на прикладі метеорологічних умов липня 2009 року. Проведене моделювання показало, що добре продуманий план лісонасадження території дозволяє суттєво вплинути на температурне поле і повторюваність екстремальних температур у регіоні. Показано, що оптимальний розподіл рослинності у містах та регіоні дозволяє суттєво модифікувати кліматичні умови території [11]. Enviro-HIRLAM може доповнити регіональна модель HARMONIE з параметризованою конвективною

хмарністю, яка дозволяє вирішувати різноманітні задачі як для оперативного прогнозування погоди, так і для інших наукових цілей, зокрема, для вивчення відгуків підстильна поверхня-атмосфера [65-66].

Автори [67] оцінили стан забруднення атмосфери аерозолем над м. Києвом від лісових пожеж у Росії в 2010 р. Для цього використано дані MODIS супутника TERRA/AQUA й супутника A-Train для ідентифікації площі під пожежами. Використано вхідну метеорологічну інформацію для моделі HYSPLIT-4 (The Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model), що дозволяла відтворити зворотню траєкторію повітряних мас та сонячний фотометр мережі AERONET з метою вимірювання оптичної товщі аерозолу. Згодом автори розширили територію для дослідження й аналізували накопичення забруднюючих домішок над Європейською територією Росії, Східною Європою, зокрема, Україною [68].

Модель екосистем PnET-CN використовували для лісів помірної зони в районі Великих озер з урахуванням кліматичних проєкцій для визначення впливу зміни клімату та довгоперіодичних змін потоків CO₂ на їх продуктивність. Встановлено, що вона вдвічі зростає при підвищенні концентрацій CO₂ і без зміни типу лісу та змінюється у просторі в залежності від типу лісу. За висновками авторів [69] продуктивністю лісів менше залежала від температури та опадів, ніж концентрацій CO₂. На противагу, у сучаснішому дослідженні оцінки продуктивності лісів помірної зони Центральної Європи з використанням кліматичних проєкцій також виявлено, що вона змінюється в залежності від місцевих умов, проте є залежність від температури й опадів [70]. Схожа робота виконана з застосуванням моделювання ORCHIDEE-GM v2.2 з використанням кліматичних проєкцій для пасовищ та сільськогосподарських угідь для Європейської території. Встановлено, що продуктивність посівів також зростає при підвищенні концентрації CO₂. За рахунок зростання температури повітря вегетаційний період подовжується, проте зменшення запасів продуктивної вологи в ґрунті призводитиме до посушливості і негативно впливатиме на рослини. Тобто, спостерігатиметься зниження асиміляції CO₂ [71].

Дослідження взаємодії між підстильною поверхнею, лісами та кліматом проведено із застосуванням регіональних кліматичних моделей для бореальної зони [9]. Зокрема,

досліджувався взаємозв'язок підстильна поверхня (зона боліт)-ліси- клімат бореальної зони для регіону Фенноскандії для різних часових проміжків, у тому числі, випадок сильної посухи 2006 року. Використовувалися дані E-Obs, регіональної кліматичної моделі REMO та моделі підстильної поверхні JSBACH, що є частиною моделі MPI-ESM (Max - Planck - Institute Earth System Model). Результатом даної роботи стало впровадження деталізованої карти підстильної поверхні з JSBACH, що дало можливість з вищою точністю моделювати метеорологічні процеси в REMO. Досліджено вплив насадження лісів на болотистій місцевості на регіональний клімат на основі двох карт підстильної поверхні – до осушення (1920-ті роки) і після осушення (2000-ні роки). Автори використовували різні індекси посушливості для перевірки їх здатності ідентифікувати посушливі умови та оцінити ступінь ураженості лісів в даному регіоні на прикладі літа 2006 року, що в подальшому дозволить оцінювати ризики посушливості. Також досліджено відгуки рослинності на посуху через показники валової первинної продуктивності та евапотранспірації. Аналіз результатів виявив, що індекс вологості ґрунтів найкраще ідентифікував посуху. Таким чином, встановлено, що комбінація моделей JSBACH і REMO дозволяє оцінити можливі ризики посухи для лісів на майбутнє [9].

Потоки летких біогенних органічних сполук, вуглецю та вторинних аерозолів органічного походження досліджено у атмосфері Східного Сибіру, де спостерігається відносно швидке потепління клімату. Для вивчення взаємозв'язків «вегетація – зміни клімату – атмосферний CO₂» використано динамічну глобальну модель вегетації LPJ-GUESS (Lund-Potsdam-Jena General Ecosystem Simulator), а за допомогою глобальної моделі «аерозоль – клімат» ECHAM-HAM створено кліматичну проєкцію до кінця XXI сторіччя за найвищим емісійним сценарієм МГЕЗК RCP8.5 (Representative concentration pathway), за якою виявили зростання індексу площі листової поверхні у зв'язку з вищими концентраціями CO₂ і, відповідно, зростання частки летких біогенних органічних сполук [72].

За даними глобальних та регіональних кліматичних моделей розраховувалися кліматичні проєкції для оцінки вразливості лісів на території України за найбільш вживаним «збалансованим» емісійним сценарієм МГЕЗК A1B і його модифікацією A1B+T-P, який передбачає більш тепліший та сухіший клімат.

Також аналізувалися зміни клімату з використанням лісокліматичної моделі Воробйова й моделі амплітуд толерантності флори Дідуха. Отримані як основні, так і спеціалізовані кліматичні характеристики для лісів: континентальність клімату, дати переходу середньодобової температури повітря через порогові значення 0°, 5°, 10°, 15°C і тривалість періодів між ними, показники омброрежиму й гідротермічні коефіцієнти [73]. За допомогою регіональної кліматичної моделі REMO було оцінено ступінь пожежної небезпеки в лісах та повторюваності небезпечних явищ погоди за сценарієм A1B для південних регіонів України. Тобто, отримані оцінки майбутніх змін кліматичних умов дають можливість перейти до досліджень майбутніх змін типів покриву підстильної поверхні на території України [47].

5. ОБГОВОРЕННЯ ТА ВИСНОВКИ

Незважаючи на активний розвиток досліджень взаємозв'язків підстильної поверхні та клімату, наразі недостатньо вивченими залишається ще низка питань у всіх трьох розглянутих напрямках. Для моніторингу підстильної поверхні з застосуванням супутникових технологій все ще залишається проблемою наявність хмарності [39], тінь від хмар та рельєфу і кількісна оцінка неоднорідності поверхонь, (наприклад, міст) незважаючи на те, що вже є інструменти для проведення атмосферної корекції.

Для вивчення впливу підстильної поверхні на вміст хімічних складових атмосфери і регіональні кліматичні умови подальшого вивчення потребують наступні питання. По-перше, зміни підстильної поверхні впливають на біогеохімічні потоки органічних та неорганічних речовин, що в більшості регіонів досі не описано кількісно [19, 74]. По-друге, детально не вивчено проблему внеску змін у природокористуванні на глобальний клімат, і чи має ефект трансформація підстильної поверхні на віддалені від неї регіони, де підстильна поверхня не зазнала змін. Взаємозв'язки між лісами помірної зони та регіональним кліматом також недостатньо вивчені, оскільки вони є перехідними відносно бореальних та тропічних лісів за їх впливом, наприклад, на вуглецевий цикл і температурний режим через альбедо й евапотранспірацію [49, 51].

За останню декаду відбулося суттєве збільшення горизонтальної роздільної здатності у регіональних кліматичних моделях із 25 до 5-

10 км, що дозволило вирішувати нові задачі, наприклад, встановлення зворотних зв'язків між вологістю ґрунту та опадами. Наразі вдосконалюються параметризації, що дозволяють оцінити ефекти впливу міста на розподіл, зокрема, екстремальних температур. Проте, незважаючи на високу роздільну здатність, багато процесів потребують вдосконалення: мікрофізика хмар й опадів, дрібна конвекція, трансформація потоків сонячної радіації, турбулентність, дифузія [75]. Недостатньо добре вивчено взаємодії між хмарним покривом, аерозолями та опадами, що призводить до їх недосконалому представлення у моделях [17]. Навіть за умови використання достатньо складних моделей впливу підстильної поверхні на ГША, неузгодженості виникають у співвідношенні явних та прихованих потоків тепла [8].

Іншим відкритим питанням залишається включення динаміки вегетації до даних про підстильну поверхню з подальшим врахуванням взаємодії ґрунт/рослинність [67]. Є проблеми у поки що недосконалої параметризації впливу сільськогосподарських угідь, відкритих водойм, систем іригації на локальні та регіональні кліматичні умови через недостатню кількість спостережень за вологістю ґрунту, евапотранспірацією тощо, що у свою чергу впливає на можливість коректної верифікації оновлених схем параметризації. Хоча те, що системи іригації сприяють підвищенню вологості ґрунту, зростанню прихованих і зниженню явних потоків тепла не викликає сумніву [76].

Багато питань викликає вплив урбанізації на потепління на локальному рівні; залежність температури регіонів від інтенсивності вирубки лісів та яке співвідношення рослинності при їх відновленні може зумовити сповільнення поточної швидкої зміни клімату [7, 19, 77].

Очевидно, що вплив підстильної поверхні на загальну та місцеву циркуляцію та на склад атмосфери залежить від території і відіграє суттєву роль під час моделювання, оскільки досі залишаються недостатньо вивченими кількісні оцінки зв'язку підстильної поверхні з атмосферою над різними регіонами.

Таким чином, проведений аналіз та оцінка літературних джерел щодо основних напрямків сучасних досліджень взаємодії клімату і підстильної поверхні показали, що єдиним механізмом вивчення взаємодії клімату й підстильної поверхні на сьогодні є інтеграція біогеохімічних даних дистанційного зондування,

даних наземного моніторингу стану довкілля та комплексного моделювання атмосфери. Розвиток супутникових технологій, збільшення просторової роздільної здатності та покращення якості атмосферної корекції дозволить поступово нівелювати недоліки наявності хмарного покриву та покращить моніторинг фактичних змін підстильної поверхні. Точність визначення змін підстильної поверхні разом із поєднанням супутникових і наземних спостережень за біогеохімічними потоками органічних та неорганічних речовин дозволить ліквідувати недоліки сучасних онлайн-інтегрованих моделей атмосфери, які стають надзвичайно потужним інструментом дослідження численних зв'язків між підстильною поверхнею, хімічним складом атмосфери та кліматом. Інтеграція біогеохімічних даних та онлайн-інтегрованих моделей атмосфери дозволить змодельовати вплив змін у природокористуванні на глобальний та регіональний клімат, отримати ряд параметрів, що описують потоки тепла та речовини за нових (змінених) умов. Подібне поєднання моделей та спостережень дозволить отримувати декілька реалізацій, частина з яких буде відображати реальні умови, інша частина – гіпотетичні (змодельовані) умови. Порівняння характеристик умов розкриватиме аспекти взаємодії змін підстильної поверхні та клімату.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Клімат України: монографія / за ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ : Ніка-Центр, 2003. 343 с.
2. Міщенко З. А., Ляшенко Г. В. Мікрокліматологія: навч. пос. Одеса, 2005. 336 с.
3. Динаміка температури повітря в Україні за період інструментальних метеорологічних спостережень / Осадчий В. І., Бабіченко В. М., Набиванець Ю. Б. та ін. Київ : Ніка-Центр, 2013. 308 с.
4. Стихійні метеорологічні явища на території України за останнє двадцятиріччя (1986-2005 рр.) / за ред. В. М. Ліпінського, В. І. Осадчого, В. М. Бабіченко. Київ : Ніка-Центр, 2006. 312 с.
5. Barry R., Hall-McKim E. A. Essentials of the Earth's Climate System. Cambridge University Press, 2014. 274 p.
6. Korhonen H., Lehtinen K. E. J., Kulmala M. Multicomponent aerosol dynamics model UHMA: model development and validation. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2004. 4. Pp. 757–771. <https://doi.org/10.5194/acp-4-757-2004>
7. IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems. URL: www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/Fullreport-1.pdf (Accessed: 29.10.2019).
8. Foteck Fonji S., N. Taff G. Using satellite data to monitor land-use land-cover change in North-eastern Latvia. SpringerPlus. 2014. 61 (3). <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-61>
9. Gao Y. Interactions between land surface, forests and climate: regional modelling studies in the boreal zone: PhD thesis / University of Helsinki. Department of Physics. 2016. URL:<https://helda.helsinki.fi/handle/10138/166502> (Accessed: 27.08.2019)
10. de Noblet-Ducoudr'e et al. Determining robust impacts of land-use induced land-cover changes on surface climate over North America and Eurasia: Results from the first set of LUCID experiments. *Journal of Climate*. 2011. 25. Pp. 3261-3281. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00338.1>
11. Stysiak A. A., Jensen M. B., Mahura A. Impact of regional afforestation on climatic conditions in Copenhagen Metropolitan Area: Scientific report. 2015. URL: https://www.dmi.dk/fileadmin/user_upload/Rapporter/SR/2015/sr15-07.pdf (Accessed: 10.09.2019)
12. Stocker T. Introduction to Climate Modelling. Springer, 2011. 182 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00773-6>
13. Ojima D. Modelling the Earth System. UCAR / Office for Interdisciplinary Earth Studies, 1992. 495 p.
14. Прусов В. А., Дорошенко А. Ю. Моделювання природних і техногенних процесів в атмосфері. Київ : Наукова думка, 2006. 541 с.
15. Степаненко С. М. Динаміка та моделювання клімату : підручник. Одеса : Екологія, 2013. 203 с.
16. Дымников В. П., Лыков В. Н., Володин Е. М. Моделирование климата и его изменений. *Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. Т.2. Математическое моделирование* / под. ред. В. П. Дымникова. Москва : Наука, 2005. С. 38-175
17. Global warming of 1.5°C. Summary for Policymakers. URL: https://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf (Accessed: 01.09.2019)
18. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC. URL: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf (Accessed: 01.09.2019)
19. Pielke R. et al. Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence. *WIREs Clim Change*. 2011. 2. Pp. 828–850. <https://doi.org/10.1002/wcc.144>.
20. Pitman A. J. The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *International Journal of Climatology*. 2003. 23. Pp. 479–510. <https://doi.org/10.1002/joc.893>.
21. Baklanov A. et al. Enviro-HIRLAM online integrated meteorology–chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v7.2). *Geoscientific Model Development*. 2017. 10. Pp. 2971–2999. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2971-2017>
22. About the FLUXNET Network. URL: <https://fluxnet.fluxdata.org/about/> (Accessed: 10.09.2019)
23. Liu Y. et al. Satellite-derived LAI products exhibit large discrepancies and can lead to substantial uncertainty in simulated carbon and water fluxes. *Remote Sensing of Environment*. 2018. 206. Pp. 174-188.
24. Fangjie M. et al. Coupled LAI assimilation and BEPS model for analyzing the spatiotemporal pattern and heterogeneity of carbon fluxes of the bamboo forest in Zhejiang Province, China. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2017. 242. Pp. 96-108. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.03.022>
25. Reichenau T. G. et al. Spatial Heterogeneity of Leaf Area Index (LAI) and Its Temporal Course on Arable Land:

- Combining Field Measurements, Remote Sensing and Simulation in a Comprehensive Data Analysis Approach (CDA). *Plos One*. 2016. 11(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158451>
26. Liu, J. et al. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs. *Remote sensing environment*. 1997. 62 (2). Pp. 158-175. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00089-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00089-8)
 27. Duveiller G., Hooker J., Cescatti A. Data Descriptor: A dataset mapping the potential biophysical effects of vegetation cover change. *Scientific Data*. 2018. 5. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.14>
 28. The Land Cover CCI Climate Research Data Package. URL: <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download.php#usertool> (Accessed: 19.09.2019)
 29. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat / Курбанов Э. А., Воробьев О. Н., Губаев А. В. и др. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование*. 2014. Вып. 1(21). С. 18-32.
 30. Sivanpillai R. et al. Estimation of managed loblolly pine stand age and density with Landsat ETM+ data. *Forest Ecology and Management*. 2006. 223. Pp. 247–254.
 31. Cohen W. B., Spies T. A. Estimating structural attributes of Douglas-fir/western hemlock forest stands from Landsat and Spot imagery. *Remote Sensing of Environment*. 1992. 41(1). Pp. 1–17.
 32. Heikkila J., Nevalainen S., Tokola T. Estimating defoliation in boreal coniferous forests by combining Landsat TM, aerial photographs and field data. *Forest ecology and Management*. 2002. 158. Pp. 9–23.
 33. Тематическое картирование и стратификация лесов Марийского Заволжья по спутниковым снимкам Landsat / Курбанов Э. А., Воробьев О. Н., Незамаев С. А. и др. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование*. 2013. Вып. 3(19). С. 72-82.
 34. Елсаков В. В. Спутниковая съемка в оценке продуктивности экосистем Европейского Севера. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Вып. 1. С. 87-94.
 35. Bhagat V. S. Use of Landsat ETM+ data for detection of potential areas for afforestation. *International Journal of Remote Sensing*. 2009. 30(10). Pp. 2607 – 2617.
 36. Levin N. et al. Mapping forest patches and scattered trees from SPOT images and testing their ecological importance for woodland birds in a fragmented agricultural landscape. *International Journal of Remote Sensing*. 2009. 30(12). Pp. 3147–3169.
 37. Kuemmerle T. et al. Hotspots of land use change in Europe. *Environmental Research Letters*. 2016. 15. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/6/064020>
 38. Skakun S., Kussul N., Kussul O. et al. Quantitative estimation of drought risk in Ukraine using satellite data. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE International*. 2014. Pp. 5091-5094. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947642>
 39. Kussul N., Lavreniuk M., Shelestov A. et al. Along the season crop classification in Ukraine based on time series of optical and SAR images using ensemble of neural network classifiers. *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China*. 2016. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7730864>.
 40. Shelestov A., Lavreniuk M., Kussul N. et al. Exploring Google Earth Engine Platform for Big Data Processing: Classification of Multi-Temporal Satellite Imagery for Crop Mapping. *Frontiers in Earth Science*. 2017. 5. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00017>
 41. Ghazaryan G., Dubovyk O., Kussul N. et al. Towards an Improved Environmental Understanding of Land Surface Dynamics in Ukraine Based on Multi-Source Remote Sensing Time-Series Datasets from 1982 to 2013. *Remote Sensing*. 2016. 8. <https://doi.org/10.3390/rs8080617>
 42. Lesiv M., Shchepaschenko D., Moltchanova E. et al. Spatial distribution of arable and abandoned land across former Soviet Union countries. *Scientific Data*. 2018. 5. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.56>
 43. Мартазинова В. Ф., Щеглов А. А. Характер экстремальных осадков начала XXI столетия на территории Украины. *Украинский гидрометеорологический журнал*. 2018. № 22. С. 36-45. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.04>
 44. Заболоцька Т. М., Шпиг В. М. Кількісні зміни хмарності як індикатор періоду глобального потепління. *Наукові праці УкрНДГМІ*. 2015. Вип. 267. С. 23-27
 45. Climate change 2014. Synthesis report. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf (Accessed: 19.06.2019)
 46. Randerson J. T. et al. The Impact of Boreal Forest Fire on Climate Warming. *Science*. 2006. 17. P. 1130-1132.
 47. Балабух В. О., Зібцев С. В. Вплив зміни клімату на кількість та площу лісових пожег у північно-чорноморському регіоні України. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. № 18. С. 60-71. <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.07>
 48. Global Fire Emissions Database. URL: <https://www.globalfiredata.org/data.html> (Accessed: 19.09.2019)
 49. Gordon B., Bonan. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*. 2008. 320. Pp. 1444-1449.
 50. Thom D., Rammer W., Seidl R. The impact of future forest dynamics on climate: interactive effects of changing vegetation and disturbance regimes. *Ecological Monographs*. 2017. 87(4). Pp. 665–684. <https://doi.org/10.1002/ecm.1272>.
 51. Sanderson M. et al. Relationships between forests and weather. *EC Directorate General of the Environment 13th January 2012*. 2012. URL: http://ec.europa.eu/environment/forests/pdf/EU_Forests_annex1.pdf (Accessed: 25.09.2019)
 52. Динамика потоков CO₂ с поверхности почвы в сосновых древостоях Средней Сибири / Махныкина А. В., Прокушкин А. С., Ваганова Е. А. и др. *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*. 2016. №3(9). С. 338-357.
 53. Ляшенко Г. В., Кузнецова Ю. О. Вплив стану лісового господарства півдня України на регулювання вуглекислого газу в атмосфері. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. №18. С. 105-111. <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.12>
 54. Халаїм О. О. Оцінка потоків CO₂ у модельних степових екосистемах за різної кількості опадів: автореф. дис. к-та біол. наук / НАУКМА. Київ, 2017. 22 с.
 55. Лялько В. І. Парниковий ефект і зміни клімату в Україні: оцінки та наслідки. Київ: Наукова думка, 2015. 283 с.
 56. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Urban Heat Island Basics. URL: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-06/documents/basicscompendium.pdf> (Accessed: 25.09.2019)
 57. Шевченко О. Г. Прояв зміни клімату на території м. Києва та основні підходи до його адаптації. *Часопис картографії*. 2017. Вип. 1. С. 108-122.
 58. Mahmood R. Impacts of Land Use/Land Cover Change on

- Climate and Future Research Priorities. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2010. 91. Pp. 37-46.
59. Сніжко С. І., Шевченко О. Г. Урбометеорологічні аспекти забруднення атмосферного повітря великого міста. Київ : Обрії. 2011. 297 с.
60. Savenets M., Nadtochii L., Dvoretzka I. NO₂ seasonal and interannual variability in Ukrainian industrial cities. *GeoScience Engineering*. 2018. LXIV(4). Pp. 29–36.
61. Особливості динаміки забруднення атмосферного повітря пилом у деяких містах України / Надточій Л. М., Савенець М. В., Баштаннік М. П. та ін. *Український географічний журнал*. 2019. №1(105). С. 43–50.
62. Паламарчук Л. В., Краковська С. В. Регіональні зміни клімату України: Методичні вказівки до навчального курсу для студентів географічного факультету спеціальності «Метеорологія та кліматологія». Київ : Прінт-Сервіс, 2018. 90 с.
63. Хохлов В. М., Єрмоленко Н. С. Майбутні зміни клімату та їх вплив на режим опадів та температури в Україні. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2015. №16. С. 76-82. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.10>
64. Польовий А. М., Божко Л. Ю. Теплові ресурси України в умовах зміни клімату. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2015. №16. С. 99-106. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.13>
65. Паламарчук Ю. О., Иванов С. В., Рубан И. Г. Технология численного описания состояния атмосферы на основе моделирующей системы HARMONIE. 2017. *Тези доповідей I Всеукр. гідрометеорологічного з'їзду з міжнародною участю, 22-23 березня. Одеса*. URL: <http://eprints.library.odetu.edu.ua/1924/> (дата звернення: 21.09.2019)
66. Groisman P. Ya., Ivanov S. V. Regional aspects of climate-terrestrial-hydrologic interactions in non-boreal Eastern Europe. Springer, 2009. 376 p.
67. Галицька С. І., Данилевський В. О., Сніжко С. І. Стан забруднення аерозолем атмосфери над Києвом за дистанційними дослідженнями засобами AERONET та вплив на нього лісових пожеж улітку 2010 р. *Геополітика и экогеодинамика регионов*. 2014. Т.10. С. 437-444.
68. Galytska E., Danylevsky V., Hommel R. et al. Increased aerosol content in the atmosphere over Ukraine during summer 2010. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2018. 11. Pp. 2101-2118. <https://doi.org/10.5194/amt-11-2101-2018>
69. Peters E. B. et al. Potential climate change impacts on temperate forest ecosystem processes. *Canadian Journal of Forest Research*. 2013. 43. P. 939-950.
70. Morin X. et al Long-term response of forest productivity to climate change is mostly driven by change in tree species composition. *Scientific Reports*. 2018. 8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23763-y>
71. Chang J. et al. Future productivity and phenology changes in European grasslands for different warming levels: implications for grassland management and carbon balance. *Carbon Balance Management*. 2017. 12. <https://doi.org/10.1186/s13021-017-0079-8>
72. Arneft A. et al. Future vegetation–climate interactions in Eastern Siberia: an assessment of the competing effects of CO₂ and secondary organic aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2016. 16. Pp.5243-5262
73. Швиденко А. З., Букша І. Ф., Краковська С. В. Уразливість лісів України до зміни клімату: монографія. Київ, Ніка-Центр, 2018. 184 с.
74. Findell K. L. et al. Regional and global impacts of land cover change and sea surface temperature anomalies. *Journal of Climate*. 2009. 22. Pp. 3248–3269. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2580.1>
75. Rummukainen M. et al. Twenty-first-century challenges in regional climate modeling. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2015. 96(8). Pp. 135-137. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00214.1>
76. Lawston P. M. et al. Assessment of Irrigation Physics in a Land Surface Modeling Framework using Non-Traditional and Human-Practice Datasets. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2017. 21(6). Pp. 2953–2966. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2953-2017>
77. Mahmood R. et al. Land cover changes and their biogeophysical effects on climate. *International Journal of Climatology*. 2014. 34. Pp. 929-953.

REFERENCES

- Lipinsky, V.M., Diachuk, V.A. & Babichenko, V.M. (eds). (2003). *Klimat Ukrainy [Climate of Ukraine]*. Kyiv: Nika-Tsentr. (in Ukr.)
- Mishchenko, Z.A. & Liashenko, G.V. (2005). *Mikroklimatolohiia. [Microclimatology]*. Odesa (In Ukr.)
- Osadchyy, V.I., Babichenko, V.M., Nabyvanets Y.B. et al. (2013). *Dynamika temperatury povitria v Ukraini za period instrumentalnykh meteorolohichnykh sposterezhen [Dynamics of Air Temperature in Ukraine over Instrumental Observation Period]*. Kyiv: Nika-Tsentr. (in Ukr.)
- Lipinsky, V.M., Osadchyy V. & Babichenko, V.M. (eds.) (2006). *Stykhiini meteorolohichni yavyschcha na terytorii Ukrainy za ostannie dvadtsiatyrychchia (1986-2005). [Natural meteorological weather phenomena in Ukraine for the last twenty years (1986-2005)]*. Kyiv. (in Ukr.)
- Barry, R. & Hall-McKim, E.A. (2014). *Essentials of the Earth's Climate System*. Cambridge University Press.
- Korhonen, H., Lehtinen, K.E.J. & Kulmala, M. (2004). Multicomponent aerosol dynamics model UHMA: model development and validation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4, pp. 757–771. <https://doi.org/10.5194/acp-4-757-2004>
- IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems*. Available at: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/Fullreport-1.pdf> (Accessed: 29.10.2019).
- Foteck Fonji, S. & N. Taff, G. (2014). Using satellite data to monitor land-use land-cover change in North-eastern Latvia. *SpringerPlus*, 61 (3). <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-61>.
- Gao, Y. (2016). *Interactions between land surface, forests and climate: regional modelling studies in the boreal zone*. PhD thesis. University of Helsinki. Department of Physics. Available at: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/166502> (Accessed: 27.08.2019)
- de Noblet-Ducoudr'e et al. (2011). Determining robust impacts of land-use induced land-cover changes on surface climate over North America and Eurasia: Results from the first set of LUCID experiments. *Journal of Climate*, 25, pp. 3261-3281. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00338.1>
- Stysiak, A.A., Jensen, M.B. & Mahura, A. (2015). *Impact of regional afforestation on climatic conditions in Copenhagen Metropolitan Area: Scientific report*. Available at: https://www.dmi.dk/fileadmin/user_upload/Rapporter/SR/2015/sr15-07.pdf (Accessed: 10.09.2019)

12. Stocker, T. (2011). *Introduction to Climate Modelling*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00773-6>
13. Ojima, D. (1992). *Modelling the Earth System*. UCAR. Office for Interdisciplinary Earth Studies.
14. Prusov, V.A. & Doroshenko, A.Yu. (2006). *Modeliuvannia pryrodnykh i tekhnohennykh protsesiv v atmosferi [Modelling natural and technogenic processes in the atmosphere]*. Kyiv: Naukova Dumka. (In Ukr.)
15. Stepanenko, S.M. (2013). *Dynamika ta modeliuvannia klimatu [Dynamics and climate modeling]*. Odesa: Ekolohiia. (In Ukr.)
16. Dymnikov, V.P., Lykosov V.N., Volodin E.M. et al. (2005). Modelirovanie klimata i ego izmeneniya [Modeling climate and its changes]. In: Dymnikov V.P. (eds). *Sovremennye problemy vychislitel'noy matematiki i matematicheskogo modelirovaniya [Contemporary problems of numerical mathematics and mathematical modelling]*. Vol. 2. *Matematicheskoe modelirovanie. [Mathematical modelling]*. Moscow: Nauka, pp. 38-175
17. *Global warming of 1.5°C. Summary for Policymakers*. Available at: https://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf (Accessed: 01.09.2019)
18. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC*. Available at: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf (Accessed: 01.09.2019)
19. Pielke, R., et al. (2011). Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence. *WIREs Clim Change*, 2, pp. 828–850. <https://doi.org/10.1002/wcc.144>.
20. Pitman, A.J. (2003). The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *International Journal of Climatology*, 23, pp. 479–510. <https://doi.org/10.1002/joc.893>.
21. Baklanov, A. et al. (2017). Enviro-HIRLAM online integrated meteorology–chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v7.2). *Geoscientific Model Development*, 10, pp. 2971–2999. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2971-2017>
22. About the FLUXNET Network. Available at: <https://fluxnet.fluxdata.org/about/> (Accessed: 10.09.2019)
23. Liu, Y. et al. (2018). Satellite-derived LAI products exhibit large discrepancies and can lead to substantial uncertainty in simulated carbon and water fluxes. *Remote Sensing of Environment*, 206, pp.174-188
24. Fangjie, M. et al. (2017). Coupled LAI assimilation and BEPS model for analyzing the spatiotemporal pattern and heterogeneity of carbon fluxes of the bamboo forest in Zhejiang Province, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 242, pp. 96-108. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.03.022>
25. Reichenau, T.G. et al. (2016). Spatial Heterogeneity of Leaf Area Index (LAI) and Its Temporal Course on Arable Land: Combining Field Measurements, Remote Sensing and Simulation in a Comprehensive Data Analysis Approach (CDAA). *Plos One*, 11(7), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158451>
26. Liu, J. et al. (1997). A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs. *Remote sensing environment*, 62 (2), pp. 158-175. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00089-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00089-8)
27. Duveiller, G., Hooker, J. & Cescatti, A. (2018). Data Descriptor: A dataset mapping the potential biophysical effects of vegetation cover change. *Scientific Data*, 5. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.14>
28. *The Land Cover CCI Climate Research Data Package*. Available at: <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download.php#usertool> (Accessed: 19.09.2019)
29. Kurbanov, E.A., Vorobyev, O.N., Gubayev, A.V. et al. (2014). *Chetyre desiatiletiia issledovanyi lesov po snimkam landsat [Four decades of forest research with the use of Landsat images]*. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Serija: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie. [Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management]*, 1(21), pp.18-32. (In Russ.)
30. Sivanpillai, R. et al. (2006). Estimation of managed loblolly pine stand age and density with Landsat ETM+ data. *Forest Ecology and Management*, 223, pp. 247–254.
31. Cohen, W.B. & Spies, T.A. (1992). Estimating structural attributes of Douglas-fir/western hemlock forest stands from Landsat and Spot imagery. *Remote Sensing of Environment*, 41(1), pp. 1–17.
32. Heikkilä, J., Nevalainen, S. & Tokola, T. (2002). Estimating defoliation in boreal coniferous forests by combining Landsat TM, aerial photographs and field data. *Forest ecology and Management*, 158, pp. 9–23.
33. Kurbanov, E.A., Vorobyev, O.N., Nezamayev, S.A. et al. (2013). *Tematicheskoe kartirovanie i stratifikatsiia lesov Mariiskoho Zavolzhia po sputnikovym snimkam Landsat. [Thematic mapping and stratification of forests in Middle Zavolzhie by Landsat satellite images]*. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Serija: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie [Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management]*, 3(19), pp. 72-82. (In Russ.)
34. Elsakov, V.V. (2012). *Sputnykovaia siemka v otsenke produktivnosti ekosistem Evropeiskoho Severa [The remote sensing data in European North productivity estimation]*. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 1, pp.87-94. (In Russ.)
35. Bhagat, V.S. (2009). Use of Landsat ETM+ data for detection of potential areas for afforestation. *International Journal of Remote Sensing*, 30(10), pp. 2607–2617.
36. Levin, N. et al (2009). Mapping forest patches and scattered trees from SPOT images and testing their ecological importance for woodland birds in a fragmented agricultural landscape. *International Journal of Remote Sensing*, 30(12), pp. 3147–3169.
37. Kuemmerle, T. et al. (2016). Hotspots of land use change in Europe. *Environmental Research Letters*, 15, doi:10.1088/1748-9326/11/6/064020
38. Skakun S., Kussul N., Kussul O. et al. (2014). Quantitative estimation of drought risk in Ukraine using satellite data. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), IEEE International*. pp. 5091-5094. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947642>
39. Kussul, N., Lavreniuk, M., Shelestov, A. et al. (2016). Along the season crop classification in Ukraine based on time series of optical and SAR images using ensemble of neural network classifiers. *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Beijing, China. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7730864>.
40. Shelestov, A., Lavreniuk, M., Kussul, N. et al. (2017). Exploring Google Earth Engine Platform for Big Data Processing: Classification of Multi-Temporal Satellite Imagery for Crop Mapping. *Frontiers in Earth Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00017>
41. Ghazaryan, G., Dubovyk, O., Kussul, N. et al. (2016). Towards an Improved Environmental Understanding of

- Land Surface Dynamics in Ukraine Based on Multi-Source Remote Sensing Time-Series Datasets from 1982 to 2013. *Remote Sensing*, 8, <https://doi.org/doi:10.3390/rs8080617>
42. Lesiv, M., Schepaschenko, D., Moltchanova, E., et al. (2018). Spatial distribution of arable and abandoned land across former Soviet Union countries. *Scientific Data*, 5, <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.56>
 43. Martazinova, V.F. & Shcheglov, O.A. (2018). [Nature of extreme precipitation over Ukraine in the 21st century]. *Ukrains'kij gidrometeorologičnij žurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 22, pp. 36-45. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.04> (in Russ.)
 44. Zabolotska, T.M., Shpyg V.M. (2015). [Quantitative changes of cloud cover as indicator of global warming period]. *Naukovi pratsi UkrNDHMI [Scientific Papers of UHMI]*, 267, pp.23-27.
 45. *Climate change 2014. Synthesis report*. Available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf (Accessed: 19.06.2019)
 46. Randerson, J.T. et al. (2006). The Impact of Boreal Forest Fire on Climate Warming. *Science*, 17, pp. 1130-1132.
 47. Balabukh, V.O. & Zibitsev, S.V. (2016). [Impact of climate change on the quantity and area of forest fires in the North part of the Black sea region of Ukraine]. *Ukrains'kij gidrometeorologičnij žurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 18, pp. 60-71 (In Ukr.) <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.07>
 48. *Global Fire Emissions Database*. Available at: <https://www.globalfiredata.org/data.html> (Accessed: 19.09.2019)
 49. Gordon, B. Bonan. (2008). Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, 320, pp. 1444-1449.
 50. Thom, D., Rammer, W. & Seidl, R. (2017). The impact of future forest dynamics on climate: interactive effects of changing vegetation and disturbance regimes. *Ecological Monographs*, 87(4), pp. 665–684. <https://doi.org/10.1002/ecm.1272>.
 51. Sanderson, M et al. (2012). Relationships between forests and weather. *EC Directorate General of the Environment 13th January 2012*. Available at: http://ec.europa.eu/environment/forests/pdf/EU_Forests_annex1.pdf (Accessed: 25.09.2019)
 52. Makhnykina, A.V., Prokushkin, A.S., Vaganova, E.A. et al. (2016). [Dynamics of the CO₂ Fluxes from the Soil Surface in Pine Forests in Central Siberia]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya [Journal of Siberian Federal University. Biology]*, 3 (9), pp. 338-357 (In Russ.)
 53. Lyashenko, H.V. & Kuznetsova, Yu.O. (2016). [Influence of forestry in the South of Ukraine on carbon dioxide control in the atmosphere]. *Ukrains'kij gidrometeorologičnij žurnal [Ukrainian Hydrometeorological Journal]*, 18, pp. 105-111. <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.12>
 54. Khalaim, O.O. (2017). *Otsinka potokiv CO₂ u modelnykh stepovykh skosystemakh za riznoi kilkosti opadiv [Estimation of CO₂ fluxes in model steppe ecosystems under altered precipitation]*. Abstract of PhD in Biology. National University "Kyiv-Mohyla Academy" (In Ukr.)
 55. Lyalko, V.I. (2015). *Parnykovyi efekt i zminy klimatu v Ukraini: otsinky ta naslidky. [Greenhouse Effect and Climate Changes in Ukraine: assessments and consequences]*. Kyiv: Naukova Dumka (In Ukr.)
 56. *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Urban Heat Island Basics*. Available at: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-06/documents/basicscompendium.pdf> (Accessed: 25.06.2019)
 57. Shevchenko, O. (2017). [Climate change manifestation on the territory of Kyiv and main approaches to its adaptation]. *Chasopys kartohrafii [Magazine of Cartography]*, 1, pp. 108-122. (In Ukr.)
 58. Mahmood, R. (2010). Impacts of Land Use/Land Cover Change on Climate and Future Research Priorities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, pp. 37-46.
 59. Snizhko, S.I. & Shevchenko, O.H. (2011). *Urbometeorologichni aspekty zabrudnennia atmosferneho povitria velykoho mista [Meteorological aspects of air pollution of Urban Areas]*. Kyiv: Obrii. (In Ukr.)
 60. Savenets, M., Nadtochii, L. & Dvoretzka, I. (2018). NO₂ seasonal and interannual variability in Ukrainian industrial cities. *GeoScience Engineering*, LXIV (4), pp. 29–36.
 61. Nadtochii, L.M., Savenets, M.V., Bashtannik, M.P. et al. (2019). [The features of dust air-pollution dynamics in certain Ukrainian cities]. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal [Ukrainian Geographical Journal]*, 1, pp. 43-50 (In Ukr.)
 62. Palamarchuk, L.V. & Krakovska, S.V. (2018). *Rehionalni zminy klimatu Ukrainy: Metodichni vkazivky do navchalnoho kursu dlia studentiv heohrafichnoho fakultetu spetsialnosti «Meteorologhiia Ta Klimatologhiia» [Regional climate change in Ukraine: training manual]*. Kyiv: Print-Servis. (In Ukr.)
 63. Khokhlov, V. & Yermolenko, N. (2015). [Future climate change and it's impact on precipitation and temperature in Ukraine]. *Ukrains'kij gidrometeorologičnij žurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 16, pp.76-82. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.10>
 64. Pol'ovyi, A.M. & Bozhko, L.Yu. (2015). [Thermal resources of Ukraine in the conditions of climate change]. *Ukrains'kij gidrometeorologičnij žurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 16, pp.99-106. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.13>
 65. Palamarchuk, Yu.O., Ivanov, S.V. & Ruban, I.G. (2017). Tekhnologiya chislennogo opisaniya sostoyaniya atmosfery na osnove modeliruyushchey sistemy HARMONIE. [Technology of numerical description atmosphere based on modeling system HARMONIE]. *Tezy dopovidei 1th Vseukrainskoho hidrometeorologichnoho zizdu z mizhnarodnoiu uchastiu [Theses of reports of the First All-Ukrainian Hydrometeorological Congress with International Participation]*, 22-23 March. Odesa. Available at: <http://eprints.library.odku.edu.ua/1924/> (In Russ.)
 66. Groisman, P.Ya. & Ivanov, S.V. (2009). *Regional aspects of climate-terrestrial-hydrologic interactions in non-boreal Eastern Europe*. Springer.
 67. Galytska, E., Danylevsky, V. & Snizhko, S. (2014). [State of aerosol pollution of the atmosphere over Kyiv by means of remote studies AERONET and the impact of forest fires in the summer of 2010]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov [Geopolitics and Ecogeodynamics of regions]*, 10, pp. 437-444. (In Ukr.)
 68. Galytska, E., Danylevsky, V., Hommel, R. et al. (2018). Increased aerosol content in the atmosphere over Ukraine during summer 2010. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, pp. 2101-2118. <https://doi.org/10.5194/amt-11-2101-2018>
 69. Peters, E.B. et al. (2013). Potential climate change impacts on temperate forest ecosystem processes. *Canadian Journal of Forest Research*, 43, pp.939-950.
 70. Morin, X. et al. (2018). Long-term response of forest productivity to climate change is mostly driven by change in tree species composition. *Scientific Reports*, 8, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23763-y>
 71. Chang, J. et al. (2017). Future productivity and phenology

- changes in European grasslands for different warming levels: implications for grassland management and carbon balance. *Carbon Balance Management*, 12, <https://doi.org/10.1186/s13021-017-0079-8>
72. Arneth, A. et al. (2016). Future vegetation–climate interactions in Eastern Siberia: an assessment of the competing effects of CO₂ and secondary organic aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, pp. 5243–5262
73. Shvidenko, A., Buksha, I. & Krakovska, S. (2018). *Urazlyvist lisiv Ukrainy do zminy klimatu [Vulnerability of Ukraine's forests to climate change]*. Kyiv: Nika-Centre.
74. Findell, K.L. et al. (2009). Regional and global impacts of land cover change and sea surface temperature anomalies. *Journal of Climate*, 22, pp. 3248–3269. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2580.1>
75. Rummukainen, M. et al. (2015). Twenty-first-century challenges in regional climate modeling. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(8), pp. 135–137. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00214.1>
76. Lawston, P.M. et al. (2017). Assessment of Irrigation Physics in a Land Surface Modeling Framework using Non-Traditional and Human-Practice Datasets. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(6), pp. 2953–2966. <https://doi.org/doi:10.5194/hess-21-2953-2017>
77. Mahmood, R. et al. (2014). Land cover changes and their biogeophysical effects on climate. *International Journal of Climatology*, 34, pp. 929–953.

MAIN DIRECTIONS IN MODERN RESEARCH OF INTERACTION BETWEEN CLIMATE AND LAND USE/LAND COVER CHANGES

L. A. Pysarenko¹, S. V. Krakovska^{1,2}

¹Ukrainian Hydrometeorological Institute, Ukraine, 03028, Kyiv, Nauky Prospekt., 37,

²State Institution National Antarctic Scientific Center, Ukraine, 01601, Kyiv, Taras Shevchenko Boulevard, 16
lolinal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2885-0213>

The purpose of the research is to analyse and assess existing approaches in investigation of interconnections between climate and underlying surface. Land use/land cover (LULC) influences climate formation via physical and chemical properties (albedo, roughness, height, chemical composition etc.). Climate in its turn affects land cover by means of meteorological parameters (air temperature and humidity, precipitation, wind etc.) and causes both cyclic and irreversible changes in land cover. In addition, anthropogenic factors exacerbate surface-climate interactions through? for example, LULC change that usually causes an additional release of chemical compounds. The paper distinguishes three main directions of the “climate - LULC” interactions research that is conducted mainly with application of satellite monitoring products, observation dataset, geographic information systems (GIS) and numerical modelling. The first direction implies monitoring and research of cyclic changes and transformation of LULC influenced by natural and anthropogenic factors, using different GIS-based satellite and surface meteorological observation databases. Despite significant technical progress and great amount of studies conducted for detecting dynamics of LULC change for different time intervals, the problems of dealing with cloudiness and shadows from orographic and other objects still remain. The second direction investigates the influence of LULC change on the chemical composition in the atmospheric boundary layer and on the regional climate. Numerous researches were dedicated to the influence of different kinds of surface such as forests, grasslands, croplands, urban areas etc. on climate characteristics and also on fluxes, for example, CO₂. The effect of midlatitude forests on climate remains to be one of the challenging and urgent issues. The third direction relates to LULC change modelling and regional climate modelling. For the last decade a spatial resolution of models was considerably increased and, as a result, representation of interaction between atmosphere and land improved. Online integrated numerical atmospheric models are found as the most promising ones. They include "meteorological parameters – atmospheric chemical composition" feedbacks and can consider LULC on global and regional scales. However, some issues still need improvement, namely radiative transfer, cloud microphysics, cloud-aerosol-precipitation interactions, as well as parametrizations of some types of land and their interaction with the atmospheric boundary layer.

Keywords: climate change, natural resource management, land cover, atmospheric boundary layer, climate model, satellite monitoring, anthropogenic activity

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КЛИМАТА И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Л. А. Писаренко¹, С. В. Краковская^{1,2}

¹ Украинский гидрометеорологический институт ГСЧС
Украины и НАН Украины, пр. Науки, 37, 03028, Киев, Украина,

² Государственное учреждение Национальный антарктический научный центр МОН Украины,
бул. Тараса Шевченка, 16, 01601, Киев, Украина
lolinal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2885-0213>

Целью исследования является анализ и оценка существующих методов изучения взаимосвязи между климатом и подстилающей поверхностью. Землепользование, которое определяет тип подстилающей поверхности, оказывает влияние на формирование климата через физические и химические свойства (альbedo, шероховатость, химический состав и т.д.). Климат в свою очередь влияет на подстилающую поверхность посредством метеорологических параметров (температуру и влажность воздуха, осадки, ветер и т.д.) и приводит как к циклическим, так и необратимым изменениям подстилающей поверхности. Эти процессы усиливаются антропогенными факторами, которые значительно влияют на взаимодействие «подстилающая поверхность – климат» из-за, например, изменения типа землепользования, что в свою очередь приводит к дополнительной эмиссии химических соединений. Выделено три основные современные направления исследований взаимодействия климата и изменений в землепользовании / подстилающей поверхности, реализуемых с привлечением спутниковых наблюдений, использованием геоинформационных систем и численного моделирования. Первое направление заключается в мониторинге и определении циклических изменений и трансформаций подстилающей поверхности под воздействием природных и антропогенных факторов с помощью спутникового мониторинга и наземных метеорологических наблюдений с применением ГИС. Несмотря на значительный технический прогресс и большое количество исследований, которые выполнялись недавно для определения динамики изменений подстилающей поверхности за различные временные интервалы, до сих пор остаются проблемы с наличием облачности и затенением от орографических и других объектов. Второе направление касается изучения влияния изменений подстилающей поверхности на химический состав воздуха в пограничном слое атмосферы и на региональные климатические условия. Большое количество исследований посвящено влиянию различных типов подстилающей поверхности, таких как леса, пастбища, поля, городская среда и т.д., на климатические характеристики, а также потоки веществ, например, CO₂. Один из сложных и актуальных вопросов остается влияние лесов умеренных широт на климат. Третье направление связано с моделированием изменений подстилающей поверхности и региональных климатических условий. За последнее десятилетие пространственное разрешение моделей значительно возросло и, как результат, представление взаимодействия между атмосферой и подстилающей поверхностью значительно улучшилось. Проанализированы основные проблемы и вызовы современных исследований взаимосвязи климата и подстилающей поверхности, большинство из которых связаны с несовершенством методов спутникового мониторинга и численного моделирования. Наиболее перспективными определены онлайн-интегрированные численные модели атмосферы, которые включают обратные связи между метеорологическими параметрами и химическим составом атмосферы, на который, в том числе, оказывает влияние подстилающая поверхность как на глобальном, так и на региональном уровнях. Однако, расчеты некоторых физических процессов в моделях нуждаются в совершенствовании: трансформации радиационных потоков, микрофизика облаков, взаимодействие облако-аэрозоль-осадки и параметризация некоторых типов подстилающей поверхности и их взаимодействия с пограничным слоем атмосферы.

Ключевые слова: изменение климата, природопользование, подстилающая поверхность, пограничный слой атмосферы, климатическая модель, спутниковый мониторинг, антропогенная деятельность

Подання до редакції: 31. 10. 2019

Надходження остаточної версії: 17. 04. 2020

Публікація статті: 03. 07. 2020