

Академік НАН України В. І. Лялько, Л. О. Єлістратова,
О. А. Апостолов

Використання індексу ID для виявлення можливої трансформації екосистем у типових ландшафтно-кліматичних зонах України при сучасному кліматі

Наведено важливий аспект проблеми зміни клімату — зміни в географічному поширенні екосистем. Запропоновано використовувати індекс посухи ID, розрахований за даними сенсора MODIS зі супутника TERRA, для виявлення можливого просторового зміщення екосистем та їх прогнозування в майбутньому в межах існуючих ландшафтно-кліматичних зон України під впливом подальшого глобального і регіонального потепління. Отриманні результати можуть слугувати підґрунтям для оперативної розробки адаптаційних заходів у природокористуванні.

Сучасні глобальні й регіональні зміни кліматичних умов в Україні, які відбулися та прогнозуються в подальшому [1], можуть істотно вплинути на просторову дислокацію природних зон і їх біорізноманіття. Природні процеси не встигають пристосовуватися до змін, спричинених господарською діяльністю людства, особливо коли така діяльність односпрямована. Це — вирубка лісів, інтенсивна розробка корисних копалин: видобуток нафти і газу з подальшим їх спалюванням, багатовікове використання ґрунтів у сільськогосподарській діяльності, інтенсивне проведення меліоративних заходів тощо. Дії людини призводять до небезпечного впливу на кліматоутворювальні фактори: підстильна поверхня, зміна складу атмосферного повітря і циркуляції. Сумарний вплив цих складових може призвести до швидких змін у природному середовищі і непередбачуваних наслідків, до яких не можна буде швидко адаптуватися. Одним із можливих механізмів, який може спричинити такі несприятливі тенденції в Україні, це поширення посух.

Мета роботи — оцінити зміни посушливості клімату України за допомогою супутникового індексу посухи ID та їх вплив на нестійкі екосистеми й можливу їх трансформацію.

Прогнози змін екосистем в умовах глобальних змін клімату було представлено в ряді публікацій, наприклад в [2]. Для території України прогноз виконаний в аспекті можливої трансформації природних зон [3], згідно з полумпіричними моделями, в основі яких лежить багато невизначеностей. Такий прогноз дещо відрізняється від дійсності, оскільки він не цілком базується на даних регулярної сітки метеоспостережень. Врахування інформації про зміни ландшафтної структури цих зон і самих ландшафтів висвітлено в працях [4, 5]. Але прогнозування змін природного середовища в умовах змін клімату потребує використання більш точної емпірико-статистичної метеорологічної інформації. Стосовно проблеми аналізу кліматичної інформації (щодо даної проблеми) поки що немає систематизованих даних. Суто кліматичні аспекти висвітлені в статті [6]. Отже, виникла необхідність в аналізі отриманих на сьогодні результатів дослідження зміни екосистем в типових ландшафтно-кліматичних зонах України при стрімкому процесі потепління з використанням новітніх технологій отримання даних, до яких належать дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ),

що опрацьовані сучасними математичними методами. Характерною особливістю потепління в Україні, починаючи з 2000 р., є посушливість клімату.

Для визначення посушливості території України було використано індекс ID (Index of Drought) [7]. При настанні посухи значення вегетаційного індексу знижується, а температури підстильної поверхні підвищуються. Для більш точного визначення моменту настання посухи і території її поширення запропоновано використовувати індекс ID, що прямо пропорційний сумі нічної й денної температур та обернено пропорційний значенню нормалізованого вегетаційного індексу.

Індекс посухи ID розрахований за такою формулою:

$$ID = \frac{T_d + T_n}{NDVI}, \quad (1)$$

де T_d — денна температура; T_n — нічна температура; NDVI — нормалізований вегетаційний індекс. Зрозуміло, що чим вище значення індексу ID, тим більша ймовірність того, що на досліджуваній території спостерігається посуха.

Для досліджень було обрано 2007 р. (спостерігалася посуха). За місяці квітень — жовтень було отримано з супутника TERRA/MODIS продукти MOD11C3 й MOD13C2. Продукт MOD11C3 має денну та нічну місячні температури з просторовим розрізненням 0,05°, а продукт MOD13C2 — місячні дані двох вегетаційних індексів: NDVI й EVI, а також місячні спектральні дані в каналах: blue, red, NIR і MIR з просторовим розрізненням 0,05°. Таким чином, розрахунок місячного індексу посухи для супутника TERRA/MODIS такий:

$$ID = \frac{\text{MOD11C3 (день)} + \text{MOD11C3 (ніч)}}{\text{MOD13C2(NDVI)}}. \quad (2)$$

Дослідження продуктів MOD11C3 й MOD13C2 виконували за допомогою програмного забезпечення в роботі з космічними знімками Erdas Imagine. У програмі Erdas Imagine було виконано таке: перетворення даних з формату hdf на формат img, прив'язка даних продукту MOD13C2 до географічної системи координат та розрахунок значень індексу посухи за допомогою Erdas Imagine, а саме: Spatial Modeler / Model Maker.

З кінця XIX і до початку XXI ст. відбулося підвищення глобальної температури на 0,6 °C, а поза тропічними широтами — на 0,8 °C. За окремі десятиріччя підвищення глобальної температури повітря в середньому становить 0,046 °C, а за останні 30 років воно подвоїлось [1].

Динаміка клімату України (як регіонального) узгоджується з тенденціями глобальних кліматичних змін. В XXI ст. на нашій території вже чітко намітилася тенденція змін клімату в бік потепління.

У ході дослідження було використано карту: фізико-географічного районування території України (автори О. М. Маринич, П. Г. Шищенко [8]), на яку нами винесено опорні метеостанції (всього 54 станції); дані інструментальних спостережень за температурою повітря та опадів на земній поверхні мережі наземних метеорологічних станцій України. За період з 1951 по 2013 рр. проаналізовано бази даних вказаних станцій та зроблено висновок про можливість їх використання для вивчення зміни клімату. З них лише дані 18 станцій проводять спостереження понад 113 років.

Для розташування метеостанцій на фізико-географічній карті було сформовано базу даних, яка включала номер станції, їх координати та назву. З використанням **ГІС Map-Info Professional** винесено 54 станції за їх географічними координатами (рис. 1). Карту

фізико-географічного районування було приведено до географічної системи координат за допомогою програми **Erdas Imagine**.

Аналіз отриманих емпірико-статистичних розрахунків показав, що в Україні за 113 років підвищення річної температури в зоні мішаних (хвойно-широколистяних) та зоні широколистяних лісів, в лісостеповій зоні становило 0,8–1 °C, у степовій зоні — 0,4–0,6 °C. Приріст температури в окремі десятиріччя до 1980 р. в Україні становив 0,1 °C/10 р., у період максимального глобального потепління (1980–2000 рр.) — 0,2 °C/10 р. У цілому середня багаторічна величина за весь період становила 0,2 °C. Хоча в перше десятиріччя XXI ст. за даними більшості метеостанцій приріст дорівнював 0,3 °C/10 р. Усі роки XXI ст. мали додатну аномалію від 0,1 °C (2003 р.) до 0,6 °C (2008 р.) За 113 років додатна аномалія становила 1,4 °C [9]. У XXI ст. підвищення температури відбувалося в усі сезони. В 10–11-ти місяцях з 12-ти спостерігались додатні аномалії [10]. Зміна кількості опадів (за трендом) за 100 останніх років на території України знаходиться в межах 90–110% відносно норми. Кількість опадів в окремі десятиріччя XX ст. коливалась у межах 80–115% відносно норми. У XXI ст. річна кількість опадів не змінюється. Науковцями К. Т. Логвіновим, М. Б. Барабаш [11] у XX ст. проведено дослідження опадів на періодичність. Найяскравіше виражені 11- й 22-річні цикли. Ця закономірність зберігається й у XXI ст. [11]. У найближчому майбутньому (до 2040 р.) передбачається подальший розвиток потепління клімату в Україні [12, 13].

Відомо, що довгоперіодні коливання кліматичних умов на планеті значно впливають на стан екосистем і призводять до істотного зміщення природних зон. Цей процес тривалий і він не може спостерігатися одним-двома поколіннями людей. Але вже зараз при існуючій тенденції потепління клімату в Україні почнуться повільні зміни не стільки меж самих зон, як зміни та переміщення рослинних і тваринних угруповань, а з часом це може спричинити зміни зональності території. При визначенні меж переходу рослинних угруповань потрібно врахувати не тільки характеристику температурного режиму та режиму зволоження території, а й ще вводити для аналізу параметр, який характеризує стан рослин. Таким параметром є індекс посухи ID.

Для місяців квітень — жовтень 2007 р. було розраховано індекс ID за формулою (2). Після цього був розрахований усереднений індекс ID за 2007 р. Вибір саме цих місяців обумовлений періодом вегетації рослинного покриву. Результат розрахунків представлено на рис. 2, де градації значень індексу посухи ID показано різними кольорами.

Нами відзначено зміни супутникового індексу посухи ID на рівні підзон, фізико-географічних країв, областей, районів. Розпочнемо аналіз зі степової зони, де спостерігались найбільші значення ID. Це на територіях середньостепової та південностепової (сухостепової) підзон. Саме тут можуть зазнати значних змін агроландшафти. Як видно з рис. 2, у межах степової зони відчувається гострий дефіцит вологи. Фактично в межах цих районів домінують червоний, темно-червоний, жовтогарячий та жовтий кольори з діапазоном значень ID від 45 до 70 і більше. За нашими даними, значення індексу ID понад 60 вказують на гострий дефіцит вологи, де фіксуються сильна посуха й рослини, зокрема сільськогосподарські, які можуть знаходитися під загрозою загибелі. У статті [14], де розглянуті сценарії змін клімату в степовій зоні України і відповідно прогнозуються зміни екосистем, мова йде про неістотні зміни температури та істотні зміни зволоженості. Зазначимо, що розрахована з допомогою індексу ID супутникова інформація на прикладі 2007 р. вказує на зворотне — недостатню зволоженість. Крім того, за наземними метеорологічними даними виявлено, що до 2000 р. інтенсивність потепління в степовій зоні була дещо менша, ніж в інших природних

зонах. Починаючи з 2001 по 2013 р., ця зона вирівнюється з іншими зонами. Тобто потепління в XXI ст. досить різко охопило південні широти, для нас степова зона — це зерновий район. Крім того, в цій зоні можуть мати місце процеси як кліматичного опустелювання [6], так і зростання фізіологічної сухості ґрунту внаслідок його прогресивного засолення і все більшого поширення в степовій зоні видів ландшафтів, які мають засолені та соленосні ґрунти [5]. Що стосується території північностепової зони, то діапазон значень індексу ID становить від 32 до 45, так звані перехідні значення (див. А на рис. 2), що характеризують слабку посушливість, але територіально займають майже всю підзону. Нагадаємо, що для аналізу взято 2007 р., який охопила тривала посуха, зокрема в активному періоді вегетації рослин. При подальшому прогнозуванні потепління на території України такі кліматичні умови 2007 р. можливо будуть постійними. Саме перехідні значення індексу ID, які більш характерні для степової зони, можуть територіально переміститися в лісостепову зону. Як видно з рис. 2 (позначення С), майже вся територія південноподільської, 70–80% — південнопридніпровської, 60–70% — центральнопридніпровської, 20–30% — придністровсько-східноподільської височинних областей. Дещо менша за площею територія (див. позначення В) південнопридніпровської схилово-височинної області, 40% північнопридніпровської терасової низовини та 5–10% північнополтавської височинної області, на яких при подальшому розвитку потепління спостерігатимуться характерні кліматичні умови степової зони. Відповідно будуть трансформуватися в ці райони степові рослинні угруповання. На інших територіях лісостепу спостерігається індекс ID у діапазоні значень 24–28 як нормальна зволоженість і 20–24 як помірна зволоженість. На досліджуваних територіях зміна одних видів рослинних угруповань на інші зараз не спостерігається, але в подальшому це відбуватиметься впродовж тривалого часу. Діапазони значень ID 16–20 (добре зволожені) і 10–16 (надмірно зволожені) відповідають територіям зони мішаних (хвойно-широколистяних) лісів та широколистяних. Наші розрахунки ID за 2007 р. у цих діапазонах показали переміщення територій зони широколистяних лісів на територію лісостепу (див. позначення D). Слід зазначити, що в цих зонах провідну роль відіграють не зональні кліматичні чинники, а азональні, тому істотних змін в екосистемах не буде. Можна лише вказати на зміну соснового лісу на багатші за видовим складом мішані ліси [5]. Що стосується регіону Карпат та Криму, то вони потребують окремого дослідження, а саме: вплив на екосистеми зміни клімату з висотою та зміну переходу рівнинних ландшафтів у передгірські та степові в приморські.

Таким чином, зміни клімату, які відбувалися в XX і на початку XXI ст. та прогнозуються в подальшому [13], можуть істотно проявитися на характері видового біорізноманіття в природних зонах. Що стосується природних зон, то вони з часом також почнуть змінюватися. Відбудеться поступове зміщення напівпустель у степову зону, степової зони в лісостеп. Це може призвести до небажаних наслідків, оскільки екосистеми не встигнуть адаптуватися до різких і швидких змін клімату. Індекс посухи ID за супутниковими даними TERRA/MODIS можна використовувати для виявлення оперативних (впродовж одного року) змін в екосистемах. Цей індекс, що використаний за даними 2007 р., як року сильної посухи, може застосовуватися для прогнозування змін ландшафтно-кліматичних зон при подальшому розвитку потепління клімату в Україні.

Враховуючи отримані висновки в дослідженні, вже зараз є потреба в оперативній роботі адаптаційних заходів у природокористуванні на державному рівні.

1. *Climate Change 2007. The physical science basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment // Report of the IPCC WMO, UNEP. 2007. – 142 p.*

2. *Элизбарашвили Э. Ш., Элизбарашвили М. Э.* Реакция различных типов ландшафтов Закавказья на глобальное потепление // Изв. РАН. Сер. геогр. – 2002. – № 5. – С. 52–56.
3. *Бойченко С. Г.* Сценарії можливої трансформації природних зон на території України при глобальному потеплінні // Фізична географія та геоморфологія. – 2003. – Вип. 44. – С. 12–18.
4. *Денисюк Г. І.* Лісополе України. – Вінниця: Тезис, 2001. – 284 с.
5. *Гродзинський М. Д., Свідзінська Д. В.* Ніші ландшафтів у просторі кліматичних факторів. – Київ: ВГЛ “Обрії”, 2008. – 259 с.
6. *Барабаш М., Кульбіда М., Корж Т.* Зміна глобального клімату і проблема опустелювання в Україні. – Ч. 1, № 2: Наук. зап. Тернопіл. держ. пед. ун-ту Сер. Географія. – Тернопіль: Вид. Тернопіл. пед. ун-ту, 2004. – С. 82–88.
7. http://d33.infospace.ru/d33_conf/vol2/395-407.pdf.
8. *Шищенко П. Г., Маринич О. М.* Фізична географія України: Підручник. – Київ: Т-во “Знання”, 2003. – 479 с.
9. *Лялько В. І., Єлистратова Л. О., Апостолов О. О.* Використання даних наземного та космічного моніторингу для аналізу сучасних змін клімату в Україні // Доп. НАН України. – 2014. – № 7. – С. 109–115.
10. *Кульбіда М. І., Барабаш М. Б., Єлистратова Л. О. та ін.* Клімат України: у минулому ... і майбутньому? / За ред. М. І. Кульбіди, М. Б. Барабаш. – Київ: Сталь, 2009. – 234 с.
11. *Логвинов К. Т., Барабаш М. Б.* Исследование периодических изменений температуры воздуха и осадков на Украине // Тр. УкрНИГМИ. – 1987. – Вып. 224. – С. 71–76.
12. *Кульбіда М. І., Єлистратова Л. О., Барабаш М. Б.* Сучасний стан клімату України // Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки: Зб. наук. праць. Вип. 35. – Харків: Райдер, 2013. – С. 118–131.
13. *Барабаш М. Б., Ткач Л. О.* Сценарії режиму температури повітря в перші три десятиріччя ХХІ ст. за фізико-географічними зонами України // Водне господарство України. – 2005. – № 3. – С. 47–54.
14. *Бойченко С. Г., Волощук В. М., Сердюченко Н. М.* Про можливість зміщення поясу субтропічних антициклонів на південні регіони України при подальшому глобальному потеплінні // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2004. – № 5. – С. 53–58.

*ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук НАН України”, Київ*

Надійшло до редакції 10.09.2014

Академик НАН Украины В. И. Лялько, Л. А. Елистратова, А. А. Апостолов

Использование индекса ID для выявления возможной трансформации экосистем в типичных ландшафтно-климатических зонах Украины при современном климате

Представлен важный аспект проблемы изменения климата — изменения в географическом распространении экосистем. Предложено использование индекса засухи ID, рассчитанного по данным сенсора MODIS со спутника TERRA, для выявления возможного смещения экосистем и их прогнозирования в будущем в границах существующих ландшафтно-климатических зон Украины под влиянием дальнейшего глобального и регионального потепления. Полученные результаты могут служить основой для оперативной разработки адаптационных мер в природопользовании.

Academician of the NAS of Ukraine **V. I. Lyalko, L. A. Elistratova, A. A. Apostolov**

Use of ID-index for revealing a probable transformation of ecosystems in typical landscape-climatic zones of Ukraine at the modern climate

The prominent aspect of the problem of a climate change such as changes in the geographical distribution of ecological systems is presented. A drought ID-index is proposed was calculated, using MODIS data from TERRA satellite, for the identification of possible shifts of ecosystems within the borders of the existing landscape-climatic zones of Ukraine influenced by a further global and regional warming. The obtained results can form a basis for the operative development of adaptable measures for the wildlife management.