

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

Використання даних наземного та космічного моніторингу температури навколишнього середовища для аналізу сучасної зміни клімату в Україні

Проведено розрахунки температури повітря (за трендом) на території України за 112 років. Дані розрахунків свідчать про постійність вектора процесу потепління в Україні. Для оцінки достовірності даних, що використовуються при аналізі регіональних кліматичних змін та пов'язаних з ними загроз, проведено зіставлення значень вимірів температури повітря за даними наземних метеостанцій, а також теплового поля за космічними знімками з супутників Landsat-4, -5, -7 та супутника TERRA/MODIS. Отримані результати можуть слугувати підґрунтям для подальших комплексних досліджень впливу потепління клімату на умови життєдіяльності населення України.

Актуальність дослідження. Глобальні зміни клімату як одна із центральних екологічних проблем людства викликають занепокоєння. Сучасна наука досягла значних успіхів у вивченні та математичному моделюванні клімату і процесів, які зумовлюють сучасне глобальне потепління клімату. В основі існуючих прогнозів лежить концепція антропогенного характеру глобального потепління, сценарії емісії джерел та стоків парникових газів, а також цілий ланцюг припущень, закладених в основу розроблених сценаріїв.

При цьому досить важливим є дослідження кліматичної системи як фізичного об'єкта. Потрібно брати до уваги складність перебігу процесів в оболонках Землі, неповноту відомостей про фізичні фактори, які визначають зміни в кліматичній системі, роблять принципово неможливим точний прогноз кліматичних змін. Існують великі невизначеності сценаріїв змін джерел та стоків парникових газів. Вуглецевий цикл у кліматичних моделях або не включений, або враховується в загальному вигляді. Недосконалість урахування зворотних зв'язків у кліматичній системі спричиняє великі складності при врахуванні взаємодії атмосфери, гідросфери, кріосфери та біосфери, а також хмарового шару. У пресі, на телебаченні, особливо на сайтах за даної тематики висловлюються пояснення потепління без наукового обґрунтування. Тому метою нашої роботи було встановлення можливостей використання супутникової інформації разом з наземними метеорологічними даними для дослідження сучасної зміни клімату в Україні та попередження і зменшення негативних наслідків.

Аналіз досліджень. Великим досягненням в Україні є те, що вивчення зміни клімату за наземними метеорологічними даними проводяться понад 30 років. Результати проведених досліджень викладені в численних наукових працях [1–4].

Особливості дистанційного зондування Землі для дослідження глобальних і регіональних змін клімату для визначення вмісту в атмосфері парникових газів представлені в статтях [5–8].

На сьогодні в Україні у зв'язку з розв'язанням екологічної проблеми розпочались дослідження зі спільного поєднання наземного та космічного моніторингу. Такий моніторинг необхідний для практичного використання інформації про зміни клімату в Україні, при

веденні і розвитку господарства за нових кліматичних умов, а також для вивчення клімату і його змін для цілей оптимізації взаємодії людини з природою.

Матеріали та методика досліджень. Для визначення тенденції в ряду метеорологічних величин на межі XX і XXI століть використано статистичний метод побудови тренда [9]. Часовий ряд Y_K — значення певної величини (в нашому випадку температури та опадів) у послідовні моменти часу τ_K можна представити у вигляді суми трьох складових:

$$Y(\tau_K) = f_0(\tau) + f_p(\tau) + \varepsilon(\tau), \quad (1)$$

де $Y(\tau_K)$ — значення величини при $K = \overline{0, N-1}$; $f_0(\tau)$ — детермінована зміна, тобто тренд; $f_p(\tau)$ — періодична компонента; $\varepsilon(\tau)$ — випадкова складова або “шум”.

Для проведення зіставлення значень вимірювань температури, згідно з даними наземних метеостанцій та результатами теплового поля за космічними знімками, використовувались території Тарханкутського півострова Криму та південно-східної частини України. Були обрані космічні супутники Landsat-4, -5, -7 та TERRA/MODIS. Вибір супутників обумовлений наявністю в знімальній апаратурі так званого теплового каналу (діапазон електромагнітних хвиль 10,4–12,5 мкм) та даних з цих супутників, які отримували за довгий період часу. Дані з супутників серії Landsat представлені з 1982 р. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Landsat#cite_note-eopo.ls45.tm-12], а дані з супутника TERRA/MODIS — з 2001 р. [<http://en.wikipedia.org/wiki/MODIS>].

Для досліджень були відібрані знімки з супутників серії Landsat за 1984–2013 р., що зроблені в різні роки і в різні періоди. Ці знімки відзначаються практично повною відсутністю хмарності та димки. Всього їх було відібрано та отримано для роботи: 31 — для Тарханкутського півострова та 29 — для території південно-східної частини України.

Для супутника TERRA/MODIS було відібрано місячний продукт температури поверхні землі MOD11C3 LST (Land Survey Temperature) з 2001 р. до 2012 р. за 12 міс., тобто 144 знімки.

Для оцінки вірогідності вимірів температури за даними дистанційних досліджень для супутників серії Landsat та місячного продукту MOD11C3 LST використовувались 10 наземних метеорологічних станцій (Ішунь, Клепініно, Ізюм, Куп’янск, Сватове, Артемівськ, Красноармійськ, Дебальцеве, Лозова, Євпаторія).

Із супутників Landsat-4, -5 у тепловому каналі 6 або в каналах 61 й 62 для супутника Landsat-7 отримуємо цифрові значення (DN — digital number), які не мають фізичної розмірності. З метою отримання значень температури за космічними даними, необхідно перевести дані теплових каналів у значення температури.

Для супутників серії Landsat такий перерахунок виконується з використанням формул [10, 11]:

$$L_\lambda = \frac{L_{\max \lambda} - L_{\min \lambda}}{Q_{\text{cal max}} - Q_{\text{cal min}}} (Q_{\text{cal}} - Q_{\text{cal min}}) + L_{\min \lambda}, \quad (2)$$

$$T = \frac{K_2}{\ln \left(1 + \left(\frac{K_1}{L_\lambda} \right) \right)}, \quad (3)$$

де L_λ — кількісне значення випромінювання, що передано на сенсор; $L_{\min \lambda}$, $L_{\max \lambda}$ — мінімальне й максимальне значення випромінювання для теплового каналу Landsat (табличні

значення [11]); $Q_{cal\ min}$, $Q_{cal\ max}$ — мінімальне й максимальне калібрувальне значення DN (табличні значення [11]); Q_{cal} — калібрувальне значення (DN) в тепловому каналі супутників Landsat; K_1 , K_2 — калібрувальні константи (табличні значення [11]); T — абсолютна температура, К.

Формули (2) й (3) були реалізовані в програмному продукті з обробки космічних знімків Erdas Imagine за допомогою модуля Spatial Modeler. Використання для розрахунку теплового поля вказаного модуля програми Erdas Imagine дозволяє: 1) реалізувати алгоритми перерахунків для кожного з супутників серії Landsat (-4, -5, -7, -8); 2) отримати після розрахунку теплові карти, де зберігається просторова прив'язка та географічна проекція; 3) швидко проводити розрахунки завдяки тому, що програма Erdas Imagine призначена саме для обробки космічних даних.

Зіставлення даних теплового поля, розрахованих за даними космічних супутників серії Landsat з наземними даними, проходить за такою схемою:

на території дослідження обираються метеостанції та встановлюються їх географічні координати;

в програмі з обробки космічних знімків Erdas Imagine запускається Viewer, в якому й відкриваємо перераховане нами теплове поле за даними супутника Landsat;

ставимо курсор на космічному знімку в саме ту точку, яка має координати метеостанції;

в таблицю програми Excel вводимо дані, що зняті за різними датами з кожного супутника на кожен метеостанцію;

проводимо зіставлення наземних і супутникових даних та їх аналіз.

Для зіставлення даних продукту MOD11C3 із супутника TERRA/MODIS з даними наземних вимірів використовується такий самий алгоритм. Відмінність полягає в тому, що розробники вказаного продукту вже дають значення температури в градусах Кельвіна, тобто для роботи не треба виконувати розрахунків за формулами (1) й (2).

Викладення матеріалу. Глобальне потепління прийнято характеризувати осередненою по всій земній кулі температурою повітря над поверхнею суші та океану за великою кількістю (понад 2500) метеорологічних станцій і замірів температури на кораблях погоди — 9 та буюх.

За географічним положенням більша частина території України розташована в тих широтах, де за оцінками експертів Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО) і зміна клімату, і його посушливість достатньо помітні (40–50° пн. ш.).

Для території України прояви змін глобального клімату в усіх районах підсилюються за рахунок внутрішніх факторів: зміною ландшафтів внаслідок багатовікової господарської діяльності, сучасною зміною водних ресурсів, меліорацією, процесами урбанізації. Недоліком є те, що метеорологічні станції, які ведуть довготривалі спостереження знаходяться вже в урбанізованому середовищі. Україна є урбанізованою територією, це враховують за допомогою відповідних поправок, запропонованих в Українському науково-дослідному гідрометеорологічному інституті МНС України та НАН України Н. П. Гребенюк, М. Б. Барабаш [11], але й поправки також змінюються. Тому для вирішення поставлених задач слід залучати регулярні дані дистанційного зондування, для визначення окремих геофізичних параметрів. Дистанційне зондування допоможе “збільшити масштаб” та більш коректно інтерполювати результати спостережень з метеорологічних станцій. Саме поєднання метеорологічних значень та даних ДЗЗ дуже важливе для розуміння коливань та змін клімату, особливо на території, де відносно густа сітка метеорологічних станцій (190). Таким чином, територія України може бути прикладом для отримання реальних характеристик змін клімату.

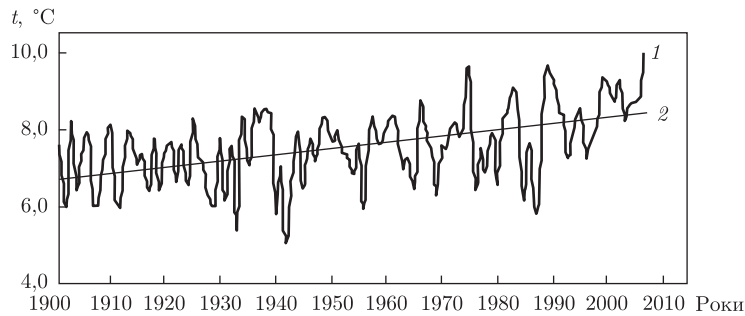


Рис. 1. Багаторічний хід річної температури повітря в Україні: 1 — фактичний; 2 — віковий (тренд)

Рис. 1 ілюструє багаторічний хід температури повітря в Україні за період 1900–2012 рр. та розрахований тренд за формулою (1). За 112 років за трендом у зоні мішаних й широколистяних лісів та лісостепу зростання температури становить 0,8–1 °С; у степовій зоні — близько 0,5 °С.

Максимально достовірне прогнозування кліматичних змін, а також можливі негативні наслідки від їх аномальних проявів потрібно проводити з використанням як точних наземних даних метеорологічних станцій, так і з урахуванням супутникової інформації, що дозволить технічними засобами перевірити результати досліджень зі змін клімату. Пряме використання даних без наукового аналізу може дати на перший погляд результати, які не можна порівняти. Тому дослідницька робота полягає в пошуку закономірностей даних зі супутника і станцій та визначенні в них наявності тенденції. Можливо, що і наземні, і супутникові дані можуть показувати одну і ту саму закономірність, але величини будуть різними.

Зіставлення наземних та супутникових даних проводилось за такою методикою: спочатку розраховувалось усереднене розходження між цими наборами даних, потім усереднене розходження для кожної станції і для кожного супутника серії Landsat. Подальшим кроком була побудова кореляційної залежності між даними наземної температури та розрахованої за супутниковими даними.

Усереднене розходження в значеннях температури для окремої метеостанції: для кожної метеостанції:

$$\Delta t_j = \frac{\sum_{i=1}^N (S_{ij} - G_{ij})}{N}, \quad (4)$$

де S_{ij} — температура, що розрахована за супутниковими даними Landsat; G_{ij} — температура за наземними даними з метеостанції; i — дати з наземними та супутниковими даними; j — номер метеостанції; N — загальна кількість дат зйомки.

Усереднене розходження між наземними та супутниковими даними для всіх станцій:

$$\Delta t = \frac{\sum_{j=1}^M \Delta t_j}{M} \quad (5)$$

(тут M — загальна кількість метеостанцій).

Аналіз отриманих результатів засвідчив, що розходження між наземними та супутниковими даними різне для різних супутників серії Landsat. При порівнянні усереднених роз-

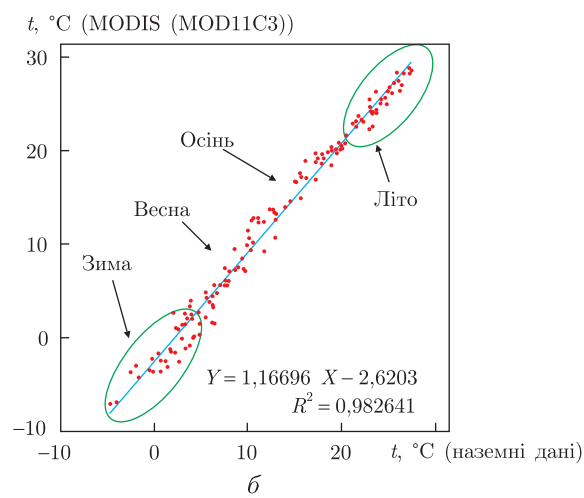
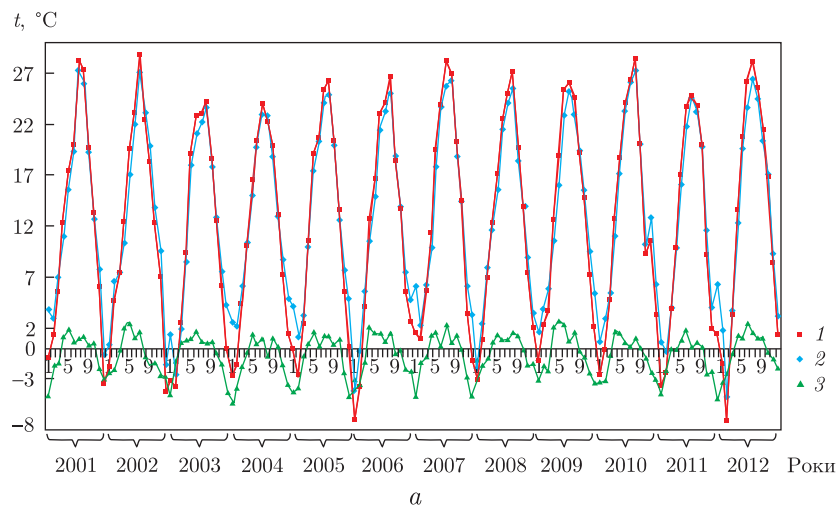


Рис. 2. Зіставлення наземних місячних значень температури за даними метеостанції “Євпаторія” та температури земної поверхні за даними продукту MOD11C3: *a* — графік наземних та супутникових даних температури та їх розходження; *b* — рівняння регресії та коефіцієнт кореляції

ходжень між даними наземними та з супутника Landsat-4, -5 за періоди 1984–1990 рр. та 2000–2011 рр., було виявлено значне покращення при зіставленні для даних з супутника Landsat-4, -5, отриманих після 2000 р. Так, для Тарханкутського півострова: за перший період усереднене розходження становить 8,27 °С, за другий — 3,65 °С; для південно-східної частини України: за перший період усереднене розходження становить 5,69 °С, за другий — 2,05 °С. Для супутника Landsat-7 усереднене розходження становить: для Тарханкутського півострова — 1,90 °С, для східної частини України — 2,06 °С. Отже, для наукових цілей найкраще використовувати інформацію супутника Landsat-7. При роботі з космічними знімками з супутника Landsat-4, -5 до 2000 р. потрібно враховувати велике розходження з наземними даними за цей період.

Нами проаналізована можливість застосування середньомісячного продукту MOD11C3 із супутника TERRA/MODIS при дослідженні змін клімату та їх наслідків, а також зіставленні наземні середньомісячні дані температури з метеостанцій та дані температури місячного продукту MOD11C3, що були взяті за весь період — з 2001 по 2012 рр. Такий аналіз проводився по чотирьох станціях, дві на кожен досліджену територію (рис. 2). З рисунку видно, що супутникові дані дають більші значення у порівнянні з наземними. Зимові місяці показують дещо максимальне розходження, це пов'язано з природними кліматичними умовами (сніг, хмарність). Для Тарханкутського півострова $R^2 = 0,98$, для південно-східної частини України $R^2 = 0,97$. Отже, в обох випадках площинно-часовий характер розподілу температур збігається з супутниковими та наземними даними.

Супутникова інформація вигідно розширює можливості наземних вимірів, перевагою якої слугують площинні дані, тоді як наземні — точкові. Крім того, метеорологічні станції розташовані на великій відстані одна від одної. Саме при вивченні зміни клімату потрібно знати площинні характеристики метеорологічних величин, при цьому можна визначити аномалії одного знака, виключати якісь випадкові наземні джерела тепла, які на станції не можуть бути поміченими.

Незамінним є використання супутникової інформації при виявленні та дослідженні наслідків від аномальних проявів зміни клімату — *стан лісів при пожежонебезпечних періодах; виникнення та поширення шкідників рослин; стан сільськогосподарських угідь, виявлення процесів опустелювання, а також шквалів, смерчів, які носять локальний характер і не можуть бути помітними при наземному спостереженні станцій*. При всіх цих випадках супутникові дані дають уяву про справжні масштаби стихійних лих та інформацію щодо початку їх виникнення.

Таким чином, виконаний нами аналіз температурного режиму земної поверхні і приземного шару повітря показав, що наземні та супутникові дані вказують на спільну закономірність. Тому супутникові дані можна вважати правомірними при використанні в кліматичних прогнозах і їх треба розглядати в комплексі з даними наземних спостережень при вивченні негативних наслідків для природного середовища й людини та прояву глобальних і регіональних змін клімату.

Наземні й супутникові дані доповнюють один одного та дають більш об'єктивну інформацію для прогнозу змін клімату та наслідків цих змін [13].

1. Бучинский И. Е. Климат Украины в прошлом, настоящем и будущем. — Киев: Гос. изд-во с.-х. лит., 1963. — 307 с.
2. Логвинов К. Т., Барабаш М. Б. О многолетних изменениях температуры и осадков на Украине // Тр. УкрНИИ. — 1978. — Вып. 169. — С. 77–83.

3. *Клімат України* / За ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. – Київ: Вид-во Раєвського, 2003. – 343 с.
4. *Кульбіда М. І., Барабаш М. Б., Єлистратова Л. О., Адаменко Т. І., Гребенюк Н. П., Татарчук О. Г., Корж Т. В.* Клімат України: у минулому . . . і майбутньому? / За ред. М. І. Кульбіди, М. Б. Барабаш. – Київ: Сталь, 2009. – 234 с.
5. *Лялько В. И., Нильсон С., Швиденко А. З., Сахацкий А. И., Ходоровский А. Я.* Особенности дистанционного зондирования Земли при исследовании глобальных и региональных изменений климата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. науч. статей. Т. 2. – Москва: GRANP polygraf, 2005. – С. 23–27.
6. *Лялько В. И., Сахацкий О. И., Костюченко Ю. В. та ін.* Дослідження впливу CO₂ та CH₄ в атмосфері на клімат за матеріалами космічних зйомок // Геол. журн. – 2007. – № 4. – С. 7–16.
7. *Лялько В. И., Мовчан Д. М., Сябряй С. В.* Оцінка впливу астрономічних та геоботанічних факторів на формування кліматичних особливостей регіонів (на прикладі України) // Геоінформатика. – 2009. – № 3. – С. 74–82.
8. *Костюченко Ю. В., Білоус Ю. Г., Мовчан Д. М. та ін.* Застосування методів нелінійної просторово-часової регуляризації для аналізу даних метеорологічних спостережень // Космічна наука і технологія. – 2013. – 19, № 5. – С. 52–59.
9. *Кобьшева Н. В., Наровлянский Г. Я.* Климатическая обработка метеорологической информации. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1978. – 245 с.
10. *Спутниковые методы поиска полезных ископаемых* / Под ред. В. И. Лялько и М. А. Попова. – Киев: Карбон Лтд, 2012. – 436 с.
11. <http://gis-lab.info/qa/dn2temperature.html>.
12. *Гребенюк Н. П., Барабаш М. Б.* Про зміни температури повітря в містах України у процесі урбанізації // Наук. праці УкрНДГМП. – 2004. – Вип. 253. – С. 148–154.
13. *Изменения земных систем в Восточной Европе* / Отв. ред. В. И. Лялько. – Киев: ПП (Фолиант), 2010. – 582 с.

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

Надійшло до редакції 11.02.2014

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

Использование данных наземного и космического мониторинга температуры окружающей среды для анализа современного изменения климата в Украине

Проведен расчет температуры воздуха (по тренду) на территории Украины за 112 лет. Данные расчетов свидетельствуют о постоянности вектора процесса потепления в Украине. Для оценки достоверности данных, которые используются при анализе региональных климатических изменений и связанных с ними угроз, проведено сопоставление значений измерений температуры воздуха по данным наземных метеостанций, а также теплового поля по космическим снимкам со спутников Landsat-4, -5, -7 и спутника TERRA/MODIS. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейших комплексных исследований влияния потепления климата на условия жизнедеятельности населения Украины.

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

Use of the data of ground and space monitorings of the environment temperature for the analysis of modern changes of the climate in Ukraine

The calculation of the air temperature (on a trend) within the territory of Ukraine for 112 years has been done. The data of calculations show the constancy of the vector of the process of warming in Ukraine. To evaluate the reliability of data, which are used for the analysis of the regional climatic changes and the threats connected with them, the comparison of the values of measurements of the air temperature according to the ground meteorological stations and the data of a thermal field of the space images from satellites Landsat-4, -5, -7 and satellite TERRA/MODIS has been carried out. The obtained results can be used for the further complex researches of the influence of the warming of a climate on the conditions of the vital activity of the population of Ukraine.