

УДК 528.88:551.583

## ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ НАЗЕМНОГО ТА КОСМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ДЛЯ АНАЛІЗУ СУЧАСНИХ ЗМІН КЛІМАТУ В УКРАЇНІ<sup>☆</sup>

В. І. Лялько\*, Л. О. Єлістратова, О. А. Апостолов

ДУ "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України", Київ, Україна

**Резюме.** Проведено розрахунки температури повітря (за трендом) по території України за 112 років. Дані розрахунків свідчать про постійність вектора процесу потепління в Україні. Для оцінки достовірності даних, що використовуються для аналізу регіональних кліматичних змін та пов'язаних з ними загроз проведено співставлення значень вимірів температури повітря за даними наземних метеостанцій та даних теплового поля за космічними знімками космічних 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.

**Ключові слова:** температура повітря, кліматичні зміни, Landsat 4, 5, 7, TERRA/MODIS, дистанційне зондування Землі

© В. І. Лялько, Л. О. Єлістратова, О. А. Апостолов. 2013

### Актуальність дослідження

Однією із центральних екологічних проблем людства є проблема глобальних змін клімату, яка викликає соціальне 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 і цілий ланцюг припущень, які закладені в основу розроблених сценаріїв.

При цьому досить важливим є дослідження кліматичної системи як фізичного об'єкта. Потрібно брати до уваги складність протікання в оболонках Землі процесів, неповноту відомостей про фізичні фактори, які визначають зміни в кліматичній системі, роблять принципово неможливий точний прогноз кліматичних змін. Існують великі невизначеності сценаріїв змін джерел та стоків парникових газів. Вуглецевий цикл в кліматичних моделях або не враховується взагалі, або враховується в загальному вигляді. Не досконало враховуються зворотні зв'язки в кліматичній системі. Виникають великі складності при врахуванні взаємодії атмосфери, гідросфери, кріосфери та біосфери, а також хмарного слою. Досить часто у пресі, телебаченні, особливо на сайтах Інтернет висловлюються пояснення потепління без наукового обґрунтування.

Тому у людей посилюється скептичне ставлення до достовірності отриманих результатів про зміни клімату та клімату майбутнього. Виникла необхідність в аналізі отриманих на сьогоднішній час результатів дослідження змін клімату з різних позицій.

Метою роботи є: виявлення можливостей вико-

ристання супутникової інформації разом з наземними метеорологічними даними для дослідження сучасної зміни клімату в Україні та попередження і зменшення негативних наслідків.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Великим досягненням в Україні є те, що зміни клімату за наземними метеорологічними даними ведуться більше 30 років. Результати цих досліджень викладені в багаточисельних наукових працях вітчизняних дослідників: Бучинського І. Є., Логвінова К. Т. [1, 7] та нині діючих науковців: Барабаш М. Б., Бойченко С. Г., Волощука В. М., Кульбіди М. І., Мартазінової В. Ф. та інших [3, 4].

Особливості дистанційного зондування Землі для дослідження глобальних і регіональних змін клімату для виявлення вмісту в атмосфері парникових газів висвітлено в працях Лялька В. І., Сахацького О. І., Ходоровського А. Я., Костюченка Ю. В., Мовчана Д. М. [6, 8, 9, 10] та інших.

В даний час в Україні для вивчення зміни клімату тільки розпочалися дослідження з 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 і методика досліджень

Для визначення тенденції в ряду метеорологічних величин на межі ХХ та ХХІ сторіч використано такий метод [5]. Часовий ряд  $Y_k$  — значення певної величини (в нашому випадку температури та опадів) в послідовні моменти часу  $t_k$  можна представити у вигляді суми трьох складових:

<sup>☆</sup> Доповіді Національної академії наук України. 2014 (в друці)

\* Тел. +380 44 486 94 05

e-mail: alex@casre.kiev.ua

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

де  $Y(\tau_k)$  — значення величини у послідовні моменти часу  $K = 0, N - 1$ ;  $f_0(\tau)$  — детермінована зміна, тобто тренд. Слід зазначити, що детермінована складова  $f_p(\tau)$  може складатися з трендів і довгоперіодичних коливань із довжиною хвилі більшою, ніж довжина ряду);  $f_p(\tau)$  — періодична компонента;  $\varepsilon(\tau)$  — випадкова складова, або “шум”.

Для проведення співставлення значень вимірів температури за даними наземних метеостанцій та даних теплового поля за космічними знімками, використовувалась територія Тарханкутського півострова Криму та південно-східна частина України. Були обрані космічні супутники Landsat 4, 5, 7 та TERRA/MODIS. Вибір цих супутників обумовлено:

- наявністю в знімальній апаратурі супутників, так званого, теплового каналу (діапазон електромагнітних хвиль 10.4–12.5 мкм);
- дані з цих супутників можливо отримати за довгий період часу. Дані з супутників серії Landsat є в наявності з 1982 року, а дані з супутника TERRA/MODIS — з 2001 року.

Для досліджень були відібрані знімки з супутників серії Landsat за 1984–2013 роки, зроблені у різні роки, у різні періоди року. Відібрані знімки відзначаються практично повною відсутністю хмарності та димки. Всього було відібрано та отримано для роботи: для Тарханкутського півострову — 31 космічних знімка, для території південно-східної частини України — 29 знімків.

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

Для оцінки достовірності вимірів температури за даними дистанційних досліджень: для супутників Landsat та місячного продукту MOD11C3 LST використовувались 10 наземних метеорологічних станцій (Ішунь, Клепініно, Ізюм, Куп'янськ, Сватове, Артемівськ, Красноармійськ, Дебальцеве).

### Перерахунок даних теплового каналу супутника Landsat в значення температури

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

Для супутників серії Landsat такий перерахунок виконується з використанням наступних формул [11, 12]:

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

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

де,  $L_\lambda$  — кількісне значення випромінювання, що прийшло на сенсор,  $L_{\min\lambda}, L_{\max\lambda}$  — мінімальне та максимальне значення випромінювання для теплового каналу Landsat (табличні значення),  $Q_{cal\min}, Q_{cal\max}$  — мінімальне та максимальне калібрувальне значення DN (табличні значення),  $Q_{cal}$  — калібрувальне значення (DN), значення в тепловому каналі Landsat,  $K_1, K_2$  — калібрувальні константи (табличні значення),  $T$  — абсолютна температура в градусах Кельвіна.

Формули (2) та (3) були реалізовані в програмному продукті по обробці космічних знімків Erdas Imagine, за допомогою модуля Spatial Modeler. Використання для розрахунку теплового поля модуля Spatial Modeler програми Erdas Imagine дозволяє:

- реалізувати алгоритми перерахунків для кожного з супутників серії Landsat (4, 5, 7, 8);
- отримати після розрахунку теплові карти, де зберігається просторова прив'язка та географічна проекція;
- швидко проводити розрахунки, завдяки тому, що програма Erdas Imagine призначена саме для обробки космічних даних.

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

- 1) На території дослідження обираються метеостанції та встановлюються їх географічні координати.
- 2) В програмі по обробці космічних знімків Erdas Imagine, запускається Viewer, в якому і відкриваємо наше перераховане теплове поле за даними космічного супутника Landsat.
- 3) Ставимо курсор на космічному знімку в саме ту точку, яка має координати метеостанції.
- 4) В таблицю програми Excel вводимо дані зняті за різні дати з кожного супутника на кожну метеостанцію.
- 5) Проводимо співставлення та аналіз наземних та супутникових даних.

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

### Виклад матеріалу

Глобальне потепління прийнято характеризувати осередненою по всій земній кулі температурою над поверхнею суші та океану по великій кількості (понад 2 500) метеорологічних станцій та замірів на кораблях погоди.

За географічним положенням більша частина території України розташована в тих широтах, де за оцінками експертів Всесвітньої метеорологічної

організації (ВМО) і зміна клімату, і посушливість клімату достатньо помітні (40–50° пів. ш.).

Для території України прояви змін глобального клімату у всіх районах підсилюються за рахунок внутрішніх факторів: зміною ландшафтів внаслідок багатотварної господарської діяльності, сучасною зміною водних ресурсів, меліорацією, процесами урбанізації.

Недоліком є те, що метеорологічні станції, які ведуть довготривалі спостереження знаходяться уже в урбанізованому середовищі. Україна є урбанізованою територією, її урбанізацію враховують з допомогою відповідних поправок, запропонованих Гребенюк Н. П., Барабаш М. Б. [2], але ці поправки також змінюються. Тому для вирішення поставлених задач слід залучати матеріали дистанційного зондування, які можуть забезпечити постійні, з географічною прив'язкою регулярні продукти для окремих геофізичних параметрів. Дистанційне зондування допоможе “збільшити масштаб” та більш коректно інтерполювати дані спостережень з метеорологічних станцій. Саме поєднання метеорологічних величин та даних ДЗЗ дуже важливе для розуміння коливаний 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.

На рис. 1 представлено багаторічний хід температури повітря в Україні за період 1900–2012 роки та розрахований тренд за формулою (1). За 112 років за трендом в зоні мішаних лісів, широколистяних лісів, лісостепу зростання температури становить 0.8–1°C. В степовій зоні — близько 0.5°C.

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 по супутнику і по станціях. Визначення в них наявності тенденції.

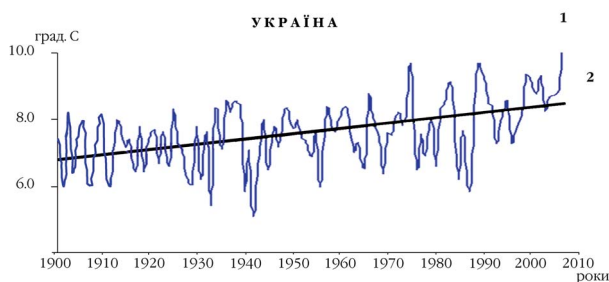


Рис. 1. Багаторічний хід річної температури повітря (°C) в Україні. 1 — фактичний хід, 2 — віковий хід (тренд)

Можливо, що і наземні дані і супутникові дані можуть показувати одну і ту ж закономірність, але величини будуть різні.

Співставлення наземних та супутникових даних проводилось за наступною методикою. Спочатку розраховувалось усереднене розходження між цими наборами даних, потім розраховувалось усереднене розходження для кожної станції, для кожного супутника серії Landsat. Наступним кроком була побудова кореляційної залежності між даними наземної температури та температури розрахованої за супутниковими даними.

Усереднене розходження для кожної станції

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

де  $G_{ij}$  — температура, за наземними даними з метеостанцій,  $S_{ij}$  — температура, розрахована за супутниковими даними Landsat,  $i$  — дати, на які присутні наземні та супутникові дані,  $j$  — номери метеостанцій,  $N$  — загальна кількість дат зйомки,  $\Delta T_j$  — усереднене розходження в значеннях температури для окремої метеостанції.

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

де  $\Delta T_j$  — усереднене розходження в значеннях температури для окремої метеостанції,  $j$  — номери метеостанцій,  $M$  — загальна кількість метеостанцій.

Аналіз отриманих результатів засвідчив, що розходження між наземними та супутниковими даними різне для різних супутників серії Landsat. При порівнянні усереднених розходжень між наземними даними та даними з супутника Landsat 4, 5 за період 1984 до 1990 роки та з 2000 до 2011 роки, було виявлено значне покращення при співставленні для даних з супутника Landsat 4, 5, отриманих після 2000 року. Так для Тарханкутського півострову: за перший період усереднене розходження складає — 8.27°C, за другий період — 3.65°C. Для південно-східної частини України: за перший період усереднене розходження складає — 5.69°C, за другий період — 2.05°C.

Для супутника Landsat 7 усереднене розходження складає: для Тарханкутського півострову — 1.90°C, для східної частини України — 2.06°C.

Зроблено висновок: що для наукових цілей найкраще використовувати інформацію супутника Landsat 7. При використанні космічних знімків з супутника Landsat 4, 5 до 2000 року потрібно враховувати велике розходження з наземними даними за цей період.

Було проаналізовано можливість використання середньомісячного продукту MOD11C3 з супутника TERRA/MODIS при дослідженні змін клімату та їх наслідків. Були зіставлені наземні середньомісячні дані температури з метеостанцій та дані температури місячного продукту MOD11C3. Дані були взяті за всі

місяці, з 2001 по 2012 рр. Такий аналіз проводився по 4 станціях, дві на кожну досліджену територію. Результати співставлення даних з метеостанції “Євпаторія” та продукту MOD11C3 наведено на рис. 2.

Супутникові дані дають більші значення, порівняно з наземними. Зимові місяці дають дещо максимальне розходження, це пов'язано з природними кліматичними умовами (сніг, хмарність).

Коефіцієнт кореляції складає для Тарханкутського півострова 0,98, для південно-східної частини України — 0,97. Отже в обох випадках площинно-часовий співпадає характер розподілу температур, за супутниковими та наземними даними.

Супутникова інформація вигідно розширює можливості наземних вимірів. Перевагою супутникових даних є те, що вони свого роду 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 знаку, виключати якісь випадкові наземні джерела тепла, які на станції не можуть бути помічені.

Крім того незамінним є використання супут-

никової інформації при виявленні та дослідженні наслідків від аномальних проявів зміни клімату. Це стан лісів при пожежонебезпечних періодах, виникненні поширення шкідників рослин; стан сільськогосподарських угідь, виявлення процесів опустелювання а також шквалів, смерчів, які носять локальний характер і можуть бути не помітні при наземному спостереженні станцій. При всіх цих випадках супутникові дані дають уяву про справжні масштаби стихійних лих, а також раннє повідомлення щодо їх виникнення.

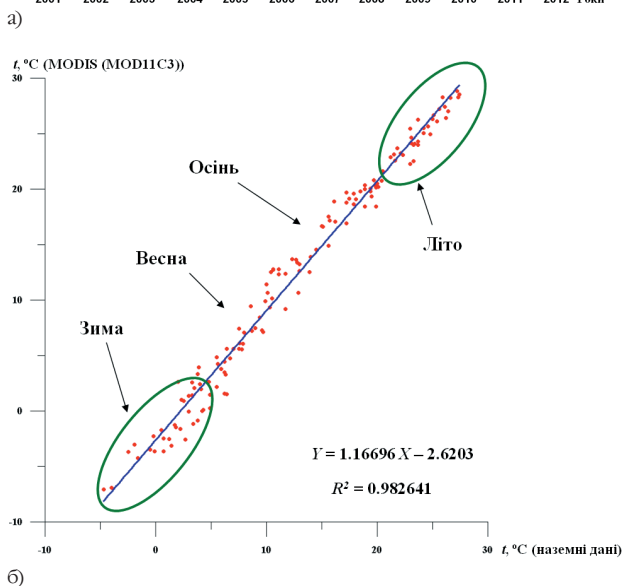
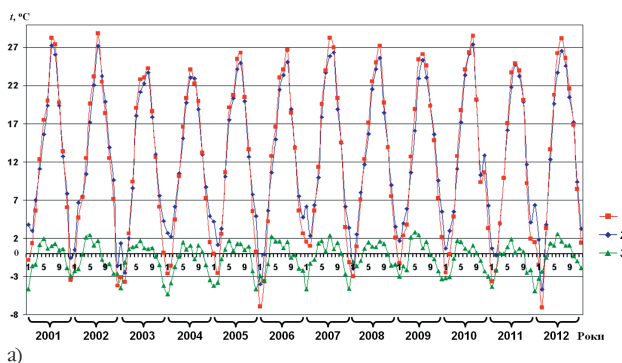
### Висновок

Виконаний аналіз температурного режиму земної поверхні і приземного шару повітря показав, що наземні дані і супутникові показують одну і ту ж закономірність. Тому супутникові дані можна вважати правомірними для використання в кліматичних прогнозах, вони повинні розглядатися в комплексі з даними наземних спостережень для вивчення негативних наслідків для природного середовища та людини прояву глобальних і регіональних змін клімату.

Наземні та супутникові дані доповнюють одні одних та дають більш об'єктивну інформацію для прогнозу змін клімату та наслідків цих змін.

### Література

1. Бучинский И. Е. Климат Украины в прошлом, настоящем и будущем / И. Е. Бучинский. — К.: Гос. изд-во сельскохозяйственной литературы, 1963. — 307 с.
2. Гребенюк Н. П. Про зміни температури повітря в містах України у процесі урбанізації / Н. П. Гребенюк, М. Б. Барабаш // Наук. праці УкрНДГМІ. — 2004. — Вип. 253. — С. 148–154.
3. Клімат України / За ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. — Київ: В-во Раєвського, 2003. — 343 с.
4. Клімат України: у минулому... і майбутньому? / М. І. Кульбіда [та ін.] / за ред. М. І. Кульбіди, М. Б. Барабаш: Монографія. — К.: Сталь, 2009. — 234 с.
5. Кобышева Н. В. Климатическая обработка метеорологической информации / Н. В. Кобышева, Г. Я. Наровлянский. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 245 с.
6. Костюченко Ю. В. Застосування методів нелінійної просторово-часової регуляризації для аналізу даних метеорологічних спостережень / Ю. В. Костюченко [та ін.] // Космічна наука і технологія, 2013. — Т. 19. — № 5. — С. 52–59.
7. Логвинов К. Т. О многолетних изменениях температуры и осадков на Украине / К. Т. Логвинов, М. Б. Барабаш // Труды УкрНИИ. 1978. — Вып. 169. — С. 77–83.
8. Лялько В. И. Особенности дистанционного зондирования Земли при исследовании глобальных и региональных изменений климата / В. И. Лялько [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования



**Рис. 2.** Співставлення наземних місячних значень температури за даними метеостанції “Євпаторія” та температури земної поверхні за даними продукту MOD11C3

- а) Графік наземних та супутникових даних температури та їх розходження
- б) Рівняння регресії та коефіцієнт кореляції



- ния Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. науч. статей. — Т. 2. — М.: GRANP polygraf, 2005. — С. 23–27.
9. Лялько В. І. Дослідження впливу CO<sub>2</sub> та CH<sub>4</sub> в атмосфері на клімат за матеріалами космічних зйомок / Лялько В. І. [та ін.] // Геол. журнал. — К., 2007. — №4. — С. 7–16.
10. Лялько В. І. Оцінка впливу астрономічних та геоботанічних факторів на формування кліматичних особливостей регіонів (на прикладі України) / В. І. Лялько, Д. М. Мовчан., С. В. Сябряй // Геоінформатика. — 2009. — №3. — С. 74–82.
11. Спутниковые методы поиска полезных ископаемых / Под ред. акад. НАНУ Украины В. И. Лялько и д. т. н. М. А. Попова. Киев: Карбон-Лтд, 2012. — 436 с.
12. Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/dn2temperature.html>.

#### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ НАЗЕМНОГО И КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ДЛЯ АНАЛИЗА СОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В УКРАИНЕ

В. И. Лялько, Л. А. Елистратова, А. А. Апостолов

**Резюме.** 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 и данных теплового поля по космическим снимкам с космических 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.

**Ключевые слова:** температура воздуха, климатические изменения, Landsat 4,5,7, TERRA/MODIS, дистанционное зондирование Земли

#### USE OF DATA OF GROUND AND SPACE MONITORING OF THE ENVIRONMENT TEMPERATURE FOR THE ANALYSIS OF MODERN CHANGE OF THE CLIMATE IN UKRAINE

V. I. Lyalko, L. O. Elistratova, O. A. Apostolov

**Abstract.** The calculation of the air temperature (on a trend) within the territory of Ukraine for 112 years has been done. Data of the calculations show the permanency of the vector of 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 data of a thermal field of the space images from satellites Landsat 4, 5, 7 and satellite TERRA/MODIS has been carried out. The received results can be used for the further complex researches of influence of warming of a climate on the conditions of the vital activity of the population of Ukraine.

**Keywords:** temperature of air, climatic changes, Landsat 4,5,7, TERRA/MODIS, remote sensing of the Earth