

І.В. Калініна, Г.М. Крученицький, Т.В. Скоробогатий

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ КЛІМАТИЧНИХ НОРМ АЛЬБЕДО ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВОГО ЗОНДУВАННЯ

Зроблено спробу проаналізувати можливість дослідження зональних, регіональних та локальних значень альbedo за даними про відбиту радіацію, що отримуються шляхом супутникового зондування. За отриманими результатами проведені дослідження кліматичних норм для території України.

Альbedo, або відбивна здатність, є однією з найважливіших характеристик земної поверхні та атмосфери, яка суттєво впливає на особливості радіаційного балансу, а, отже, і на клімат. Тому дослідження глобальних, регіональних та локальних особливостей альbedo є однією з найважливіших ланок вивчення кліматичних особливостей як планети в цілому, так і окремих регіонів. Проте, задача дослідження альbedo є досить складною, а в деяких випадках, навіть, неможливою, адже:

- значення альbedo вимірюють тільки для планети в цілому, а, отже, дослідження його регіональних та локальних особливостей базується на теоретичному підґрунті;
- розрахунки альbedo проводяться з недостатньою періодичністю для виділення його короткоперіодичних змін та особливостей;
- ряди даних альbedo є короткими та містять багато пропусків.

Таким чином, для досліджень відбивної здатності даних про альbedo недостатньо і необхідно знайти деякий замінник, котрий можна використовувати при дослідженнях його змін в часі та регіональних особливостей. Тому в даній роботі в якості такого замінника запропонована величина, що вимірюється за допомогою відомого супутникового приладу TOMS, має ряди даних досить великі за охопленням часовим інтервалом і в англomовній літературі отримала назву “*reflectivity*” [8].

Отже, основними задачами даної роботи є обґрунтування можливості використання *reflectivity* для досліджень регіональних

особливостей альbedo та його часових змін, а також знаходження кліматичних норм альbedo за його даними на різних рівнях: глобальному, зональному, регіональному та локальному.

Сумарна радіація, що надходить на земну поверхню, у більшій частині поглинається у верхньому тонкому шарі води чи ґрунту і переходить у тепло, а частково відбивається. Віддзеркалення сонячної радіації землею поверхнею залежить від характеру цієї поверхні. Відношення потоку відбитої радіації до потоку радіації, що падає на дану поверхню, називається альbedo поверхні [4]. Це відношення виражається у відсотках.

У сучасну епоху планетарне альbedo має чітку тенденцію до зменшення. Було встановлено [1], що тенденції зменшення альbedo підстильної поверхні мають тісний зв'язок зі збільшенням температури повітря і скороченням днів зі сніговим покривом, що відмічається при сучасному потеплінні глобального клімату. Ще в період з 1967 до 1986 рр. для більшості регіонів колишнього СРСР було відмічено [1] зменшення альbedo підстильної поверхні в окремі місяці весняного та осіннього сезонів і в цілому для кожного з сезонів. За даними Американського геофізичного товариства [8] на сьогодні альbedo Землі становить 29,7 %. За даними [5] для альbedo характерно збільшення в літні місяці і зменшення в зимові.

На території України [2] протягом року альbedo підстильної поверхні відзначається стабільністю в теплий період року і коливається в межах 17-23% для різних регіонів і значною мінливістю в зимовий сезон (коливається в межах від 22 до 73% для різних регіонів).

Враховуючи важливе значення альbedo для клімату планети та окремих регіонів дослідження його кліматичних норм в умовах їх постійних змін є надзвичайно важливою задачею.

Як було сказано вище, альbedo розраховують для планети в цілому, вимірюючи відбиту Землею сонячну радіацію при спостереженнях за темним боком Місяця. Але також можна вимірювати відбиту поверхнею або хмарами радіацію інструментальним шляхом за допомогою супутника. Отримана таким чином величина і має назву *reflectiviti*. Дані *reflektyviti*, що використовувались в дослідженнях, представлені даними американського апарату TOMS (Total Ozone Measurement System) [7], що має найдовші та найоднорідніші ряди *reflektyviti* з усіх вимірювальних засобів космічного базування. У дослідженнях були використані тільки

дані першої та третьої місії TOMS (сьомої версії) і охоплюють часовий інтервал з лютого 1978 до грудня 2002 рр. та мають пропуски з травня 1993 до серпня 1996 рр. Значення *reflektyviti*, отримані зі супутника, осереднені в комірках так званої сітки „TOMS grid”, яка центрована у точках з $179,375^{\circ}$ зах.д. до $179,375^{\circ}$ сх.д. з кроком $1,25^{\circ}$; та з $89,5^{\circ}$ пд.ш. до $89,5^{\circ}$ пн.ш. з кроком 1° . Використані в дослідженнях значення *reflektiviti* визначені для довжини хвилі 380 нм, або 360 нм для даних зі супутника Earth Probe.

Для визначення особливостей кліматичних норм альbedo для планети в цілому та його порівняння з відповідними даними для території України дослідження проводились на кількох рівнях: глобальному (для всієї планети), зональному (для окремих широтних поясів), регіональному (для території України) та локальному (для окремих областей України).

З цією метою в дослідженнях використовувались декілька рядів даних:

- ряд даних глобального альbedo за весь період спостережень;
- ряд даних для широтного поясу, в якому знаходиться територія України ($44-53^{\circ}$ пн.ш.);
- ряд даних для „Супер_України” (ряд даних, які охоплюють територію України та прилеглі регіони);
- ряд даних для криволінійного прямокутника України;
- дванадцять рядів даних для окремих регіонів України.

За даними, отриманими із супутника, територія України покрита 144 рівновіддаленими відліками (9 широтних кіл $\times$ 16 відліків за довготою, з кроком за широтою 1° , а за довготою – $1,25^{\circ}$), які при осередненні по її території дають ряд даних для криволінійного прямокутника „Україна”. Проте, при дослідженні внутрішніх особливостей кліматичних норм альbedo для України, важко очікувати, що при такому дрібному розбитті сезонний хід істотно відрізняється між сусідніми відліками, т.з. „комірками сітки TOMS grid”. Тому, з метою наближення відліків до синоптичного масштабу, комірки сітки TOMS grid були об’єднані в 12 суперкомірок з кроком за широтою 3° , а за довготою – 5° . З метою укрупнення площі досліджуваного регіону (тобто України) і порівняння отриманих результатів для України не тільки з широтними поясами і планетою в цілому, але й з прилеглими районами були додані ще 18 рядів даних суперкомірок, що розташовані навколо криволінійного

прямокутника „Україна”, і утворили разом з даними для криволінійного прямокутника „Україна” регіон з умовною назвою “Супер_Україна”.

На першому етапі досліджувалась можливість використання *reflektyviti* як замітника локального альбедо.

За даними Американського геофізичного товариства [8] значення планетарного альбедо становить 29,7% з можливою похибкою 0,5%. Обчисливши за локальними даними *reflektyviti* глобальне його значення та зіставивши з глобальним альбедо, можна зробити висновки про доцільність використання локальних даних *reflektyviti* як заміну відповідним значенням альбедо. Глобальне значення *reflektyviti* можна розрахувати за формулою:

$$\langle R \rangle = \frac{1}{4\pi} \int_0^\pi d\varphi \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \lambda \cdot R(\varphi, \lambda) d\lambda, \quad (1)$$

де R - значення *reflektyviti* ($\langle R \rangle$ - глобальне його значення); φ - довгота; λ - широта.

Отримане значення $\langle R \rangle$ порівнювалось з відомим значенням планетарного альбедо.

На другому етапі знаходились кліматичні норми альбедо для всіх рядів даних. В основу визначення кліматичних норм був покладений метод розкладу у ряд Фур'є. Адже, згідно з теоремою Фур'є будь-яку періодичну функцію можна розкласти в ряд за ортогональною системою функцій, а саме – за тригонометричною системою косинусів і синусів. Для досліджень ряди альбедо помісячно осереднювались і розбивались на 5 гармонік річного ходу. Адже, згідно з теоремою Котельникова (теоремою відліків) [3], при дискретному характері відліків (характерному для вимірювання загального альбедо) можна знайти лише ті частоти в спектрі сигналу, яким відповідають не менш ніж два відліки на період. Але розрахунки амплітуди шостої гармоніки не є можливими, бо двох відліків на період досить лише при умові нескінченного значення відношення сигнал/шум (тобто це можливо при відсутності похибок, що, звичайно, є невірним). Вагомість кожної гармоніки визначалась за критерієм Стюдента: в розрахунках кліматичної норми використовувались лише ті гармоніки статистична забезпеченість яких складала не менше 95%, тобто критерій Стюдента має дорівнювати не

більше 5 %. На основі отриманих даних гармонік, знаходились значення сезонного ходу альbedo.

У результаті розрахунків було отримане значення глобального *reflektyviti*, що дорівнює 29,57%, тобто різниця між отриманим значенням глобального *reflektyviti* і відомого планетарного альbedo не виходить за межі стандартної похибки і вказує на правильність обраного шляху. Географічний розподіл *reflektyviti* для земної кулі проілюстровано на рис.1.

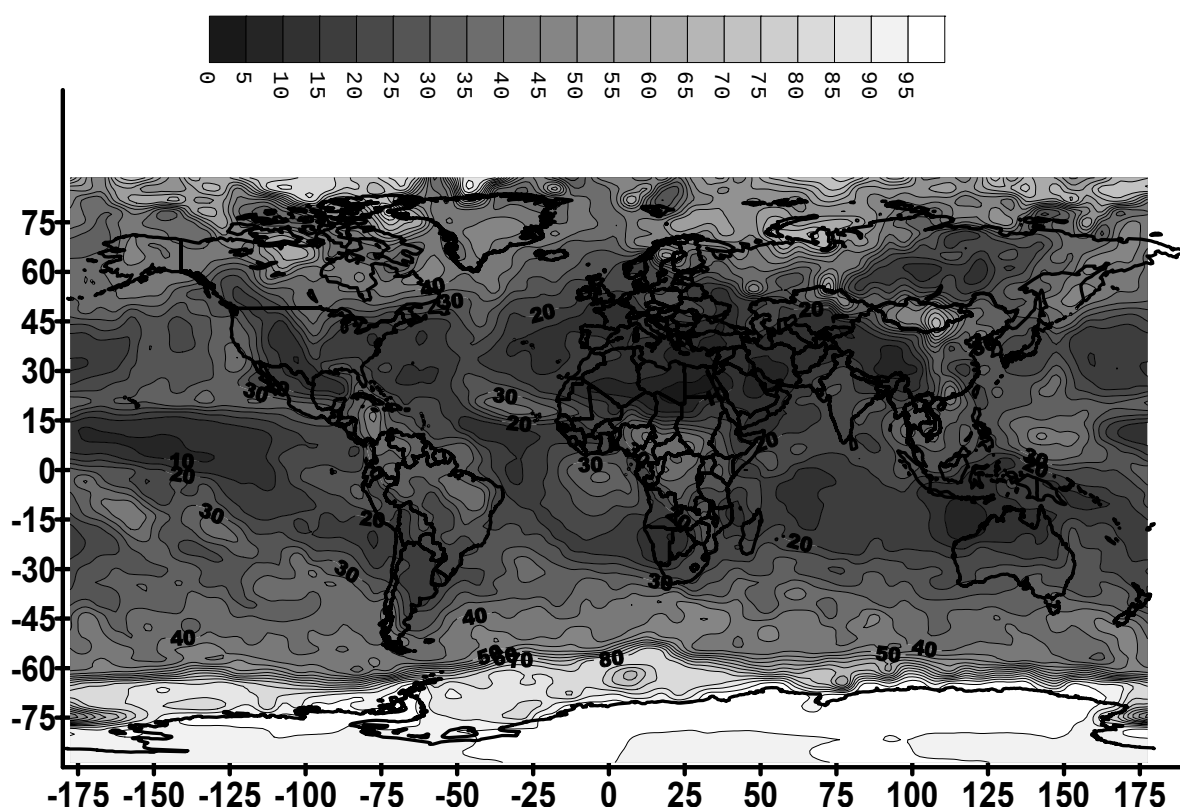


Рис. 1. Географічний розподіл *reflektyviti*

Як видно з рисунку, географічний розподіл *reflektyviti* є дуже схожим на очікуваний географічний розподіл альbedo: максимальні значення відповідають полярним регіонам (вплив полярного льоду), а також помірним та екваторіальним широтам (вплив хмарності), мінімальні значення спостерігаються в тропічних широтах і пояснюються особливістю синоптичних умов даного регіону (впродовж року в тропіках практично не спостерігається хмарності). Крім загальних особливостей змін значень альbedo на земній кулі, на карті чітко відображені його регіональні зміни. Так, області високих значень відповідають району

Гімалайських гір та Кордильєр, що обумовлено наявністю в цих регіонах гірських льодовиків.

Викладені міркування свідчать, що дані *reflektyviti* можна використовувати для подальших досліджень. Надалі, ми будемо називати *reflektyviti* словом “альbedo”, адже істотних відмінностей між альbedo і *reflektyviti* не було виявлено. *Reflektyviti* може бути певним замінником локального альbedo і може бути використано для будь-яких оцінок на локальному, регіональному, зональному і, навіть, глобальному рівнях досліджень.

Розглянемо тепер кліматичні норми альbedo для різних рівнів досліджень.

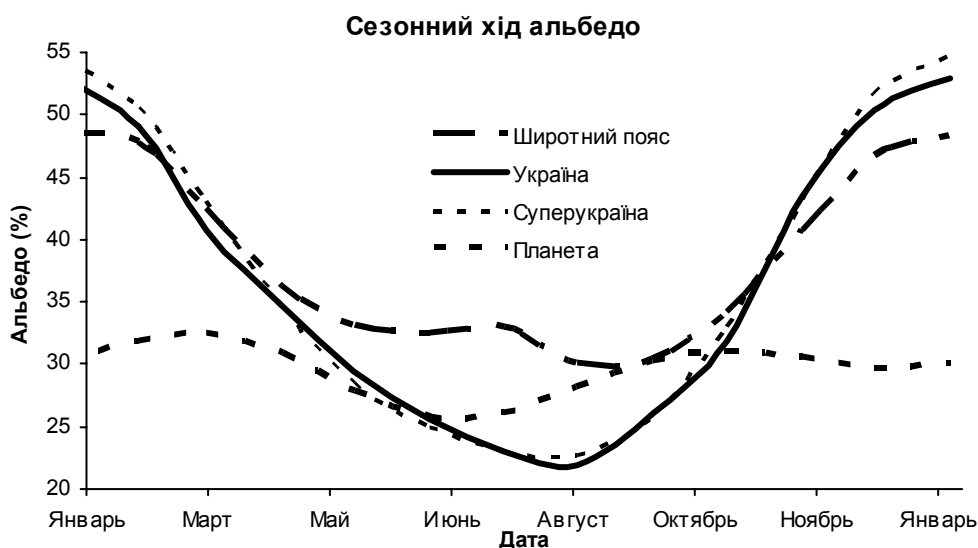


Рис. 2. Сезонний хід альbedo для криволінійного прямокутника „Україна”, „Супер_України”, широтного поясу (до якого належить „Україна”) та планети в цілому

Глобальний рівень. На основі розрахунків за критерієм Стюдента виявилось, що сезонний хід альbedo планети формують тільки перші три гармоніки. Крива сезонного ходу представлена на рисунку 2. Як видно з рисунка сезонний хід альbedo для планети в цілому істотно відрізняється від сезонного ходу інших рівнів. По-перше – абсолютні значення альbedo є набагато нижчими за відповідні їм значення для інших територій. По-друге, відрізняється характер сезонного ходу: якщо для інших територій відмічається чітко виражені максимум взимку та мінімум влітку, то для планети два максимума навесні та восени і пологий мінімум на початку літа. По-третє, для планети відмічаються найменші амплітуди коливань альbedo – менше 3%. Усі ці відмінності пояснюються тим, що глобальні

значення альбедо охоплюють всю земну кулю. Тобто, глобальні амплітуди коливань гасяться за рахунок дзеркальності сезонного ходу для різних півкуль. Крім того, не слід забувати, що дві треті площі нашої планети припадає на океани. А водні поверхні, на відміну від поверхні суходолу, однаково відбивають сонячну радіацію у всі пори року. Середнє значення альбедо для планети в цілому становить 29,57 %, а середньоквадратичне відхилення за кліматичними нормами – 2,15%.

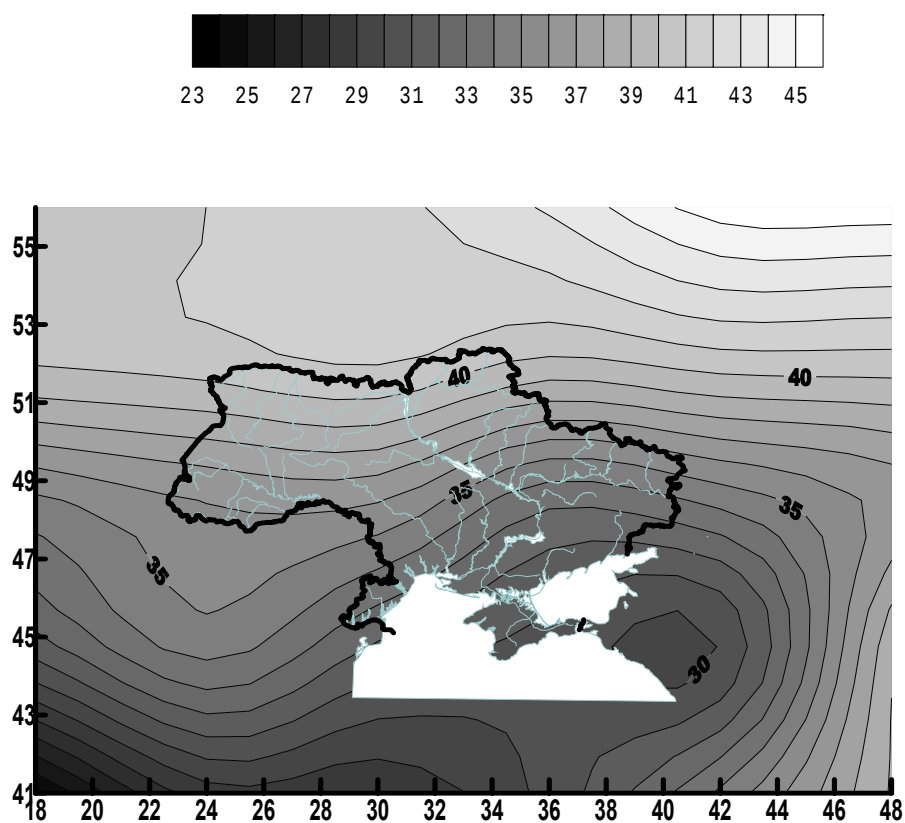
Зональний рівень. Зональний рівень кліматичних норм альбедо пропонується розглянути на прикладі широтного поясу, до якого належить Україна. Сезонний хід альбедо цього широтного поясу формують всі гармоніки, крім п'ятої. З рисунку 2 видно, що сезонний хід широтного поясу значно відрізняється від сезонного ходу для планети в цілому. За відсутності ефекту дзеркальності (характерного для планети) крива сезонного ходу є більш складною, а коливання мають набагато більший розмах – 17%. Середнє значення альбедо для широтного поясу, до якого належить Україна, є значно більшим за планетарне його значення і становить 38%. Величина середньоквадратичного відхилення 6,8.

Для широтного поясу крива сезонного ходу має характерний максимум взимку та мінімум влітку, крім того на початку літа спостерігається пологий максимум. Адже не слід забувати, що на території широтного поясу, що розглядається, великі площі займають океанічні поверхні і влітку відмічається найбільша випаровуваність, що спричинює утворення хмарності і збільшення відбитої радіації, тобто в сезонному ході формується ще один максимум альбедо.

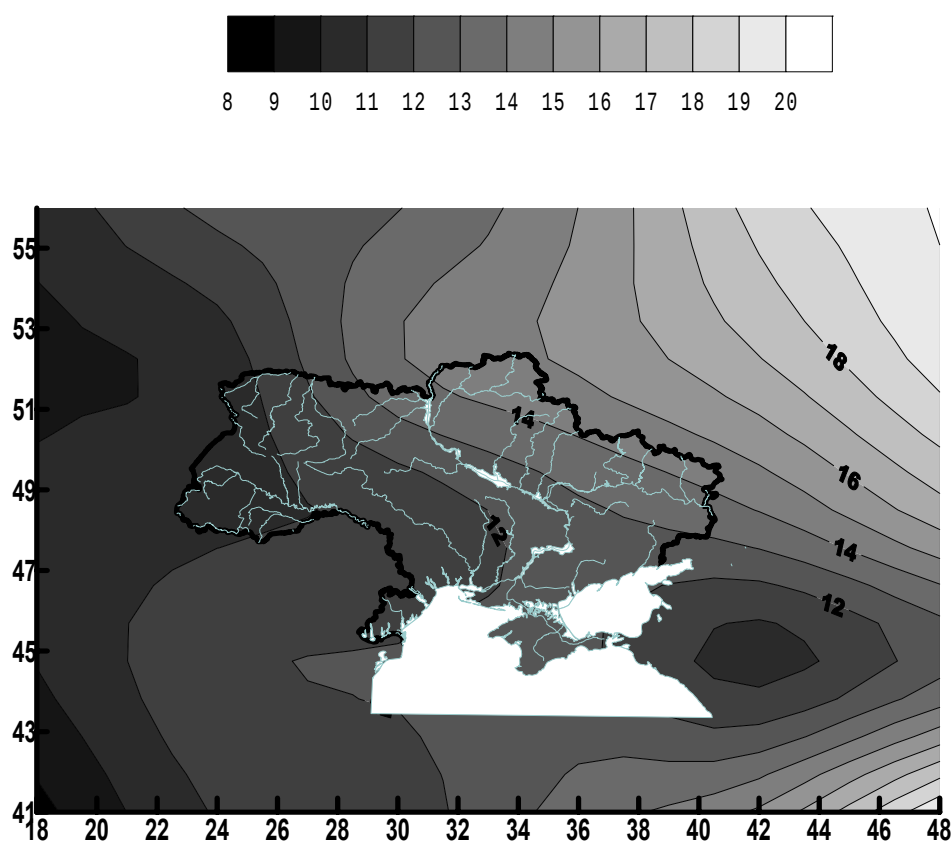
Регіональний рівень. На відміну від розглянутих вище особливостей сезонного ходу вищих рівнів, сезонний хід альбедо для криволінійного прямокутника „Україна” крім перших двох гармонік формує також п'ята гармоніка, яка характеризує найменш тривалі зміни альбедо, що відбуваються протягом 2 – 2,5 тижнів. А сезонний хід альбедо для „Супер_України” формують тільки перші дві гармоніки. Криві сезонного ходу для України та „Супер_України” мало відрізняються і мають найбільші, у порівнянні з іншими рівнями, амплітуди коливань. Розмах коливань для України та „Супер_України” становить близько 35%, тоді як для широтного поясу він є меншим за 20%. Найменша різниця кліматичних норм альбедо між двома рівнями спостерігається взимку і становить 5%, тоді як влітку ця різниця досягає

10-12%. Сезонний хід альбедо для України та „Супер_України,, практично не відрізняється за невеликим виключенням: взимку кліматичні норми для „Супер_України” є дещо більшими за відповідні їм норми для України, а крім того для України відбувається деяке запізнення фаз у порівнянні з „Супер_Україною”. Сезонний хід альбедо для „України” представлений чітко вираженими максимумом в січні – 52% (для „Супер_України” – 55%), та мінімумом в серпні – 22%. Це пояснюється тим, що максимум альбедо взимку утворюється за рахунок хмарності і твердих опадів, а влітку збільшення альбедо відбувається тільки за рахунок хмарності. За даними [2] сезонний хід хмарності на території України має чітко виражений мінімум в серпні. Тому і в сезонному ході альбедо характерний серпневий мінімум. Величина середнього значення для криволінійного прямокутника „Україна” та „Супер_України” є однаковою і становить 36%. Величина ж середньоквадратичного відхилення є майже вдвічі більшою за відповідну величину для широтного поясу і становить для території „України” 11,8, а „Супер_України” – 12,06. Таким чином, за загальними особливостями кліматичні норми для „України” та „Супер_України” є досить близькими, що свідчить про малі відмінності поля альбедо для цих двох масштабів. Саме цього і слід було очікувати, адже обидва регіони за своїми розмірами є близькі для синоптичного масштабу.

Локальний рівень. Між суперкомірками території „України” не було помічено істотних відмінностей сезонного ходу альбедо. Тому доцільнішим є зупинитись на розгляді кліматичних норм альбедо різних частин території „України”. Для всіх суперкомірок території „України” абсолютно вагомими виявились перші дві гармоніки. Для північних та центральних областей „України”, а також прилеглих з півночі та крайнього південного сходу територій вагомою є п’ята гармоніка. Вагомість даної гармоніки зменшується при просуванні із заходу на схід, що пояснюється відмінністю синоптичних умов між західним та східним регіонами „України”. Карти середнього значення альбедо та середньоквадратичного відхилення для території „України” і прилеглих територій представлені на рис. 3



а



б

Рис. 3. Середнє значення альбедо (а) та його середньоквадратичне відхилення (б) для території „України” та прилеглих територій

Для детального уявлення про відмінності сезонного ходу для різних фаз, розглянемо дати настання мінімуму альbedo в різних фазах (таблиця).

Таблиця

Дати настання мінімуму у фазах різних гармонік

Регіон	Дата настання мінімуму				
	I гармоніка	II гармоніка	III гармоніка	IV гармоніка	V гармоніка
„Україна”	22 січня	10 січня	23 лютого	28 січня	-
„Супер_Україна”	17 січня	1 січня	-	-	-
Широта	16 січня	31 грудня	-	-	2 лютого
Планета	11 січня	24 березня	15 лютого	-	-

Як видно з таблиці відмінності в датах настання мінімуму спостерігаються в фазі як першої так і другої гармоніки. Найбільші розбіжності у датах настання відмічаються для планети в цілому (що пояснюється головною особливістю сезонного ходу планети: його дзеркальністю в обох півкулях). Так, для планети в цілому перша та третя фази настають раніше при порівнянні з іншими досліджуваними регіонами, а друга – запізнюється на 2,5 місяці. Цікавим є те, що дати настання мінімуму для „Супер_України” запізнюються тільки на один день у порівнянні з широтним поясом, тоді як для „України” запізнення в першій фазі становить 6, а в другій – 11 днів.

Висновки

На основі отриманих результатів можна зробити такі висновки:

- дані *reflectiviti* цілком придатні до використання як заміна локальних та регіональних значень альbedo;
- на різних рівнях досліджень прослідковуються чіткі особливості формування поля альbedo та істотні відмінності його кліматичних норм, що можна використовувати при дослідженнях клімату цих територій.

* *

Сделана попытка проанализировать возможность исследования зональных, региональных и локальных значений альbedo по данным об отраженной радиации, получаемой путем спутникового зондирования. За полученными результатами проведены исследования климатических норм для территории Украины.

* *

1. Будыко М.И., Байкова И.М., Ефимова Н.А., Строкина Л.А. О связи альbedo подстилающей поверхности с изменениями климата // Метеорология и климатология. – Вып. 6. – 1998. – С. 5-11.
2. Клімат України / За ред. В.М. Ліпінського. – К.: Вид-во Раєвського, 2003. – 343 с.
3. Котельников В. Теория потенциальной помехоустойчивости. Радио и связь, 1956. – 152 с.
4. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1965. – 877 с.
5. Покровский О.М., Махоткин Е.Л., Покровский И.О., Рябова Л.М. Тенденции межгодовых колебаний составляющих радиационного баланса и альbedo поверхности суши на территории России // Метеорология и климатология. – Вып. 5. – 2004. – С. 37-46.
6. <http://badc.nerc.ac.uk/data/cira/acquiring.html>.
7. <http://toms.gsfc.nasa.gov>.
8. www.agu.org.

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Центральна аерологічна обсерваторія Росгідромету,
Долгопрудний, Московська обл.
Інститут хімії поверхні НАН України, Київ*