УДК 004.942

П. А. Бородатий, Р. А. Бунь
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра прикладної математики

ГЕОІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АНАЛІЗУ ХМАРНОСТІ НА ТЕРИТОРІЇ ЗАХІДНОЇ УКРАЇНИ З ВИКОРИСТАННЯМ СУПУТНИКОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

© Бородатий П. А., Бунь Р. А., 2018

На основі спостережуваних даних Землі, які взято із супутників програми Landsat, та із використанням можливостей хмарної платформи Google Earth Engine створено геоінформаційну технологію просторового аналізу хмарності на території Західної України. Проаналізовано розподіл хмарності у регіоні та показано, як впливає на основні параметри хмарності хребет Карпатських гір. Наведено розподіл щільності хмарності у Львівській та Закарпатській областях. Проаналізовано сезонну динаміку хмарності у регіоні впродовж року та усереднену динаміку хмарності впродовж 2013–2017 рр. Наведено порівняльні гістограми розподілу площ із однаковою усередненою протягом року хмарністю у Львівській та Закарпатській областях.

Ключові слова*:* геоінформаційна технологія, Google Earth Engine, програма Landsat, супутникові зображення, хмарність, аналіз геопросторових даних.

Based on Earth observation data taken from satellites of the Landsat program and using the capabilities of the cloud platform Google Earth Engine the geoinformation technology of spatial analysis of cloudiness in the territory of Western Ukraine has been created. The distribution of cloudiness in the region is presented and the influence of the mountain range of the Carpathian Mountains on the main parameters of cloudiness is analyzed. The distribution of cloudiness densities in Lviv and Zakarpattya provinces is shown. The seasonal dynamics of cloudiness in the region during the year and the average cloudiness dynamics over 2013–2017 are analyzed. The comparative histograms of the distribution of areas with the same average cloudiness over the year in the Lviv and Zakarpattya provinces are presented.

Key words: geoinformation technology, Google Earth Engine, Landsat program, satellite image, cloudiness, geospatial data analysis.

Вступ

Хмарність – один із найважливіших параметрів, який істотно впливає на погоду та клімат [21, 23]. Окрім того, ступінь покриття хмарами на відповідній території визначає її придатність до виробництва відновлюваної енергії, а також спричиняє завади під час дистанційного зондування Землі [1, 18]. Уже понад 40 років штучні супутники, які рухаються по відповідних орбітах навколо Землі, фотографують у різних спектрах зображення поверхні Землі та передають їх на землю, де їх опрацьовують та архівують. За цей час зібрано мільярди зображень, які займають більше ніж 1 петабайта даних. Ці дані вчені використовують у багатьох галузях, зокрема для аналізу хмарності [5, 7]. Проте аналізувати зображення такого об’єму та роздільної здатності за допомогою звичної комп’ютерної техніки вкрай важко, а ще важче поєднувати для аналізу зображення різних супутників.

Великі перспективи у цьому напрямі відкриває сучасна хмарна платформа Google Earth Engine [8], яка дає можливість обробляти супутникові зображення та інші спостережувані дані Землі завдяки особливостям її архітектури. Вона призначена для паралельних обчислень та аналізу на тисячах комп’ютерів різноманітних геопросторових даних, а також дає можливість за

допомогою мов JavaScript, Python та вбудованої Web IDE будувати швидкі прототипи та візуалізовувати результати складних просторових аналізів [10].

Для аналізу хмарності у цій роботі використано зображення із супутників програми Landsat [13, 14], зокрема останнього супутника Landsat 8 [15], виведеного на орбіту у лютому 2013 р. Передані із цього супутника зображення складаються із дев'яти спектрів із роздільною здатністю від 15 до 100 метрів. Супутник робить фотографії, які називають "сценами", середній розмір яких – 150 км висоти та 183 км довжини. Хмарна технологія Google Earth Engine дає змогу здійснювати просторовий аналіз множини таких зображень, які охоплюють значний часовий діапазон, і отримувати нові знання, потрібні у багатьох галузях. Приклади використання цієї хмарної технології аналізу даних зондування Landsat для аналізу населених пунктів та рисових полів можна знайти в [6, 19]).

Останнім часом значну увагу приділяють регіональним дослідженням хмарності, серед яких, зокрема: аналіз хмарності над гірським ландшафтом західної території США [22], дослідження мінливості хмарності вздовж берегової лінії Каліфорнії [2], аналіз хмарності та опадів у тропічному поясі [20], а також у тропічних лісах Амазонки [3], дослідження сезонної мінливості хмарності в регіоні Середземного моря [11] та багато інших. Тому актуальним є створення відповідних методів та програмних засобів для просторового аналізу хмарності для регіону Західної України, на яке спрямована ця робота.

Для оцінювання хмарності на основі космічних зображень у цьому дослідженні використано алгоритм ACCA [17]. За допомогою алгоритму simpleCloudScore для кожного зображення у наявній колекції обчислено відсоток хмарності у кожному пікселі в діапазоні від 0 до 100 відсотків (розмір пікселя дорівнював 300 м).

Мета та формулювання цілей статті

Мета цієї роботи – використовуючи засоби хмарної платформи Google Earth Engine та супутникові зображення програми Landsat, створити геоінформаційну технологію просторового аналізу хмарності у регіоні Західної України і за її допомогою порівняти середні параметри хмарності у Львівській та Закарпатській областях, які розділяє пасмо Карпат.

Для досягнення поставленої мети виконано такі завдання:

- проаналізовано можливості хмарної платформи Google Earth Engine для аналізу спостережуваних даних Землі, зокрема даних космічного зондування із супутників програми Landst;
- опрацьовано геоінформаційну технологію просторового аналізу хмарності з використанням платформи Google Earth Engine та даних космічного зондування;
- побудовано цифрові карти із результатами просторового аналізу усереднених характеристик хмарності для території Західної України;
- проаналізовано сезонні зміни хмарності у Львівській та Закарпатській областях і вплив Карпат на ці процеси;
- вивчено динаміку хмарності на аналізованій території;
- порівняно узагальнені параметри хмарності на прикладі Львівської та Закарпатської областей.

Тобто об'єктом цього дослідження є основні характеристики хмарності на території областей Західної України, а предметом дослідження – інформаційна технологія просторового аналізу хмарності з використанням хмарної платформи та даних космічного зондування.

Основні характеристики даних дистанційного зондування

Супутники Landsat 7 та Landsat 8 – це останні супутники програми Landsat, дистанційне зондування Землі яких охоплює період від 1999 р. дотепер. Landsat 7 надавав знімки у восьми спектральних діапазонах із роздільною здатністю від 15 до 60 метрів на піксель, а періодичність збирання даних для всієї планети становила від 8 до 32 діб. Зображення, як правило, поділяють на сцени для зменшення завантаження. Кожна сцена Landsat завдовжки близько 185 кілометрів і 185 кілометрів завширшки [13].

У найновішого супутника Landsat 8 два нові сенсори − Operational Land Imager (OLI) та Thermal Infrared Sensor (TIRS). Загалом зображення складаються з дев'яти спектрів із роздільною здатністю від 30 метрів для спектрів 1, 7 та 9. Темно-синій та фіолетовий спектр 1 корисний для прибережних та аерозольних досліджень, спектр 9 – для вивчення перистих хмар. Роздільна здатність спектра 8 (панхроматичний) 15 м, спектри 10 та 11 використовують для аналізу температури поверхні беруть зі 100-метрової висоти. Середній розмір сцени 150 км висоти та 183 км довжини. Повний перелік спектрів подано в табл. 1, багато з них можна використати для дослідження хмарності.

Таблиця 1

Характеристики спектрів супутника Landsat 8 (на основі [16])

Спектри	Довжина хвиль, мкм	Роздільна здатність, м
Спектр 1 – темно-синій та фіолетовий	0,43–0,45	30
Спектр 2 – синій	0,45–0,51	30
Спектр 3 – зелений	0,53–0,59	30
Спектр 4 – червоний	0,64–0,67	30
Спектр 5 – ближнє інфрачервоне випромінювання (NIR)	0,85–0,88	30
Спектр 6 – короткохвильове інфрачервоне випромінювання (SWIR) 1	1,57–1,65	30
Спектр 7 – короткохвильове інфрачервоне випромінювання (SWIR) 2	2,11–2,29	30
Спектр 8 – панхроматичний	0,50–0,68	15
Спектр 9 – периста хмара	1,36–1,38	30
Спектр 10 – інфрачервоне випромінювання (TIRS) 1	10,60–11,19	100 × (30)
Спектр 11 – інфрачервоне випромінювання (TIRS) 2	11,50–12,51	100 × (30)

Бортові інструменти Landsat 8 відображають еволюційний прогрес у космічних технологіях. Зокрема, сенсор OLI покращує показники сенсорів Landsat, використовуючи технічний підхід, який продемонстровано та випробувано на експериментальному супутнику NASA EO-1. Сенсор OLI − це сенсор з чотиридзеркальним телескопом та 12-бітним квантуванням. Сенсор OLI збирає дані з видимих, ближніх інфрачервоних та коротких хвиль, а також панхроматичних спектрів. Він розрахований на п'ять років експлуатації. Сенсор OLI також сканує у двох нових спектрах, один з них використовується спеціально для вивчення перистих хмар, а інший − для дослідження прибережних зон [15].

Суть геоінформаційної технології

Для дослідження основних характеристик хмарності на території Західної України запропоновано та обґрунтовано геоінформаційну технологію, яка використовує хмарну платформу Google Earth Engine та дані дистанційного зондування із супутників програми Landsat. Базову структуру цієї технології наведено на рис. 1. Основним аргументом щодо використання хмарної платформи Google Earth Engine було забезпечення оброблення великої кількості супутникових зображень і можливість залучення необхідної кількості обчислювальних ресурсів для оброблення та аналізу цих зображень. Було враховано, що застосування потужних засобів Google Earth Engine для оброблення зображень Landsat аналізованої території Західної України має неабиякі переваги, оскільки:

- зображення з архівів супутників Landsat за останні 40 років доступні онлайн і можуть ефективно використовуватись для аналізу разом із даними інших супутників, зокрема MODIS;
- час аналізу істотно зменшується завдяки хмарній обчислювальній інфраструктурі Google, яка здійснює аналіз та обчислення на тисячах комп'ютерів, що дає змогу виконувати завдання, нездійсненні раніше;
- доступний широкий набір функцій для аналізу зображень, зокрема інструменти для фільтрування хмар із зображень, використання машинного навчання та інші корисні для аналізу функції;

- результати роботи високоефективних алгоритмів, наявних в Google Earth Engine, у вигляді растрових цифрових карт можна експортувати в інші геоінформаційні системи для поглибленого аналізу та візуалізації.

Рис. 1. Структурна схема геоінформаційної технології на основі платформи **Google Earth Engine** *та космічних знімків супутників* **Landsat**

Оригінальні зображення даних дистанційного зондування зазвичай містять хмари, які, використовуючи різноманітні алгоритми [12], намагаються відфільтрувати. На рис. 2 показано два зображення аналізованої території Львівської області: ліве зображення − із хмарами без фільтрування, а праве − відфільтроване зображення без хмар. Такі відфільтровані зображення далі використовують для побудови різноманітних карт. Прикладом може слугувати карта землекористування Corine (Corine Land Cover maps [4]), яка широко застосовується для просторового моделювання різноманітних складних природних та антропогенних процесів. Натомість у цьому дослідженні операції здійснюються із оригінальними “захмареними” зображеннями для оцінювання основних характеристик хмарності. Алгоритм оцінювання хмарного покриву формує окрему маску пікселів, яка відображає перисті хмари та інші типи хмар. Ці маски об’єднуються в один додатковий спектр зображення, у якому кожен піксель містить інформацію про відсоток хмарності в діапазоні від 0 до 100.

Здійснюючи оцінювання хмарності, спочатку імпортуємо колекцію з відповідними даними супутника (наприклад, Landsat 8), яка має ідентифікатор у системі Google Earth Engine “*LANDSAT/LC8_L1T_8DAY_TOA*”, за допомогою фрагмента коду:

var landsatData = ee. ImageCollection (“LANDSAT/LC8_L1T_8DAY_TOA”);

Далі імпортуємо таблицю з полігонами адміністративних областей України, яка дає можливість відфільтрувати зображення та отримати лише бажану область. Для імпорту використано фрагмент коду:

var regions = ee. FeatureCollection (“ft:1tWe5YvHwd-u3QnqpWZP68aPsMnylj4-LoXeePp0”);

Ця таблиця подана у вигляді *FeatureCollection* і містить у собі колекцію “features”, в яких є дані про області України, а саме: ідентифікатор області, колекція з координат областей (geometry) та назва області. На наступному кроці вибираємо дані лише за той період, який нам необхідно, за допомогою, наприклад, коду:

var landsatData = landsatData. filterDate ('2017-04-01', '2017-05-30');

а *б*

Рис. 2. Зображення території Львівської області:
з хмарами без фільтрування (а); відфільтроване зображення без хмар (б)

У результаті отримано колекцію супутникових зображень, які потрапили в бажаний діапазон. Щоб одержати зображення лише, наприклад, Львівської області, користуємось фільтром по полігону координат, який має таку програмну реалізацію:

```
// Вибір полігона координат Львівської області з колекції областей України
var lviv = regions. filter (ee. Filter. eq ('system: index', '3503'));
// Вибір зображень з колекції, які містять Львівську область
var regionData = landsatData. filterBounds (lviv);
```

Після виконання цих дій у змінній “regionData” буде колекція зображень, в яких є лише ті зображення, які містять Львівську область. Щоб алгоритм використовував дані із сенсора OLI, додаємо до кожного зображення у колекції за допомогою методу “map” параметр “SENSOR_ID” зі значенням “OLI_TIRS”:

```
var landsatData = regionData. map (function (image) {
 return image. set ('SENSOR_ID', 'OLI_TIRS');
});
```

За допомогою алгоритму “simpleCloudScore” обчислюємо для кожного зображення у колекції “landsatData” відсоток хмарності у кожному пікселі в діапазоні від 0 до 100 відсотків. Код, який реалізує цей алгоритм, для вибраної колекції зображень:

```
var landsatDataWithCloudScore = landsatData. map (function (image) {
 return ee. Algorithms. Landsat. simpleCloudScore (image);
});
```

У результаті в смугах зображення додається нова смуга з назвою “cloud”.

Побудова цифрових карт із результатами просторового аналізу усереднених характеристик хмарності за певний період на вибраній території

Для того, щоб візуалізувати результати просторового дослідження хмарності, можна використати відповідну функцію Google Earth Engine, яка дає змогу подавати результати здійснених обчислень, а саме об’єкти *Image* або *ImageCollection*, як шар растрової цифрової карти. Подані у такому вигляді результати дають можливість наочно побачити, в яких місцях аналізованої території впродовж тривалого часу спостерігається висока хмарність, а в яких місцях вона середня або низька. Такий підхід застосовано до просторового аналізу хмарності на території областей Західної України. Мета такого аналізу – показати, наскільки нерівномірною є хмарність на аналізованій території та наскільки істотно впливають на неї Карпатські гори. Нижче наведено код програми, яка

обчислює середню хмарність у Закарпатті за період від березня до травня, та подає результат у вигляді шару цифрової карти:

```
var landsatData = ee.ImageCollection("LANDSAT/LC8_L1T_8DAY_TOA");
var regions = ee.FeatureCollection("ft:1tWe5YvHwd-u3QnqpWZP68aPsMnylj4-LoXeePp0");
var carpatians = regions.filter(ee.Filter.eq('system:index', '3501'));

var meanCloudiness = landsatData
        // Фільтр по датах
        .filterDate('2017-03-01', '2017-05-30')
        // Вибірка зображень лише території Закарпаття
        .filterBounds(carpatians)
        // Встановлення назви сенсора
        .map(function (image) {
            return image.set('SENSOR_ID', 'OLI_TIRS');
        })
        // Обчислення параметра хмарності
        .map(function (image) {
          return ee.Algorithms.Landsat.simpleCloudScore(image);
        })
        // Усереднення параметра хмарності
        .select('cloud').reduce(
          ee.Reducer.mean()
        );
// Додавання шарів до карти
Map.addLayer(carpatians, {color:"red"})
Map.addLayer(meanCloudiness, {min: 0, max: 100, color:'#ffffff'});
```

Результати обчислень зображено на рис. 3, який показує, що протягом весняних місяців доволі високою є хмарність у районі Карпат.

Рис. 3. Середня хмарність у Закарпатті за три весняні місяці 2017 р. (територію області підсвічено): мінімальна хмарність – чорний колір, максимальна хмарність – білий колір

Якщо розширити часовий діапазон дослідження, то отримуємо згладженіші зображення, на яких уже не помітні смуги дистанційного зондування (як на рис. 3). На рис. 4 наведено зображення середньої хмарності регіону Закарпатської області за 2016 р.

Рис. 4. Середня хмарність у Закарпатті впродовж 2016 р.:
мінімальна хмарність – чорний колір, максимальна – білий

Якщо із наведених зображень відфільтрувати пікселі із низькою середньою хмарністю, то отримуємо ділянки зі стабільною хмарністю. Зокрема, на рис. 5 наведено приклад зображення, з якого відфільтровано пікселі з хмарністю, меншою за 45 %. Можна побачити, що в області гір, а саме в області Карпатського хребта, формуються скупчення хмар, які є порівняно сталими впродовж року.

Рис. 5. Середня хмарність у Закарпатті впродовж 2016 р.:
відфільтровані пікселі із середньою хмарністю понад 45 %
(мінімальна хмарність – чорний колір, максимальна – білий)

Результати аналізу сезонної мінливості хмарності

Дослідження сезонних змін рівня хмарності на вибраній території Західної України здійснено із використанням функцій побудови графіків та діаграм у Google Earth Engine [9]. Для аналізу хмарності впродовж року наявну колекцію зображень розподілили на місяці й, відповідно, в кожній такій підмножині містилася серія супутникових зображень, зроблених упродовж цього місяця. За допомогою операції *Reducer* зображення у межах кожного місяця об’єднали в одне зображення із усередненою хмарністю. У результаті отримали множину зображень (об’єктів *Image*), в яких у кожному пікселі обчислено середню хмарність за місяць.

Для практичної реалізації цього завдання складено алгоритм, який об'єднує зображення, зроблені впродовж місяця, в один об'єкт *Image* з обчисленням середньої хмарності по пікселях, а також додає результат у вихідну множину зображень. У підсумку в цій множині міститься 12 зображень, які відповідають 12 місяцям аналізованого року. Приклад результату роботи цього алгоритму зображено на рис. 6, на якому проілюстровано за допомогою гістограми сезонну мінливість хмарності у Львівській області впродовж 2016 р. Цю діаграму побудовано із використанням Google Charts, роздільну здатність встановлено на рівні триста метрів у одному пікселі. Приклад коду, який будує таку гістограму на основі колекції зображень, має вигляд:

```
var lvivChart = ui.Chart.image.series(list, lviv, ee.Reducer.mean(), 300, 'month')
.setChartType('ColumnChart')
.setOptions({
    title: 'Хмарність у Львівській області впродовж року',
    hAxis: {'title': 'Місяць'},
    vAxis: {'title': 'Хмарність (%)'},
    pointSize: 3,
});
print(lvivChart);
```

Як видно з рис. 6, хмарність зростає восени, з вересня (34 % хмарності) до листопада (79 % хмарності) й зберігається всю зиму вищою за 50 % з певним мінімумом у грудні, натомість навесні хмарність стабільна на рівні 25 %, досягаючи мінімуму влітку в серпні – 9,5 % хмарності.

Рис. 6. Середня хмарність у Львівській області впродовж року (2016 р.)

Якщо розширити аналізований діапазон до п'яти років, тобто з 2013 до 2017 р. (рис. 7), то бачимо, що середня хмарність у Львівській області за місяцями практично не змінилась, лише зменшилась на 2–3 %. Це означає, що у Львівській області переважно однакова сезонна мінливість хмарності, з відхиленнями щомісяця тільки до 5–7 % від багаторічних середньомісячних значень.

Для порівняльного аналізу сезонної мінливості середньої хмарності взято Львівську та Закарпатську області, розділені пасмом Карпатських гір. Як видно з рис. 8, влітку та взимку середня хмарність у Закарпатській області менша, ніж у Львівській області, натомість в інші періоди – навпаки, більша. Навесні, наприклад, відмінність між середньою хмарністю у Львівській та Закарпатській областях перевищує 10 %.

Проаналізовано також динаміку усередненої хмарності на території Західної України впродовж п'яти років. Роздільна здатність зображень у цьому дослідженні становила 300 м на

піксель. Встановлено, що максимальний рівень хмарності спостерігався у 2014 р. (70,6 %), а мінімальний у 2015 р. (41 %). Після 2015 р. середня хмарність щороку збільшувалася на 10 % до позначки 58 % у 2017 р. Для обчислення середньої хмарності використано 188 супутникових зображень із програми Landsat за п'ять останніх років, сумарним об'ємом понад 4 терабайти. Код програми, за допомогою якої реалізовано це дослідження, написано мовою JavaScript.

Рис. 7. Середня хмарність у Львівській області впродовж року: усереднено за місяцями у 2013–2017 рр.

Рис. 8. Порівняння сезонної мінливості середньої хмарності у Львівській та Закарпатській областях упродовж 2016 р.

Порівняння узагальнених параметрів хмарності Львівської та Закарпатської областей

Щоб з'ясувати, як хребет Карпатських гір впливає на усереднені параметри хмарності, ми проаналізували розподіл відсотка хмарності до кількості пікселів, які мають такий відсоток, на території Львівської та Закарпатської областей. Для цього використано дані космічного зондування із супутника Landsat 8 з роздільною здатністю 1 піксель дорівнює трьомстам метрам.

Для побудови гістограми відповідного розподілу знайдено відсоток хмарності для кожного пікселя у зображенні з аналізованої колекції. Потім зображення об'єднали за допомогою *Reducer* в одне зображення з усередненими значеннями хмарності у кожному пікселі, причому значення хмарності у цих пікселях зведено у цілочисловий тип та згруповано з метою підрахунку їх кількості (рис. 9).

Рис. 9. Порівняльна гістограма розподілу кількості пікселів на зображеннях усередненої протягом року хмарності у Львівській та Закарпатській областях (2016 р.)

З наведеної на рис. 9 гістограми видно, що розподіл хмарності подібний до розподілу Гаусса, причому в Львівській області значно більше пікселів припадає на кожен відсоток хмарності, оскільки площа цієї області теж більша. Щоб нівелювати цю залежність від розміру області, побудовано гістограму розподілу середньої хмарності щодо відсотка площі, яку вона займає. Для цього кожне значення кількості пікселів хмарності поділено на сумарну кількість пікселів на аналізованій території області. На рис. 10 наведено результат обчислень − порівняльну гістограму розподілу площ з однаковою усередненою протягом року хмарністю у Львівській та Закарпатській областях.

Рис. 10. Порівняльна гістограма розподілу площ з однаковою усередненою упродовж року хмарністю у Львівській та Закарпатській областях (2016 р.)

Як видно з рис. 10, у Закарпатській області значно меншу територію охоплює середня хмарність понад 45 % порівняно із Львівською, проте хмарність у діапазоні від 55 % до 75 % більша у Закарпатській області. З рис. 5 видно, що причиною цього, ймовірно, є скупчення хмар над гірською територією. Також видно, що розподіл хмарності у цьому випадку набагато більше нагадує розподіл Гаусса порівняно з попереднім графіком (рис. 9).

Висновки

У статті описано розроблену геоінформаційну технологію просторового аналізу хмарності з використанням хмарної платформи Google Earth Engine та космічних зображень із супутників Landsat. Проаналізовано специфіку дистанційного зондування Землі супутниками програми Landsat та відповідні спектри сигналів, які можна використати для аналізу хмарності. Показано, як працює алгоритм, що визначає хмарність на основі зображень із супутника Landsat 8. Також за допомогою мови програмування JavaScript та вбудованої WebIDE з використанням ресурсів хмарної системи Google Earth Engine створено відповідні програмні засоби, які дали змогу проаналізувати сезонну динаміку хмарності, порівняти розподіл хмарності на території Західної України та глибше проаналізувати відмінності основних параметрів хмарності для Львівської та Закарпатської областей, розділених хребтом Карпатських гір.

Результати роботи засвідчили, що хмарна платформа Google Earth Engine та супутникові зображення Landsat дали можливість розробити ефективну геоінформаційну технологію аналізу рівня хмарності на території Західної України, за допомогою якої проаналізовано великі обсяги даних космічного зондування, отримано розподіли площ з відповідною середньою хмарністю та досліджено місячну динаміку хмарності. Показано, що на території Західної України місяцем із найменшою хмарністю є серпень, у якому середньомісячна хмарність не перевищує 6–9 %. Натомість найбільшою середня хмарність є у жовтні, листопаді та грудні (близько 60–80 %). Результати просторового аналізу також засвідчили, що середня хмарність істотно більша над гірською територією. Середня хмарність у Закарпатській та Львівській областях різниться: у першій більшу площу займає хмарність від 55 % до 75 %, натомість у Львівській навпаки, більшою є площа хмарності від 45 % до 55 %. Проаналізувавши сезонні зміни хмарності, можна також стверджувати, що влітку та взимку хмарність у Закарпатті нижча, ніж у Львівській області, а в інші періоди – навпаки, вища, навесні відмінність між хмарністю у Львівській та Закарпатській областях перевищує 10 %.

1. Armstrong S. A new methodology to optimise solar energy extraction under cloudy conditions / S. Armstrong, W. G. Hurley // Renewable Energy. – 2010 – Vol. 35, Is. 4. – P. 780–787. 2. Clemesha R. Daily variability of California coastal low cloudiness: A balancing act between stability and subsidence / Rachel E. S. Clemesha, Alexander Gershunov, Sam F. Iacobellis, Daniel R. Cayan // Geophysical Research Letters. – 2017. – Vol. 44, Is. 7. – P. 3330–3338. 3. Collow A. Cloudiness over the Amazon rainforest: Meteorology and thermodynamics / Allison B. Marquardt Collow, Mark A. Miller, Lynne C. Trabachino // Journal of Geophysical Research. – 2016. – Vol. 121, Is. 13. – P. 7990–8005. 4. Corine Land Cover data. − [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www. eea. europa. eu/ (17.09.2017). 5. Dai A. Recent trends in cloudiness over the United States: A tale of monitoring inadequacies / Dai A., Karl Th. R., Sub B., Trenberth K. E. // Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS). – 2006. – Vol. 87(5). – P. 597–606. 6. Dong J. Mapping paddy rice planting area in northeastern Asia with Landsat 8 images, phenology-based algorithm and Google Earth Engine / Jinwei Dong, XiangmingXiao, Michael A. Menarguez et al. // Remote Sensing of Environment. – 2016. – Vol. 185. – P. 142–154. 7. Eliseev A. V. Scheme for calculation of multi-layer cloudiness and precipitation for climate models of intermediate complexity / Eliseev A. V., Coumou D., Chernokulsky A. V., Petoukhov V., Petri S. // Geoscientific Model Development. – 2013. – Vol. 6. – P. 1745–1765. 8. Google Earth Engine: A planetary-scale platform for Earth science data & analysis. − [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://earthengine. google. com (20.10.2017). 9. Google Visualization API Reference: Google Charts. − [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://developers. google. com/chart/ interactive/docs/reference (12.02.2017). 10. Gorelick N. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone / Noel Gorelick, Matt Hancher, Mike Dixon, Simon Ilyushchenko, David Thau, Rebecca Moore // Remote Sensing of Environment. – 2017. – Vol. 202. – P. 18–27. 11. Ioannidis E. On the intra-annual variation of cloudiness over the Mediterranean region / E. Ioannidis, C. J. Lolis, C. D. Papadimas et al. // Atmospheric Research. – 2017. − Doi: 10.1016/j. atmosres.2017.08.021.

12. Landsat Algorithms / Google Earth Engine API. − [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://developers. google. com/earth-engine/landsat (12.08.2017). 13. Landsat Mission. − [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://landsat. usgs. gov/ (19.09.2017). 14. Landsat Science. − [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://landsat. gsfc. nasa. gov/ (13.09.2017). 15. Landsat 8. − [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www. n2yo. com/satellite/? s=39084 (15.11.2017). 16. What are the band designations for the Landsat satellites? / Landsat Missions. − [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://landsat. usgs. gov/what-are-band-designations-landsat-satellites (12.08.2017). 17. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook – Section 5 // USGS. − [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://landsat. usgs. gov/landsat-8-l8-data-users-handbook-section-5 (12.02.2017). 18. Nikitidou E. Short-term cloudiness forecasting for solar energy purposes in Greece, based on satellite-derived information / E. Nikitidou, A. Zagouras, V. Salamalikis, A. Kazantzidis // Meteorology and Atmospheric Physics. – 2017. – Doi: 10.1007/s00703-017-0559-0. 19. Patel N. N. Multitemporal settlement and population mapping from Landsat using Google Earth Engine / N. N. Patel, E. Angiuli, P. Gamba et al. // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2015. – Vol. 35, Part B. – P. 199–208. 20. Sakaeda N. The diurnal cycle of tropical cloudiness and rainfall associated with the Madden–Julian oscillation / Naoko Sakaeda, George Kiladis, Juliana Dias // Journal of Climate. – 2017. – Vol. 30, Is. 11. – P. 3999–4020. 21. Singh H. N. Evaluation of cloudiness/haziness factor for composite climate / H. N. Singh, G. N. Tiwari // Energy. – 2005. – Vol. 30, Is. 9. – P. 1589–1601. 22. Sumargo E. Variability of cloudiness over mountain terrain in the Western United States / Edwin Sumargo, Daniel Cayan // Journal of Hydrometeorology. – 2017. – Vol. 18, Is. 5. – P. 1227–1245. 23. Xu K.-M. Evaluation of Statistically Based Cloudiness Parameterizations Used in Climate Models / Kuan-Man Xu, David A. Randall // Journal of the Atmospheric Science. – 1996. – Vol. 53, No. 21. – P. 3103–3119.