

УДК 621.5:061.1

DOI <https://doi.org/10.32782/geochasvnu.2023.1.11>

Віталій Зацерковний

доктор технічних наук, професор,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
vitalii.zatserkovnyi@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5187-6125>

Василь Гудак

магістрант, ННІ «Інститут геології»,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
VassiaGudak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7333-0409>

Павло Савков

кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри геоінформаційних систем і технологій,
Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка
savkovpa@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0197-0610>

**АНАЛІЗ ХМАРНИХ СЕЙСМОТЕКТОНІЧНИХ ІНДИКАТОРІВ ДЛЯ
ПРОГНОЗУВАННЯ ПІДЗЕМНИХ ПОШТОВХІВ
НА ОСНОВІ ДЕШИФРУВАННЯ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ**

Анотація. Одним із головних факторів розвитку та поширення землетрусів є зміна сесмічної активності земної кори. Моніторинг за режимом сейсмічної активності, аналіз та інтерпретація отриманих даних за допомогою ГІС та інтегрованого з ГІС програмного забезпечення опосередковано дає змогу прогнозувати виникнення землетрусів. Аналіз даних супутникових знімків хмарних провісників може бути корисним для виявлення можливих землетрусів. Для цього необхідно зібрати дані з космічних спостережень із різних районів земної кулі та проаналізувати зміни в хмарах, що можуть вказувати на можливу сейсмічну активність. Це може допомогти у зниженні ризику в разі можливого землетрусу та підготовці населення до можливих наслідків.

Ключові слова: хмарні сейсмотектонічні інікатори, сейсмічна активність, землетруси, геоінформаційні системи, дистанційне зондування Землі.

Zatserkovnyi Vitaly, Hudak Vasyl, Savkov Pavlo. ANALYSIS OF CLOUD SEISMOTECTONIC INDICATORS FOR THE FORECASTING OF UNDERGROUND POST OFFICES BASED ON DECIPHERING SATELLITE IMAGES

Abstract. One of the main factors in the development and spread of earthquakes is a change in the seismic activity of the Earth's crust. Monitoring of the mode of seismic activity, analysis, and interpretation of the received data with the help of GIS and software integrated with GIS indirectly makes it possible to predict the occurrence of earthquakes. Data analysis of satellite images of cloud predictors can be useful for detecting possible earthquakes. For this, it is necessary to collect data from space observations from different regions of the globe and analyze changes in clouds that may indicate possible seismic activity. This can help reduce the risk of a possible earthquake and prepare the population for possible consequences.

Key words: cloud seismotectonic initiators, seismic activity, earthquakes, geoinformation systems, remote sensing of the Earth.

Актуальність. Прогнозування землетрусів є дуже важливим і актуальним завданням, оскільки землетруси можуть спричинити значні руйнування та загрозу для людського життя.

Хоча наука про землетруси значно просунулася, точне прогнозування місця, часу та сили землетрусу з точністю до 100 % зараз неможливе. Однак, на основі вивчення сейсмічної активності в певній області можна зробити приблизний прогноз можливості землетрусу та його потенційної сили. Також знання можливості землетрусу може допомогти вжити заходи для підготовки та зменшення ризику у разі, якщо землетрус відбудеться. Наприклад, побудувати

будівлі, які можуть витримати землетрус, мати план евакуації та навчати людей, як діяти у разі землетрусу. Хоча точний прогноз землетрусу неможливий, вивчення та аналіз сейсмічної активності за допомогою геоінформаційних систем (ГІС) та дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) дуже важливе для зменшення ризику в разі можливого землетрусу та підготовки людей до можливих негативних наслідків. Результати виконаних досліджень і практичних робіт показали, що використання ГІС та інтегрованого з ГІС програмного забезпечення може з успіхом доповнити традиційні методи обробки даних моніторингу сейсмічної активності з прогнозуванням землетрусів та ефективним запобіганням їх впливу.

Мета дослідження – аналіз супутникових знімків на наявність хмарних сеймотектонічних індикаторів, інтерпретація даних сейсмічної активності та даних дистанційного зондування Землі для прогнозування землетрусів.

Методи дослідження – теоретичним підґрунтям є системний підхід та основні положення сучасних методик моніторингу, теорія геоінформаційних систем і автоматизованої обробки даних. Аналіз хмарних сеймотектонічних індикаторів базується на використанні спеціальних алгоритмів та методів машинного навчання для виявлення та аналізу цих індикаторів.

Використані матеріали – дані супутникових знімків із офіційного сайту NASA Worldview (2016–2021 рр.), публікації вітчизняних та зарубіжних учених.

Виклад основного матеріалу. Хмарні сеймотектонічні індикатори є одним із методів дослідження, який використовує хмари для виявлення можливих сейсмічних ризиків у певній області. Цей метод базується на спостереженнях над змінами атмосферного тиску, які можуть бути пов'язані зі змінами напруги на земній корі [4]. Ідея полягає в тому, що під час сейсмічної активності відбуваються зміни в рельєфі, що призводить до зміни атмосферного тиску. Ці зміни можуть бути виміряні з використанням спеціального обладнання, але також можуть бути помічені як зміни у формі хмар, які чітко простежуються на зображеннях із супутників та радарів. Вивчають форму, висоту, температуру та інші характеристики хмар, щоб виявити зміни, які можуть свідчити про можливий сейсмічний ризик [3].

Цей метод не є повністю точним і не може передбачити сейсмічні події з точністю до дня або години, але він може допомогти виявити групи територій із підвищеним ризиком сейсмічної активності, які потребують більш детального дослідження. Тому далі більш детально розглянуто хмарні сеймотектонічні індикатори.

Для початку, зазвичай, необхідно визначити розміри та форму хмарного індикатора на зображенні. Це може бути зроблено за допомогою алгоритмів сегментації зображень, які дають змогу виділити область інтересу (хмарний індикатор) на фоні решти зображення.

Після цього можна перейти до аналізу форми хмарного індикатора. Існують різноманітні методи аналізу форми, наприклад, можна визначити параметри, такі як площа, периметр, довжина контуру, кутові коефіцієнти та ін. [3; 4]. Також можна застосувати методи аналізу форми на основі геометричних фігур, таких як еліпси, прямокутники, круги тощо. Наприклад, можна використовувати методи опису форми, такі як коефіцієнт опису (*aspect ratio*), коефіцієнт ексцентриситету (*eccentricity*) та ін. [2].

Зазвичай для аналізу форми хмарних індикаторів використовуються автоматизовані алгоритми машинного навчання, які можуть бути навчені на великій кількості даних про хмарні індикатори та їх форму. За допомогою цих алгоритмів можна автоматично класифікувати хмарні індикатори за їх формою, що дає підстави робити більш точні прогнози ризику виникнення землетрусів [1].

В алгоритмі підрахунку оцінки ймовірного землетрусу супутникові знімки потрібної хмарності вкрай важливі, особливо тоді, коли потрібно локалізувати зону сейсмологічної безпеки для найбільш правильного прогнозу. Цей етап дуже важливий, адже за відсутності даних на знімку хмарного сеймотектонічного індикатора, формування прогнозу відразу ж завершується [5]. Тому знімки потрібно аналізувати в режимі реального часу, насамперед слід провести

дослідження щодо зміни форми хмар. Далі необхідно дослідити динаміку хмарних структур, після чого порівняти виявлені індикатори з границями літосферних плит або великих розломів, що у подальшому дасть змогу локалізувати цю область і виділити її як потенційно небезпечну.

На основі аналізу виділених на знімках хмарних сеймотектонічних індикаторів можна вираховувати аплітуду можливого землетрусу. Існує логарифмічна залежність між максимальною протяжністю хмарних індикаторів та магнітудою, яка виражається формулою [3]:

$$M = \ln D, \quad (1)$$

де M – розрахована магнітуда можливого підземного поштовху; D – максимальна протяжність хмарного сеймотектонічного індикатора в кілометрах.

За наведеною формулою розраховано магнітуду підземних поштовхів, зафіксованих у південно-західній частині Карибського моря. За даними знімка супутника Aqua (EOSDIS. Worldview) в день фіксації підземних поштовхів (14.08.2021 р.) спостерігається формування хмарних індикаторів (рис. 1).

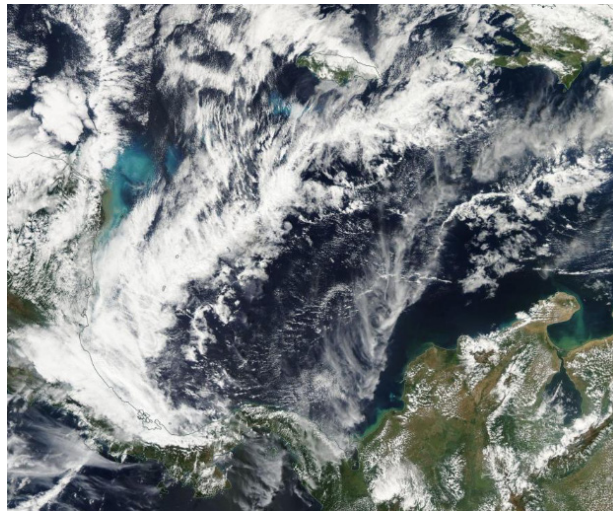


Рис. 1. Знімок із хмарним індикатором у басейні Карибського моря в день фіксування підземних поштовхів 14.08.2021 р. [6]

Перед розрахунком магнітуди слід визначити розміри лінійних хмарних аномалій. Протяжності лінійних аномалій можна вирахувати у багатьох програмних застосунках (наприклад, Google Earth Pro, ArcGIS, QGIS, Google Earth Engine та ін.), використовуючи інструменти геометрії. У цьому випадку використано платформу Google Earth Engine. Для вимірювання довжини хмар на супутникових знімках в Google Earth Engine можна використовувати різні інструменти геометрії, зокрема лінійки та полігони.

Провівши аналіз знімка (рис. 1) визначено, що протяжність хмарного утворення складає близько 1100 км. Підставивши значення протяжності в формулу (1) отримано результат розрахованої магнітуди 7,0 балів. Магнітуда зафіксованих підземних поштовхів становила 7,1 балів. Порівняння вказує на те, що обчисленням магнітуди за вищевказаною формулою достовірне й її можна використовувати для прогнозу магнітуди різного роду підземних поштовхів.

Аналогічні розрахунки проведено й для іншого різновиду хмарного індикатора – провального типу (рис. 2), який зафіксовано 18.04.2016 року на знімку зі супутника Terra на південь від острова Кюсю (Японія). Протяжність цього хмарного індикатора складає 380 км. Значення розрахованої магнітуди за формулою (1) дорівнює 5,8 бали, яке також корелюється із даними, отриманими сейсмографами.

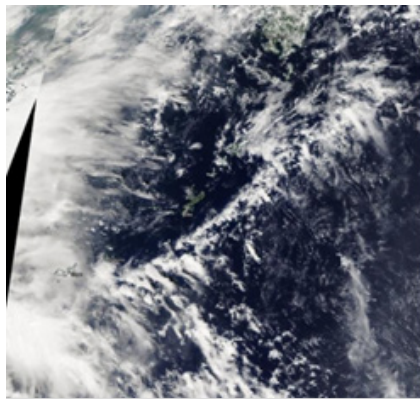


Рис. 2. Хмарний сейсмотектонічний індикатор провального типу біля о. Кюсю (Японія) 18.04.2016 р. [6]

Як зазначено вище, аналіз хмарних індикаторів за їх формою може виконуватися за допомогою методів обробки зображень та машинного навчання.

Для машинного навчання необхідно мати набір зображень, які можна використовувати для тренування моделі. Ці зображення повинні містити різні приклади хмарних індикаторів, із яких модель може вивчити ознаки та встановити зв'язки між ними. Створення архіву зображень може включати різні етапи, такі як збір зображень із різних джерел (наприклад, супутникових знімків або знімків зі Землі), обробку та підготовку зображень для подальшого використання (наприклад, зменшення розміру зображень, нормалізація кольору тощо) та збереження зображень у відповідному форматі (наприклад, JPEG або PNG).

Також для забезпечення якості та різноманітності тренувального набору, можна використовувати різні методи аргументації даних, такі як випадкові обрізки, обертання, зміщення тощо [2]. Ці методи дають змогу штучно збільшити кількість зображень у наборі та забезпечити різноманітність даних для тренування моделі. Тобто, створення архіву зображень є важливим етапом для машинного навчання моделей, які працюють із хмарними індикаторами.

У дослідженні використано знімки супутника SuomiNPP, які завантажено із офіційного сайту NASA Worldview (worldview.earthdata.nasa.gov). Так, створено архів супутникових зображень хмарних сейсмотектонічних індикаторів у період із 2016 до 2021 років для трьох зон, приурочених до тектонічних розломів у Тихому океані: акваторія Японських островів, західне узбережжя Перу та акваторія островів на північний схід від Австралії (Соломонові о-ви, Вануату та Нова Каледонія).

Провівши аналіз знімка акваторії між островами Нова Каледонія та Вануату за день до зафіксованого землетрусу (12.08.2018 р.), простежується формування лінійних зрізів хмарності вздовж тектонічного розлому на південний захід від островів. Крім того, спостерігається формування ділянок, на яких відсутні хмари у вигляді провалів. Вивчаючи хмарні індикатори на знімку (рис. 3), проведено розрахунок магнітуди підземних поштовхів.

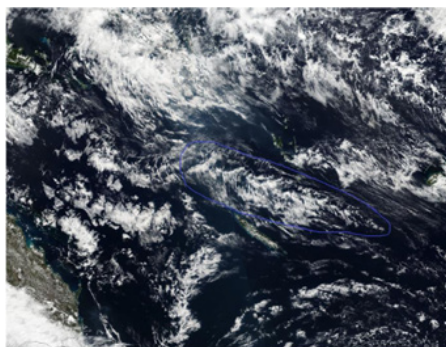


Рис. 3. Супутниковий знімок досліджуваної акваторії о-вів Вануату 11.08.2019 року із виділеною хмарною лінійною аномалією [6]

Відтак, довжина лінійних границь хмарних аномалій становить 1300 км, що рівно магнітуді 7,1 балів. Фактична магнітуда, зафіксована сейсмографами становить 7 балів, що в черговий раз вказує на те, що магнітуду описаного землетрусу можна спрогнозувати за цим типом хмарних індикаторів.

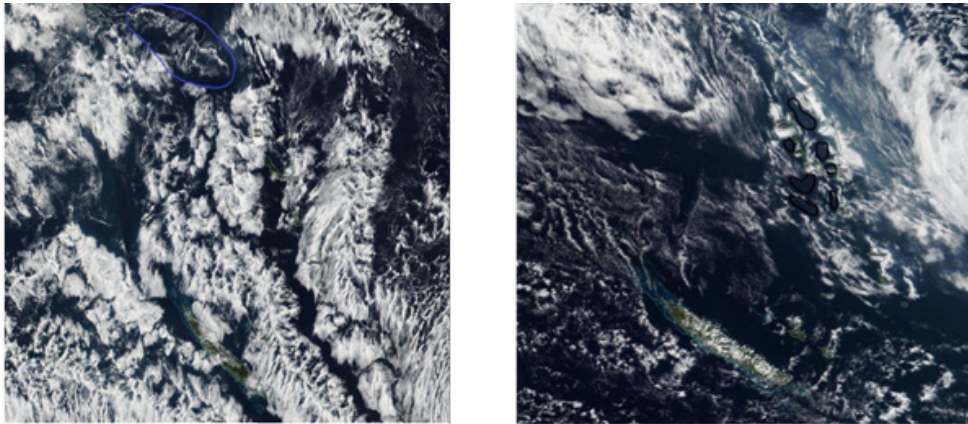


Рис. 4. Супутниковий знімок акваторії о-вів Вануату:
a – перед землетрусом 13.06.2019; б – перед землетрусом 21.06.2020 [6]

Подібна ситуація спостерігалася перед землетрусом у цьому ж регіоні 14.06.2020 р. На супутниковому знімку від 13.06.2019 р. (рис. 4) також видно активізацію сейсмічної активності у досліджуваному районі. Це підтверджують безхмарні ділянки, які з'явилися вздовж всієї довжини розлому на південь від островів. Водночас на півночі островів фіксується гребінчастий тип хмарних сейсотектонічних індикаторів (виділено на рис. 4a). Зафіксована магнітуда дорівнює 6,3 балів. Довжина гребінчатого хмарного індикатора становить близько 550 км. Розрахована магнітуда за даними значеннями також рівна 6,3 балів.

На знімку (рис. 5) від 20.10.2021 року видно лінійну хмарну аномалію, яка бере початок біля о. Хонсю. У західній частині острова фіксувався епіцентр землетрусу магнітудою 6,6 балів. Розрахована за довжиною лінійної хмарної аномалії магнітуда складає 6,5 балів.

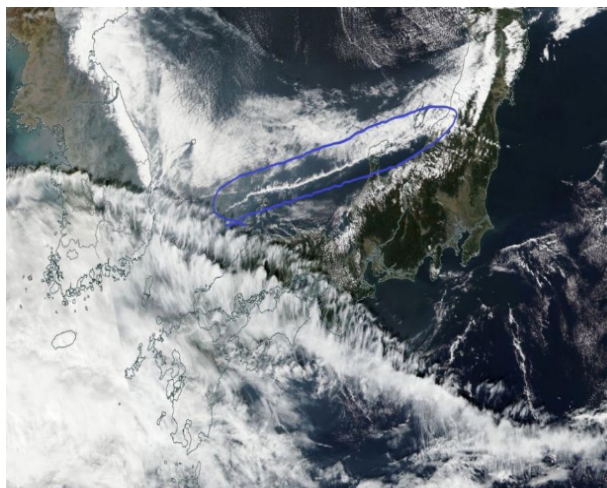


Рис. 5. Супутниковий знімок із виділеною лінійною хмарною аномалією
перед підземними поштовхами 20.10.2021 року [6]

Приклад поєднання лінійного сейсотектонічного індикатора та хмарних провалів перед підземними поштовхами чітко видно на супутниковому знімку від 14.04.2017 р., коли сейсмографами зафіксовано магнітуду 7,3 балів на о. Кюсю (рис. 6).

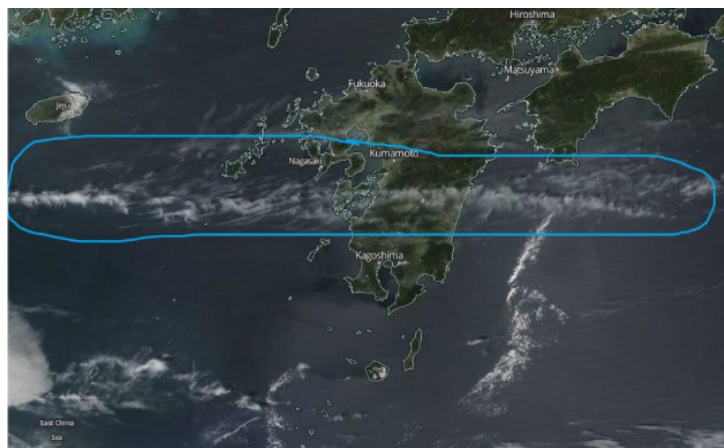


Рис. 6. Лінійний сеймотектонічний індикатор та хмарні провали перед підземними поштовхами 14.04.2017 р.

На супутниковому знімку від 27.09.2017 р., коли відбувся землетрус магнітудою 6,0 балів, спостерігається велика кількість хмарних провалів поблизу епіцентру на півночі о. Хонсю (рис. 7). Виміряна довжина лінійної аномалії складає 400 км, розрахована магнітуда становить 5,9 балів, яка є близькою до фактичної, що свідчить про зв'язок хмарної аномалії з підземним поштовхом.

Подібний зв'язок спостерігається на знімку від 25.10.2018 р., зробленому у день землетрусу магнітудою 5,7 балів (рис. 8) на східному узбережжі Японії. Тут виділяється яскраво виражений гребінчастий хмарний сеймотектонічний індикатор, який знаходиться на відстані 33 км від епіцентру землетрусу. Провівши розрахунок, отримано значення магнітуди 5,8 балів, що також корелюється із реальними значеннями.

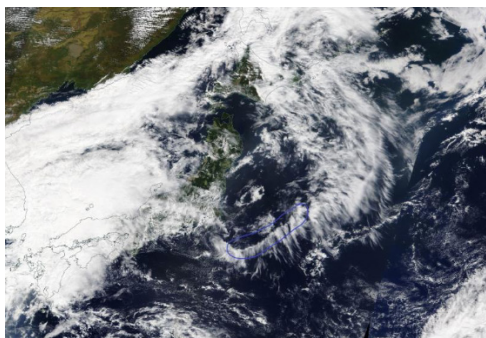


Рис. 7. Виділені хмарні провали над епіцентром землетрусу 27.09.2017 р. [6]

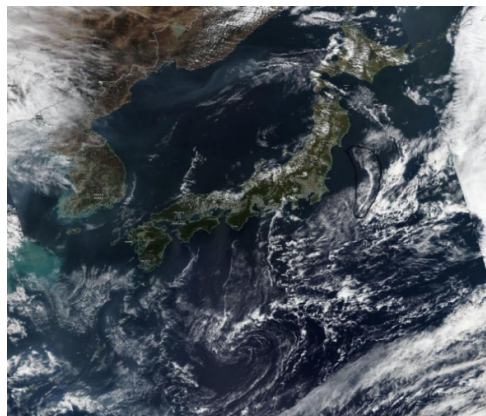


Рис. 8. Супутниковий знімок Японії 25.10.2018 р. із виділеним гребінчастим хмарним індикатором [6]

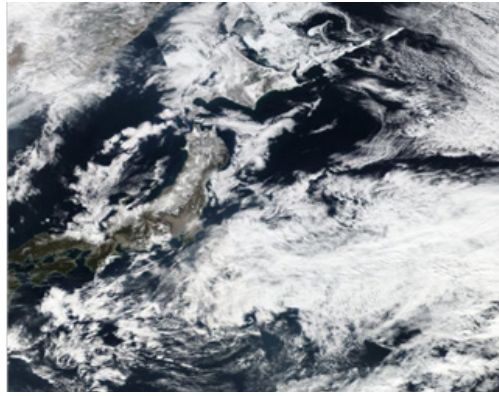


Рис. 9. Супутниковий знімок Японії 17.02.2020 року із відсутніми лінійними аномаліями та наявними хмарними провалами над епіцентром землетрусу [6]

Цікавою є ситуація, що спостерігалась у день землетрусу магнітудою 5,6 балів 17.02.2020 р. На знімку (рис. 9) вздовж тектонічних розломів лінійні хмарні аномалії не фіксуються, однак у безпосередній близькості до епіцентру землетрусу у північно-східній частині о. Хонсю спостерігаються хмарні провали. У даному випадку, через відсутність чітких лінійних аномалій розрахувати магнітуду вищенаведеним методом не можливо.

Як результат зібраного для подальшого машинного навчання архіву супутникових зображень, наведено вибірку статистичної характеристики найбільш поширених підземних поштовхів у вищенаведених зонах дослідження (табл. 1). Однак, слід зазначити, що хмарні сейсмотектонічні індикатори не є єдиним методом передбачення землетрусів та повинні використовуватися разом з іншими методами, такими як сейсмічна активність та інші геофізичні параметри.

Таблиця 1

Вибірка результатів розрахованих магнітуд за даними хмарних сейсмотектонічних індикаторів

Дата	Область дослідження	Реальна магнітуда	Рохрахована магнітуда	Довжина лінійних хмарних індикаторів, км	Похибка	
						%
12.08.2019	акваторія о-ва Нова Каледонія	7,0	7,1	1300	0,02	0,3
13.06.2020	акваторія о-ва Вануату	6,3	6,3	550	0	0
21.06.2020	акваторія о-ва Вануату	6,5		відсутні лінійні аномалії		
15.10.2018	східне узбережжя Японських о-вів	5,6	5,7	330	0,02	0,3
20.10.2021	західне узбережжя Японських о-вів	5,9	6,0	650	0,05	0,8
16.04.2016	західне узбережжя Перу	7,8	7,6	2000	0,2	2,6
18.04.2017	західне узбережжя Перу	6,0	6,05	425	0,05	0,8

Аналіз супутникових знімків показує, що хмарні сейсмотектонічні індикатори мають зв'язок із підземними поштовхами, адже отримані розрахункові дані корелюються із реальними показниками магнітуди, причому похибка не перевищує 2,6 %. Такі значення похибок дають підстави розглядати вищенаведений метод обробки зображень для прогнозування підземних поштовхів за допомогою впровадження даних для машинного навчання. Цей підхід полягає в тому,

що спочатку створюється тренувальний набір зображень, що містять різні хмарні індикатори, з якого навчальна модель може навчитися розпізнавати ці індикатори на зображеннях [1; 2].

Після цього можна застосовувати алгоритми машинного навчання, такі як нейронні мережі, для розпізнавання хмарних індикаторів на зображеннях. Для цього використовуються навчальні дані, що містять зображення з різними типами хмарних індикаторів та мітками, що вказують на те, який індикатор присутній на зображенні [5].

Після тренування моделі можна використовувати її для розпізнавання хмарних індикаторів на нових зображеннях, що дає змогу проводити аналіз хмарних індикаторів у режимі реального часу та отримувати прогнози землетрусів.

Висновки. Аналіз даних космічних знімків хмарних провісників може бути корисним для виявлення можливих землетрусів. Для цього необхідно зібрати дані з космічних спостережень із різних районів земної кулі та проаналізувати зміни в хмарах, що можуть вказувати на можливу сейсмічну активність.

Проте слід зазначити, що хмарні провісники землетрусів є тільки одним із показників можливих сейсмічних активностей і не завжди можуть бути пов'язані з землетрусами. Тому, для точного виявлення можливих землетрусів варто поєднувати дані з космічних знімків з іншими методами моніторингу земної кори, такими як вимірювання деформації, гравітаційні зміни, радіоактивний фон тощо.

Створення бази даних для досліджуваних територій може оптимізувати процес моніторингу та прогнозування землетрусів, а також дасть змогу ефективно реагувати на розвиток таких явищ і нівелювати їх поширення. Створення та ведення такої бази даних у поєднанні з використанням класичних сейсмотектонічних методів, а також із впровадженням машинного навчання, може бути цілком прийнятним та ефективним.

Новизна дослідження полягає в комплексному підході до використання спеціальних алгоритмів та аналізу хмарних індикаторів на основі великого обсягу відповідних.

Список використаних джерел:

1. Михайлюкова П. Космическое картографирование динамики рельефа в зонах вулканической активности на основе метода радиолокационной интерферометрии [Неопубл. автореф.]. 2016.
2. Морозова Л. И. Проявление геодинамической активности земной коры в облачных полях в облачных полях 23.10.2011 г. *Геология и геофизика*. 2012. Т. 53. № 4. С. 541–550.
3. Степанов И. В. Геоинформационное обеспечение мониторинга землетрясений с использованием материалов дистанционного зондирования Земли [Неопубл. автореф. диссертации на соискание уч. степени канд. геогр. наук]. 2011.
4. Naveed M., Mushtaq S., Alsharif K. A. A review on open source software tools for seismic data analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2020. 11(1). P. 809–828.
5. Novikov V. A., Okunev V. I., Klyuchkin V. N., Liu J., Ruzhin Y. Ya., Shen X. (2017). Electrical triggering of earthquakes: results of laboratory experiments at spring-block models. *Earthquake Science*, 2017. 30 (4). P. 167–172, Bibcode: 2017EaSci.30.167N.
6. TerraMetrics Google Earth Engine. 2023. URL: worldview.earthdata.nasa.gov/

References:

1. Mikhailyukova, P. (2016). Space mapping of relief dynamics in zones of volcanic activity based on the method of radar interferometry. [Unpubl. abstract].
2. Morozova, L. I. (2012). Manifestation of geodynamic activity of the earth's crust in cloud fields. *Geology and geophysics*, 53(4), 541–550.
3. Stepanov, I. V. (2011). Geoinformation support for earthquake monitoring using Earth remote sensing materials [Unpubl. abstract dissertations for the competition degree cand. geogr. sciences].
4. Naveed, M., Mushtaq, S., & Alsharif, K. A. (2020). A review on open source software tools for seismic data analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 809–828.
5. Novikov, V. A., Okunev, V. I., Klyuchkin, V. N., Liu, J., Ruzhin, Y. Ya., & Shen, X. (2017). Electrical triggering of earthquakes: results of laboratory experiments at spring-block models. *Earthquake Science*, 30(4), 167–172, Bibcode: 2017EaSci.30.167N.
6. TerraMetrics Google Earth Engine. (2023). worldview.earthdata.nasa.gov/

Стаття надійшла до редколегії
25.05.2023 р.