



DOI:10.36023/ujrs.2019.23.161

УДК 504.064.3:258.837:(554.576:551.243.8:550.348.436)(477)

## Супутниковий моніторинг хмарності над зонами глибинних розломів, короткостроковий прогноз землетрусів та сейсмічна активність в Україні

А. І. Воробйов, С. І. Голубов \*

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, вул. Олеся Гончара 55-Б, Київ, 01054, Україна

У статті йдеться про короткостроковий прогноз землетрусів на основі супутникового моніторингу зон глибинних розломів в період формування вогнищ землетрусів і проявів їхніх провісників — форшоків, які проявляються у вигляді аномалій хмарності за кілька діб до землетрусу. Останніми роками зафіксовані аномалії хмарності перед відносно слабкими землетрусами, на півдні України. Землетруси відбуваються і у Дніпровсько-Донецькій западині (ДДЗ).

Аналіз тектонічної карти ДДЗ, на яку було нанесено епіцентри землетрусів 2010–2015 років показав, що вони були приурочені до зон глибинних розломів та вузлів їхнього перетину. Запропоновано технологію прогнозу землетрусів, яка включає два етапи. На першому етапі за результатами просторово-часового аналізу будують карти параметрів землетрусів (дати, координати епіцентрів, глибини гіпоцентрів), які відбуваються на протязі певного періоду часу, який дозволяє визначити область підвищення сейсмічної активності. На другому етапі в цій області проводять супутниковий моніторинг аномалій хмарності з метою короткострокового прогнозу землетрусів.

**Ключові слова:** землетруси, супутниковий моніторинг, сейсмічна активність, Дніпровсько-Донецька западина, лінійні аномалії хмарності

© А. І. Воробйов, С. І. Голубов. 2019

Для короткострокового прогнозу потужних землетрусів важливим є розуміння тектонічних процесів, які відбуваються у сейсмоактивному регіоні. Адже, внаслідок їхньої активізації, утворюються зони підвищеної тріщинуватості в межах крупних розломів земної кори, над якими перед землетрусами в атмосфері спостерігаються особливі явища — лінійні аномалії хмарності.

У минулому сторіччі були запропоновані моделі народження сильних землетрусів (ЗТР): модель нестійкого ковзання по розлому та широко відомі під назвами: ділагантно-дифузійна модель (ДД), модель лавино-нестійкого утворення тріщин (ЛНТ). Пізніше була запропонована модель консолідації середовища.

При розробці цих моделей були використані результати лабораторних досліджень монолітних зразків гірських порід, на основі яких підготовку землетрусу зв'язували з процесом утворення тріщин (Соболев, 1993).

Одним з методів прогнозу землетрусів є супутниковий моніторинг аномалій хмарності, які є проявами форшоків, що спостерігаються в процесі підготовки сильних і катастрофічних землетрусів. Значний вклад у популяризацію методу короткострокового прогнозу землетрусів на основі супутникового моніторингу аномалій хмарності внесла Л. І. Морозова (Морозова, 2005).

В центрі аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України також зареєстровані аномалії хмарності в ряді регіонів Альпійського тектонічного поясу. Зокрема, в останні два десятиріччя виявлені аномалії хмарності перед сильними ЗТР, що відбулись в Італії, Румунії, у Малій Азії (Туреччина), на

Кавказі та Японії (Лялько та ін., 2005; Воробйов та ін., 2012; Воробйов та ін., 2016; Воробйов та ін., 2018).

Слід відзначити, що в останнє десятиріччя землетруси відбулись і в Україні.

### Землетруси в Україні

Останніми роками в Україні відбулись землетруси. Деякі з них були відгуком сейсмічних подій в зоні Вранча, причому на інших — в межах Дніпровсько-Донецької западини і на узбережжі Азовського моря.

### Землетруси у ДДЗ в 2010 році

За даними В. А. Свідлової і М. Н. Бондара (Svidlova, Bondar, 2011) у центральній частині Дніпровсько-Донецької западини 14 травня 2010 року була зареєстрована сейсмічна подія. У зв'язку із відсутністю відомостей про проведення вибухів в цьому районі ця подія була віднесена до землетрусів. Землетрус відбувся о 23 годині 16 хвилин, магнітуда об'ємних хвиль  $m_b$  від цього землетрусу становила 2.3 бала, координати епіцентру були такі: широта  $\varphi_{ен} = 49.51^\circ N$ , довгота  $\lambda_{ен} = 35.37^\circ E$ , глибина вогнища становила приблизно  $h_0 = 3 \pm 3$  км.

### Землетруси у ДДЗ 3 лютого 2015 року

У Таблиці 1 наведено час, координати, глибини вогнища і магнітуда об'ємних хвиль від землетрусу у ДДЗ. Час ЗТР в Таблиці 1 наведено у годинах, хвилинах і секундах. З Таблиці 1 видно, що різниця у часі між ЗТР становила 2 секунди.

\* E-mail: [asdfieldspec3@gmail.com](mailto:asdfieldspec3@gmail.com)

Координата першого ЗТР по широті була менше на 0.17 градуса, а по довготі всі ЗТР відрізнялись не більше ніж на 0.03 градуса. Гіпоцентри всіх ЗТР знаходились на глибині 10 км, що відповідає фундаменту, магнітуди також однакові і дорівнювали приблизно 4.5 одиниць.

**Таблиця 1**

Часові і просторові параметри землетрусів, які відбулись 3 лютого 2015 року

Час (GMT + 2)	Координати (°)		Глибина, км	Магнітуда
	φ N	λ E		
05:56:28.2	50.48	34.20	10	mb=4.5
05:56:30.5	50.65	34.21	10	mb=4.6
05:56:30.3	50.66	32.22	10	mb=4.5
05:56:32.0	50.67	32.20	10	mb=4.5

На Рис. 1 синім кольором винесено положення епіцентрів ЗТР, один з яких відбувся 14 травня 2010 року, а інші — (4) мали місце 3 лютого 2015 року. З Рис. 1 видно, що епіцентр ЗТР, який стався 14 травня 2010 року, знаходився між Баштано-Белгородською і Орехово-Харківською зонами розломів.

Епіцентр першого ЗТР 3 лютого 2015 року знаходився у північно-східній частині Болтишсько-Оболонської (БО) зони розломів. Епіцентри трьох ЗТР, що мали місце 3 лютого 2015 року, знаходились в районі перетину північного крайового роз-

лому з вузькою субширотною Овручсько-Лебединською (ОЛ) зоною розломів.

Раніше вважалося, що аномалії хмарності можуть бути зареєстровані тільки перед потужними землетрусами.

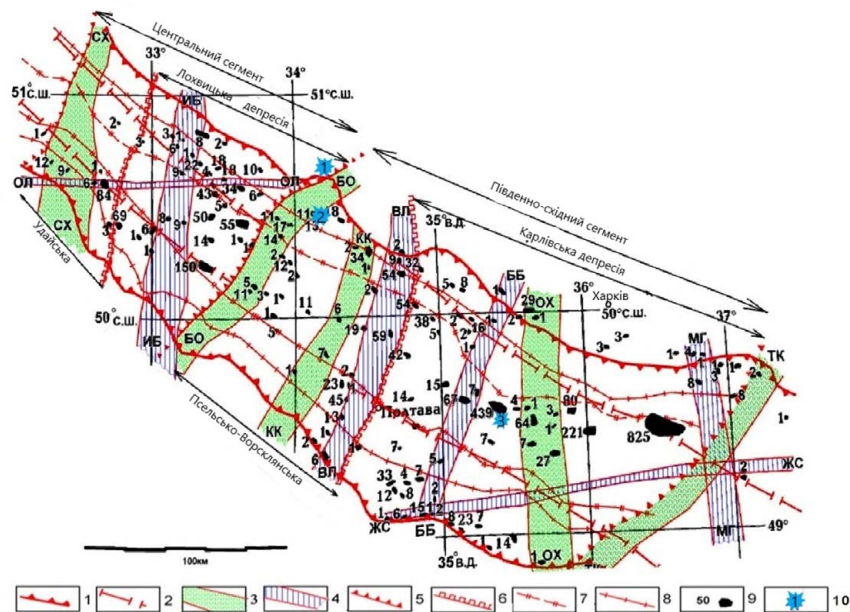
В результаті проведених досліджень встановлено, що аномалії хмарності можуть бути виявлені за матеріалами супутникових зйомок і перед слабкими землетрусами. Наприклад, перед слабким ЗТР 7 серпня 2016 року на півдні України, зокрема, у місті Маріуполь. Вогнище сейсмічного явища знаходилось на глибині 10 кілометрів, тому землетрус проявився на значних відстанях від нього. В епіцентрі магнітуда становила близько 6 балів, а у Маріуполі — 5 балів. На Рис. 2, 3 наведено фрагменти супутникових знімків півдня України перед цим ЗТР.

В результаті супутникового моніторингу аномалії хмарності на півдні України встановлено, що вони можуть виявлятися на супутникових знімках і використовуватись для прогнозу землетрусів малої магнітуди.

На основі вивчення лінійних аномалій хмарності, які спостерігались перед сильними землетрусами у Азово-Чорноморському регіоні, на Кавказі, у Малій Азії, на Апенінському півострові, поблизу берегів Японії, можна зробити ряд висновків. Утворення аномалій хмарності є проявом форшоков, під час яких відбувається розрив суцільності порід Землі або тертя стінок глибинного розлому під час зсуву тектонічних плит.

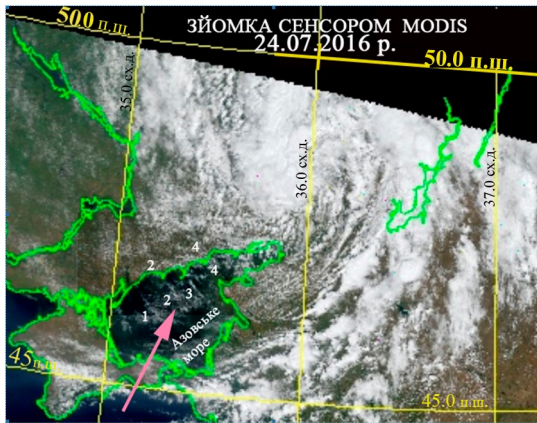
Виміри зсуву вздовж “берегів” сейсмогенних розривів, свідчать про те, що вогнищами ЗТР є розриви зсувного типу, а нормальна складова зсуву “берегів” дуже мала. Вивільнення накопиченої енергії відбувається в результаті непружної деформації.

Результати вивчення аномалій хмарності, особливо там, де вогнища ЗТР пов'язані з глибинними розломами, свідчать



**Рис. 1.** Тектонічна схема ДДЗ у межах центрального й південно-східного нафтогазоносних сегментів: 1 — крайові розломи ДДЗ по верхньодонецьким і кам'яновугільним відкладам; 2 — крайові розломи (рифельного грабену); 3 — дорифтові (архейсько-протезойські) міжблокові глибинні розломи (СХ, БО, КК, ОХ, ТК); 4 — глибинні розломи неясного генезису й проблемного виділення (ОЛ, ІБ, ВЛ, ББ, ЖС, МГ); 5 — межі між сегментами Дніпровсько-Донецької западини; 6 — межі між сідловинами й депресіями всередині сегментів; 7 — межі осової зони ДДЗ; 8 — межі між приосовими й прибортовими зонами ДДЗ; 9 — родовища нафти й газу з початковими вилученими запасами в нафтовому еквіваленті (н. е.); 10 — землетруси 2015 та 2010 років.

Розломи: СХ — Смеловсько-Холмський, БО — Болтишсько-Оболонський, КК — Криворизько-Комаричський, ОХ — Орехово-Харківський, ТК — Томаковсько-Купянський, ОЛ — Овручсько-Лебединський, ІБ — Інгuleцько-Борянський, ВЛ — Верховсько-Льговський, ББ — Баштано-Белгородський, ЖС — Жмеринсько-Старобельський, МГ — Мангусько-Губкінський, БА — Барановичсько-Астраханський (північний крайовий розлом), ПМ — Прип'ятсько-Маничський (південний крайовий розлом)



**Рис. 2.** Група аномалії хмарності за матеріалами зйомки сенсором MODIS 27 липня 2016 року за 10 діб перед землетрусом 7 серпня 2016 року. (Аномалії хмарності позначені цифрами 1...4)

про можливість використання супутникового моніторингу для короткострокового прогнозу ЗТР, який необхідно здійснювати не за однією аномалією хмарності, а за їх реєстрацією протягом певного часу (від одного до двох тижнів).

Для більш детального супутникового моніторингу аномалій хмарності, крім зображень, отриманих сенсором MODIS, інтервал зйомки якого однієї і тієї ж ділянки поверхні Землі складає добу, необхідно використовувати матеріали дистанційних зйомок, отримані з меншим інтервалом (щонайменше раз на 4 години).

Для прогнозу ЗТР необхідно використовувати такі характеристики ЛАХ:

- довжина ЛАХ, яка пов'язана з магнітудою майбутнього землетрусу;
- час існування ЛАХ (наприклад кілька діб), що збільшує вірогідність прогнозу ЗТР;
- перетин ЛАХ використовується для визначення положення вогнища ЗТР.

### Просторово-часовий аналіз параметрів землетрусів

Перед проведенням короткострокового прогнозу на основі виявлення аномалій хмарності пропонується використовувати розроблену в ЦАКДЗ технологію просторово-часового аналізу параметрів землетрусів (ПЧА), яка дозволяє виявити області активізації сейсмічної активності і може бути використана на етапі середньострокового етапу прогнозу. На основі спеціально розроблених програм для побудови карт параметрів ЗТР (дата, глибина, магнітуда, а також карти інтегральних параметрів, число ЗТР і суми магнітуд ЗТР) для прямокутних блоків, на які розбивають регіон.

Розроблені програми, які дозволяють будувати карти для різних за протяжністю періодів часу (від року до десяти і більше років). Крім того, розроблено програму детального просторово-часового аналізу, яка дозволяє будувати поля параметрів ЗТР для кожної доби заданого місяця, що дозволяє більш оперативно і точно виявляти ділянки підвищення сейсмічності. Обидва варіанти програми просторово-часового аналізу параметрів ЗТР дозволяють виявляти ділянки підвищення сейсмічної активності регіону. Таким чином, методика короткострокового прогнозу сильних землетрусів включає два етапи.

Перший етап включає виявлення ділянок сейсмічної активізації на основі просторово-часового аналізу (ПЧА) з помісячним розрізненням, а другий етап включає детальний



**Рис. 3.** Потужна аномалія хмарності (типу “каньйона”) над Азовським морем (зйомка сенсором MODIS 4 серпня 2016 року) за три доби перед землетрусом 7 серпня 2016 року

ПЧА із добовим розрізненням і виявлення лінійних аномалій хмарності за матеріалами супутникових зйомок ділянок сейсмічної активізації.

Отримані дані дозволяють виявити області підвищеного ризику для організації комплексу досліджень з короткострокового прогнозу землетрусів. Для більш точного прогнозу місця і магнітуди сильних ЗТР необхідно залучати інші методи, зокрема, супутниковий моніторинг аномалій хмарності, за допомогою якого можна здійснити прогноз ЗТР з точністю до 3–4 діб. У наших публікаціях та роботах інших авторів, зокрема, Л. І. Морозової (Морозова, 2005), наведено багато прикладів виявлення ЛАХ перед сильними землетрусами.

### Висновки

Запропоновано спосіб прогнозу магнітуди майбутнього ЗТР за довжиною лінійних аномалій хмарності. Результати досліджень свідчать про можливість використання довжини лінійних аномалій хмарності для короткострокового прогнозу магнітуди землетрусів. Пропонується технологія короткострокового прогнозу ЗТР на основі просторово-часового аналізу параметрів ЗТР і супутникового моніторингу аномалій хмарності.

### Література

- Воробйов А. І., Лялько В. І., Мельниченко Т. А., Подорван В. М. Прояви аномалій хмарності на супутникових зображеннях перед сильними землетрусами. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2016. № 10. С. 21–25. URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/85>.
- Воробйов А. І., Лялько В. І., Куриленко В. С., Мельниченко Т. А. Супутникові методи при изучении глубинных разломов и влияние последних на нефтегазоносность (на примере Днепровско-Донецкой впадины). *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2016. № 11. С. 22–29. URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/91>.
- Воробйов А. І., Голубов С. І. Можливість короткострокового прогнозу сильних землетрусів за матеріалами супутникових зйомок аномалій хмарності. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2018. № 19. С. 4–11. URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/139>.
- Кутас В. В., Андрущенко Ю. А., Омельченко В. Д., Лящук А. И, Калитова И. А. Землетрясения в Днепровско-Донецком авлакогене. *Геофизический журнал*. 2015. Т. 37. № 5. С. 143–154.



- Лялько В. І., Воробйов А. І., Шульга В. І. Особливості використання матеріалів космічних зйомок для прогнозування землетрусів. *Доповіді НАН України*. 2005. № 9. С. 107–113.
- Морозова Л. І. Спутниковый мониторинг землетрясений. Владивосток: Дальнаука, 2005. 137 с.
- Соболев Г. А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
- Спосіб прогнозування катастрофічних землетрусів: пат. 100261 Україна, Зареєстровано 10.12.2012, опубліковано 10.12.2012. Бюл. №23.
- Svidlova V. A., Bondar M. N. Catalog and details of seismic events in central and northeastern part of Ukraine for 2010. In *Seismological Bulletin of Ukraine in 2010*. Sevastopol: "EKOSIGidrofizika", 2011. P. 109–114.
- Vorobiev A. I., Lyalko V. I., Podorvan V. N., Shulga V. I., Assessment of the magnitude for the large earthquakes using the anomaly cloudiness parameters from satellite images. Book of abstracts of the European Seismological Commission. Moscow, 2012. P. 196–197.
- Sobolev, G. A. (1993). *Earthquake Forecast Basics*. M.: Nauka. (in Russian).
- Pat. 100261. Method for predicting catastrophic earthquakes. Vorobiev, A. I., Lyalko, V. I. Published 10.12.2012. Bul. № 23. (in Ukrainian).
- Svidlova, V. A., Bondar, M. N. (2011). Catalog and details of seismic events in central and northeastern part of Ukraine for 2010. In *Seismological Bulletin of Ukraine in 2010*. Sevastopol: "EKOSIGidrofizika". 109–114.
- Vorobiev, A. I., Lyalko, V. I., Podorvan, V. N., Shulga, V. I. (2012). Assessment of the magnitude for the large earthquakes using the anomaly cloudiness parameters from satellite images. Book of abstracts of the European Seismological Commission. Moscow. 196–197.
- Vorobiev, A. I., Lyalko, V. I., Melnichenko, T. A., Podorvan, V. M. (2016). Manifestations of cloud anomalies on satellite images before strong earthquakes. *Ukrainskyj zhurnal dystancijnogho zonduvannja Zemli*, 10. 21–25. Retrieved from <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/85>. (in Ukrainian)
- Vorobiev, A. I., Lyalko, V. I., Kurylenko, V. S., Melnichenko, T. A. (2016). Satellite methods for studying deep faults and the effect of the latter on oil and gas potential (on the example of the Dnieper-Donets depression). *Ukrainskyj zhurnal dystancijnogho zonduvannja Zemli*, 11. 22–29. Retrieved from <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/91>. (in Ukrainian).
- Vorobyov, A. I., Golubov, S. I. (2018). Possibility of short-term forecast of strong earthquakes based on satellite imagery of cloud anomalies. *Ukrainskyj zhurnal dystancijnogho zonduvannja Zemli*, 19. 4–11. Retrieved from <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/139>. (in Ukrainian).

## Reference

- Kutas, V. V., Andrushchenko, Yu. A., Omelchenko, V. D., Lyashchuk, A. I., Kalitova, I. A. (2015). Earthquakes in the Dnieper-Donets aulacogen, *Geofizicheskij zhurnal*. 37 (5). 143–154. (in Russian).
- Lyalko, V. I., Vorobiev, A. I., Shulga, V. I. (2005). Features of satellite imagery material for predicting earthquakes. *Dopovidi NAN Ukrainy*. 107–113. (in Ukrainian).
- Morozova, L. I. (2005). *Earthquake Satellite Monitoring*. Vladivostok: Daljnauka. (in Russian).

## СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ОБЛАЧНОСТИ НАД ЗОНАМИ ГЛУБИННЫХ РАЗЛОМОВ, КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ В УКРАИНЕ

А. И. Воробьев, С. И. Голубов

ГУ "Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины", ул. О. Гончара 55-Б, 01054, Киев, Украина. E-mail: asdfieldspec3@gmail.com

В статье приведено обоснование возможностей спутникового мониторинга зон глубинных разломов в период формирования очага сильных и катастрофических землетрясений и проявлений предвестников сильных и катастрофических землетрясений — форшоков, которые проявляются в виде аномалий облачности в период времени от двух недель до нескольких суток.

В последние годы зафиксированы аномалии облачности перед относительно слабыми землетрясениями, которые произошли на юге Украины. Очень важно, что землетрясения происходят и в Днепровско-Донецкой впадине (ДДЗ).

Анализ тектонической карты ДДЗ с вынесенным положением эпицентров землетрясений, которые произошли в 2010 и 2015 годах показал, что эти землетрясения приурочены к зонам глубинных разломов или их пересечения. В статье предложена технология прогноза землетрясений, которая включает два этапа. На первом этапе по результатам пространственно-временного анализа строят карты параметров землетрясений (даты, координаты эпицентров, глубины гипоцентров), которые происходят в течение определенного периода времени, который позволяет определить область повышения сейсмической активности. На втором этапе в этой области проводят исследования по спутниковому мониторингу аномалий облачности с целью краткосрочного прогноза сильных землетрясений.

**Ключевые слова:** землетрясения, спутниковый мониторинг, сейсмическая активность, Днепровско-Донецкая впадина, линейные аномалии облачности

## SATELLITE MONITORING OF CLOUDS OVER DEEP FAULT ZONES, SHORT-TERM EARTHQUAKE FORECAST AND SEISMIC ACTIVITY IN UKRAINE

A. I. Vorobiev, S. I. Golubov

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine O. Gonchar st. 55-B, 01054, Kyiv, Ukraine. E-mail: asdfieldspec3@gmail.com

The article substantiates the possibilities of satellite monitoring of deep fault zones during the formation of a source of strong and catastrophic earthquakes and the manifestations of precursors of strong and catastrophic earthquakes — foreshocks, which manifest themselves in the form of cloud anomalies over a period of time from two weeks to several days.

In recent years, cloud cover anomalies have been recorded before relatively weak earthquakes that occurred in southern Ukraine. It is very important that earthquakes occur in the Dnieper-Donets Depression.

An analysis of the tectonic map of the remote sensing data with the position of the epicenters of earthquakes that occurred in 2010 and 2015 showed that these earthquakes are confined to zones of deep faults or their intersections. The article proposed an earthquake prediction technology, which includes two stages. At the first stage, based on the results of spatial-temporal analysis, maps of the parameters of earthquakes (dates, coordinates of epicenters, depths of hypocenters) are built, which occur over a certain period of time, which allows you to determine the area of increased seismic activity. At the second stage, research is being carried out in this area on satellite monitoring of cloud anomalies in order to short-term forecast strong earthquakes.

**Keywords:** earthquakes, satellite monitoring, seismic activity, Dnieper-Donets depression, linear cloud anomalies

*Рукопис статті отримано 21.11.2019*