# РОЗДІЛ І Фізична географія

УДК 550.8(477-924.52) DOI https://doi.org/10.32782/geochasvnu.2025.5.01

# Василь Ігнатишин

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник відділу сейсмічності Карпатського регіону, Інститут геофізики імені С. І. Субботіна Національної академії наук України, доцент кафедри географії та туризму, Закарпатський угорський інститут імені Ференца Ракоці II rgstrs1962@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/000-0003-0727-2132

# Тібор Іжак

кандидат географічних наук, PhD, доцент, доцент кафедри географії та туризму, Закарпатський угорський інститут імені Ференца Ракоці II Tiboras@kmf.uz.ua, ORCID: https://orcid.org/000-0002-0940-8947

## Стефан Молнар Д

кандидат географічних наук, PhD, доцент, доцент кафедри географії та туризму, Закарпатський угорський інститут ім. Ференца Ракоці II molnar.d.istvan@kmf.org.ua, ORCID: https://orcid.org/ 000-0003-2959-9136

# Адальберт Рац

PhD,

Закарпатський угорський інститут імені Ференца Ракоці II racz.bela@kmf.org.ua, ORCID: https://orcid.org/000-0003-3780-2843

# Моніка Ігнатишин

провідний інженер відділу сейсмічності Карпатського регіону, Інститут геофізики імені С. І. Субботіна Національної академії наук України sitkomonika@i.ua, ORCID: https://orcid.org/000-0000-0154-282x

## Адальберт Ігнатишин

інженер II категорії відділу сейсмічності Карпатського регіону, Інститут геофізики імені С. І. Субботіна Національної академії наук України Adalbert\_Ihnatisin@i.ua, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8597-2417

© Ігнатишин Василь, Іжак Тібор, Молнар Д Стефан, Рац Адальберт, Ігнатишин Моніка, Ігнатишин Адальберт, 2025

# ЗВ'ЯЗОК РАДІОАКТИВНОГО ФОНУ СЕРЕДОВИЩА, ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ З СЕЙСМОТЕКТОНІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В КАРПАТСЬКОМУ РЕГІОНІ

Анотація. Закарпатський внутрішній прогин відомий як сейсмогенераційний регіон та представлений як територія, де щорічно реєструються багато землетрусів. На основі комплексних геофізичних спостережень у Закарпатському внутрішньому прогину виявлено зв'язки сейсмотектонічних процесів, геодинаміки регіону зі змінами метеорологічних та геофізичних полів. У статті побудовано часові розподіли параметрів геофізичних полів; проведено розрахунок коефіцієнтів кореляційного аналізу; проведено порівняльний аналіз інтервалів часу, які характеризуються аномальними параметрами геофізичних полів. Результати дослідження показали: землетруси відбуваються в часових інтервалах, коли спостерігаються інтенсивні рухи кори, зокрема в разі стиснення порід, що підтверджується варіаціями розрахованих величин прискорення геомеханічних рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому. Розглянуто варіації радіоактивного фону середовища у 2023 р. в центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину, варіації температури повітря, показано особливості часового розподілу спостережуваних параметрів. Показано зв'язок метеорологічного параметру та геофізичного поля із сейсмотектонічними процесами в Карпатському регіоні.

Ключові слова: бета-, гама-випромінювання, сейсмічність регіону, температура повітря, геодинамічний стан, Оашський глибинний розлом.

### Ignatyshyn Vasyl, Izhak Tibor, Molnar D Stefan, Rats Adalbert, Ignatyshyn Monika, Ignatyshyn Adalbert. RELATIONSHIP OF RADIOACTIVE BACKGROUND OF THE ENVIRONMENT, AIR TEMPERATURE WITH SEISMOTECTONIC PROCESSES IN THE CARPATHIAN REGION

Abstract. The Transcarpathian inland trough is known as a seismogenerating region and is represented as an area where many earthquakes (50-150 events) are recorded annually. Against the background of these weak tremors on the territory of Transcarpathia and adjacent territories of neighboring countries, there are several stronger earthquakes felt by the population of the region. On the basis of complex geophysical observations in the Transcarpathian internal depression to identify the connections of seismotectonic processes, geodynamics of the region with changes in meteorological and geophysical fields. The object of the study is modern horizontal movements of the crust, the time distribution of local seismicity, the time distribution of parameters of the radioactive background of the environment, in particular beta-, gamma-radiation, variations in atmospheric air temperature. The subject of the study is the connections between the characteristics of modern horizontal movements of the crust, local seismic activity and parameters of the radioactive background of the environment, seismotectonic processes and changes in air temperature. When solving the tasks set by the article, methods for calculating the physical characteristics of geomechanical processes, in particular modern horizontal movements of the crust in the zone of the Oash deep fault, were used, correlation analysis coefficients were calculated. The article examines the analysis of the geodynamic and seismic state in the Carpathian region, for the first time the connections between the dynamics of crustal movements in the Oash deep fault zone, the temporal distribution of local seismicity, the response to these processes of the radioactive background of the environment for 2023 are investigated: intense crustal movements, seismic activity and anomalous variations in the parameters of geophysical fields are combined in these time intervals. The influence of atmospheric air temperature on geophysical and geological processes in the studied region is shown. Earthquakes occur in time intervals when intensive crustal movements are observed, in particular during rock compression, which is confirmed by variations in the calculated acceleration values of geomechanical crustal movements in the Oash deep fault zone. Variations of the radioactive background of the environment in 2023 in the central part of the Transcarpathian internal trough are considered, features of the temporal distribution of the observed parameters are noted. Changes in the meteorological state of the environment, in particular the temperature of atmospheric air at the regime station "Trosnik" are shown.

Key words: beta-, gamma-radiation, seismicity of the region, air temperature, geodynamic condition, Oash deep fault.

Актуальність теми дослідження. Важливість проведених досліджень полягає в тому, що тут розглядаються питання, які є суттєвими для вирішення завдань, пов'язаних з екологічним станом сейсмонебезпечних територій, зокрема Карпатського регіону, в тому числі Закарпатського внутрішнього прогину. Відомо, що на території Карпатського регіону реєструються місцеві землетруси, які характеризуються різними енергетичними величинами. Закарпатський внутрішній прогин відомий як сейсмогенераційний регіон та представлений як територія, де щорічно реєструються багато землетрусів (50–150 подій). На фоні цих слабких підземних поштовхів на території Закарпаття та прилеглих територій сусідніх країн відбуваються декілька

сильніших, відчутних населенням краю землетрусів. Саме ці землетруси можуть бути індикаторами підвищення сейсмічності регіону. Також слід відзначити, що відчутні землетруси мають прояв періодичності, зокрема в Закарпатському внутрішньому прогині відмічають періоди тривалістю 12 років, протягом яких ми є свідками як підвищеної сейсмічності, так і певного сейсмічного затишшя. У липні 2015 р. на території Закарпаття в околицях с. Буштино відбулася серія місцевих землетрусів різних магнітуд, у тому числі зареєстровано 6 сильніших відчутних землетрусів. Протягом двох наступних місяців сейсмічними станціями регіону зареєстровано декілька сотень невеликих землетрусів. Цікавий період, який наступив після цього сейсмічного зростання, а саме протягом 5 наступних років на фоні численних підземних поштовхів, які реєструються тільки сейсмічними приладами, не відбулося жодного відчутного землетрусу. Цей період сейсмічного затишшя обірвався взимку 2020 р., коли зареєстрували відчутний землетрус у районі селища Вилок (Берегівський район, Закарпатська область). Дослідження вказували на відгук фізичних полів земної кори на геодинамічний стан регіону, вказано на вплив метеорологічних та гідрологічних параметрів на сейсмотектонічні процеси в сейсмонебезпечних регіонах [7-10]. Важливо дослідити зміни метеорологічних параметрів та їх вплив на зміни геофізичних полів, протікання геологічних процесів у Карпатському регіоні на сучасному етапі.

Стан вивчення питання з аналізом основних праць. Вивченню проблем, пов'язаних певною мірою з тематикою статті, присвячено публікації в різних наукових журналах. У роботі [20] представлено побудовані карти горизонтальних деформацій та зміщення земної кори і розподілу параметрів деформацій на території Заходу України за даними ГНСС станцій із 2018 по 2021 роки, де відзначаються дві зони стиску: одна на Закарпатті, що відповідає території Закарпатського глибинного розлому, а інша – на північному заході регіону. Представлений у [18] алгоритм та отримані результати можуть бути використані для розроблення нових та уточнення наявних моделей рухів тектонічних плит і систем координат, а також для прогнозування рухів земної кори. Вивчення (повторних) землетрусів, що відбувалися протягом 2013-2015 рр. поблизу с. Тросник на півдні Закарпаття, показало, що епіцентр найсильнішого землетрусу опинився майже точно на розломі донеогенового фундаменту паралельного до дуги Карпат простягання, яке майже збігається з простяганням ототожненої площини розриву. При цьому вісь стиску в механізмі вогнища спрямована на схід, що цілком узгоджується з північно-східним напрямом загальнорегіонального поля [3]. У [11] розроблено засади кількісного оцінювання напружено-деформованого стану порушеного масиву гірських порід як основи надання теоретичної оцінки розподілу природного імпульсного електромагнітного поля Землі, продемонстровано ідентичність результатів практичних геофізичних спостережень та розрахункових моделей напружено-деформованого стану. Врахування особливостей сейсмотектоніки зони зчленування Оашського та Закарпатського розломів буде сприяти уточненню оцінок характеристик та особливостей просторового розподілу природних геоекологічних, зокрема сейсмотектонічних, ризиків і небезпек у центральній частині Українського Закарпаття [14]. У [4] показано карту горизонтальних деформацій земної кори на території України за даними часових рядів координат ГНСС-станцій, побудовано карту горизонтальних зміщень ГНСС-станцій, де спостерігаємо різнонаправленість цих зміщень, що, швидше за все, спричинено наявністю сучасних субвертикальних і субгоризонтальних розломів та розломних зон. До ключових проблем сейсмічного моніторингу відноситься ідентифікація землетрусів і сигналів від джерел техногенного походження, виявлених мережею сейсмічних станцій. Енергетичні характеристики можуть бути використані для ідентифікації природи сейсмічних подій, а результати аналізу співвідношень дають змогу здійснювати оцінювання потужностей вибухів у тротиловому еквіваленті [16]. Отримані результати дослідження в [19] підтверджують наявність активних геодинамічних процесів у межах Карпат, оцінено основні деформаційні параметри (величину та напрямок осей деформацій, загальний зсув і дилатацію) в межах Карпат, що дає змогу аналізувати та прогнозувати сучасні геодинамічні процеси в регіоні, побудовано карти розподілу векторів абсолютних і регіональних горизонтальних швидкостей, загальних швидкостей зсуву, дилатації та швидкостей обертання. У результаті досліджень у [21] побудовано нові карти сучасних горизонтальних швидкостей зміщень верхнього шару земної кори України як єдиного регіону та вертикальних швидкостей зміщень ГНСС-станцій, показано, що сучасні горизонтальні рухи території України є складними та співвідносяться з відомою тектонічною будовою, їх також порівняно з регіональними модельними значеннями. У [17] проведено порівняння та пошук нових перспектив застосування електромагнітних явищ у прогнозі землетрусів та було вибрано діапазон ультранизьких частот (УНЧ). Установлено, що передвісники УНЧ можуть бути перед землетрусами, що досягають глибин до 30 км, який можна вважати перспективним ефективним діапазоном виявлення передвісників землетрусів. Через зв'язок епіцентральних відстаней із глибинами землетрусів та їх магнітудами робилися спроби виявлення таких провісників на інші глибини. Аналіз просторово-часового розподілу місцевої сейсмічності та варіації параметрів атмосферних опадів у центральній частині Закарпаття у 2020 р. вказує на високий ступінь кореляції рядів геофізичних даних: підвищення величини кількості опадів супроводжується підвищенням величини кількості зареєстрованих місцевих землетрусів у регіоні, що підтверджує гідрологічний аспект сейсмотектонічних процесів у Закарпатському внутрішньому прогині. У зоні Оашського глибинного розлому спостерігається стиснення порід [5]. Активізація сейсмічності регіону спостерігається на фоні загального розширення порід, що відбувається за сталих вікових рухів кори. На сучасному етапі рухи кори перебувають у стані розширення порід, якщо така тенденція не зміниться, слід очікувати підвищення сейсмічності в регіоні [6]. Отримані у [2] результати геоелектромагнітних досліджень добре збігаються та доповнюють геотермічне районування, відповідають структурі літосфери за профілями ГСЗ та уявленню про сучасний геодинамічний розвиток надр.

За результатами інструментальних спостережень у 2021 р. на території України та суміжних держав відбулося більш ніж півтори сотні землетрусів, основна частина яких належить до глибокофокусної зони Вранча (Румунія), максимальна зафіксована магнітуда землетрусу становить М=4,6. Землетруси з територій інших суміжних держав мали локальний характер і суттєво не впливали на сейсмічність території України [1]. Результати, отримані в [22], мають наукове та практичне значення для вивчення впливу неприпливного атмосферного навантаження на значних територіях – підвищення точності опрацювання наземних геодезичних вимірів, зокрема високоточного нівелювання. За результатами представленої в [13] інтерпретації, сегмент земної кори під Закарпатським прогином обмежений з південного заходу розломом, який на поверхні простежується від зони П'єнінських скель і похило занурюється в південно-західному напрямку. Для території Закарпатського прогину вперше виділено регіональний та локальний складники геомагнітного поля, подано геолого-геофізичну характеристику та запропоновано їх тектонічну інтерпретацію [15].

У статті [27] підкреслюється сильна кореляція між іоносферними аномаліями та епіцентром землетрусу, на основі аналізу супутникових знімків і даних про зміщення землі за допомогою Sentinel підтверджується значне підняття землі – приблизно на 15 см після землетрусу, показуючи на реакції поверхні на сейсмічні події, що важливо для вдосконалення систем раннього попередження про землетруси та поглиблення нашого розуміння землетрусів. У роботі [28] показано, що незважаючи на низьку магнітуду землетрусу, було відмічено розриви поверхні, розрідження, зсуви та серйозні структурні пошкодження. Особливості цієї події пояснюються малою глибиною джерела землетрусу, а місцеві умови, включаючи геологію, геоморфологію та властивості ґрунту, сприяли наслідкам. Цей землетрус підкреслює важливість дослідження землетрусів середньої сили як інструменту для середньо- та довгострокового оцінювання ризику землетрусів і стійкості. Найпоширеніші схеми класифікації активних розломів у багатьох країнах або регіонах базуються на активності розломів, яка відображається головним

чином швидкістю ковзання розломів та інтервалом повторення розломів, а також часом останньої активації. Однак, визначаючи конкретні кількісні параметри різних рівнів активності розломів, необхідно всебічно враховувати відмінності в активності та віці розломів у досліджуваному регіоні, а також кількість і достовірність наявних даних із метою ефективної класифікації різних активних рівнів розломів [31]. У статті [29] показано, що підвищені викиди радону спостерігаються перед землетрусами, які зафіксовано по всьому світу. Аномальні радонові викиди з надр землі пов'язані із землетрусами й вважаються важливою сферою досліджень. Запропоновано фізичні моделі, аби зв'язати спостережувані радонові збурення з деформаціями, що відбуваються в земній корі перед майбутніми землетрусами.

У роботі [25] представлено результати дослідження сейсмічності та геоелектричної будови Східних Карпат. Після оцінення сейсмічності розроблено нові методи оброблення та аналізу сейсмічних даних, які дають змогу побудувати усереднену горизонтально-шарувату швидкісну модель земної кори в Карпатському регіоні України, простежити сейсмічно активні розломи та з більшою точністю локалізувати сейсмічні події як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямку. Для дослідження структури провідності під Східними Карпатами використовуються зібрані магнітоваріаційні та магнітотелуричні дані. У [23] показано, що площини розлому землетрусів земної кори відображають складні закономірності, пов'язані з локальними джерелами напружень, які збурюють регіональне поле. Відомо, що відсутність зсувного складника дає підстави вважати, що поле деформацій у Передкарпатті контролюється не транскордонними деформаціями вздовж основних розломів, які перетинають регіон, а процесами просідання та складчастості як механізмами зняття напружень у земній корі у відповідь на інтенсивні тектонічні процеси, що відбуваються під областю Вранча. Аналіз розподілу напружень і деформацій в активних орогенних середовищах має фундаментальне значення для розуміння механізмів, що визначають геодинамічну еволюцію й сейсмічність, особливо в складних орогенних середовищах. У цьому відношенні кількісне розуміння можна отримати шляхом поєднання великомасштабної геодинамічної еволюції з розбиттям локальних моделей деформацій і напружень, отриманих на основі аналізу характеру сейсмічності, розв'язків фокальної площини та кінематики генетично пов'язаних активних структур [24].

У [26] представлено результати аналізу іоносферних збурень, які були виявлені за 0–5 днів до та після головного поштовху землетрусу, аномальні збурення спостерігали від декількох діб до декілька годин до головного поштовху. Показано, що збурення залежать від відстані та напрямку від епіцентру. Загалом іоносферні збурення виявляються більшими після землетрусу в порівнянні їх до землетрусу. У Східних Карпатах, Південних Карпатах, Трансільванському басейні спостерігають рухи зі швидкістю 0,5–1,5 мм/рік. Неотектонічні структури добре узгоджуються з полем швидкостей деформації в Динаридах, Східних Альпах та в західній частині Паннонського басейну. Спостерігають стиснення з північного сходу на південний захід, Східні та Південні Карпати нині зазнають регіонального розширення з півночі на південь [30].

**Мета та завдання дослідження.** Мета дослідження – на основі комплексних геофізичних спостережень у Закарпатському внутрішньому прогині виявити зв'язки сейсмотектонічних процесів, геодинаміки регіону зі змінами метеорологічних та геофізичних полів. Об'єктом дослідження є сучасні горизонтальні рухи кори, часовий розподіл місцевої сейсмічності, часовий розподіл параметрів радіоактивного фону середовища, зокрема бета- та гама-випромінювання, варіації температури атмосферного повітря. Предметом дослідження є зв'язки між характеристиками сучасних горизонтальних рухів кори, місцевою сейсмічною активністю та параметрами радіоактивного фону середовища, сейсмотектонічними процесами та змінами температури повітря. Для досягнення вказаної мети необхідно розв'язання декількох завдань, а саме: дослідження зв'язку сучасних рухів кори та місцевої сейсмічності; вивчення зв'язку радіоактивного фону середовища з рухами кори та сейсмічністю; вивчення впливу метеорологічного стану на рухи кори, сейсмічність регіону та варіації радіоактивного фону середовища.

Методи та матеріали дослідження. Під час розв'язання поставлених у статті завдань авторами було застосовано методи розрахунку фізичних характеристик геомеханічних процесів, зокрема сучасних горизонтальних рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому; побудовано часові розподіли параметрів геофізичних полів; проведено розрахунок коефіцієнтів кореляційного аналізу; проведено порівняльний аналіз інтервалів часу, які характеризуються аномальними параметрами геофізичних полів. У роботі використано результати спостереження комплексу геофізичних полів на режимній геофізичній станції «Тросник» (с. Тросник, Берегівський район, Закарпатська область) та вимірювання сучасних горизонтальних рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому на пункті деформометричних спостережень «Королеве» (селище Королеве, Берегівський район, Закарпатська область) Відділу сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики імені С. І. Субботіна НАН України за 2023 рік.

Виклад основного матеріалу з обґрунтуванням отриманих наукових результатів. На території Закарпатського внутрішнього прогину створено Карпатський геодинамічний полігон, де тривалий період проводяться спостереження за змінами метеорологічного, гідрогеологічного, геодинамічного та сейсмічного станів. За результатами цих спостережень проведено дослідження їх взаємозв'язків з метою вивчення загальної картини сейсмотектонічних процесів, відгуку геофізичних полів на зміни геодинамічного та сейсмічного станів; впливу на результати спостережень факторів-завад, у даному випадку варіацій параметрів метеорологічного стану, зокрема температури повітря (рис. 1).



**Рис. 1.** Геофізичні, геодинамічні та сейсмологічні спостереження в Карпатському регіоні. Закарпатський внутрішній прогин, Оашський глибинний розлом

Відомо, що тектонічні процеси, геомеханічні рухи супроводжуються змінами фізичних характеристик гірських порід, що знаходять свій відгук у варіаціях параметрів різних геофізичних полів: магнітного поля Землі, електромагнітної емісії та радіоактивного фону середовища. Це проявляється в тому, що величини, які характеризують, зокрема, магнітне поле Землі, представлені аномальними величинами в інтервалах часу інтенсивних варіацій параметрів геодинамічного стану регіону. Найменш досліджено зв'язок параметрів радіоактивного фону середовища та геодинамічних процесів у верхніх шарах земної кори сейсмогенераційного регіону, процес розрядки напружено-деформованого стану порід через прояв місцевої сейсмічності. Розглянуто варіації параметрів радіоактивного фону середовища, зокрема бетавипромінювання в центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину, що виміряні на режимній геофізичній станції Карпатської дослідно-методичної геофізичної та сейсмологічної партії Відділу сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України у 2023 р. Побудовано часовий розподіл бета-випромінювання за січень 2023 р. на РГС «Тросник» (рис. 2).



**Рис. 2.** Радіоактивний фон середовища (бета-випромінювання). Закарпатський внутрішній прогин. Січень 2023 р.

Аналіз кривої залежності радіоактивного фону в січні 2023 р. показує, що коливання величини бета-випромінювання характеризується періодичністю, яка варіює в межах від 2 до 6 діб із переважанням тридобових коливань. Амплітуда коливання радіоактивного фону середовища змінюється від 1,25 мк Р/год у другій половині місяця до 7,5 мкР/год. Середня величина радіоактивного фону (бета-випромінювання) за січень 2023 р. становить 0,01266 мР/год (12,66 мкР/год). Побудовано часовий розподіл радіоактивного фону (складник: гама-випромінювання), виміряного на РГС «Тросник» у січні 2023 р. (рис. 3).



**Рис. 3.** Варіації гама-випромінювання в січні 2023 р., виміряні на РГС «Тросник». Закарпатський внутрішній прогин

Середня величина радіоактивного фону (гама-випромінювання) за січень 2023 р. становить 0,01702 мР/год (17,02 мкР/год). Періоди коливань величини гама-випромінювання в січні 2023 р. змінюються в межах від 3 до 7 діб, переважають коливання з періодами 3–4 доби.

Амплітуди коливання спостережуваної величини змінюються від 0,00375 мР/год (3,75 мкР/год) до 0,00625 мР/год (6,25 мкР/год). Проведено розрахунок ступеня кореляції бета-та гама-випромінювання за січень 2023 р., який становить 0,2. На території Закарпаття, починаючи з 80-х років минулого століття, проводяться деформометричні спостереження спочатку на деформометричній станції «Берегове-1», яка функціонувала в штольні на г. Мужіївській біля с. Мужієве (Берегівський район, Закарпатська область). У 1989 р. в штольні на режимній геофізичній станції «Берегове» було змонтовано два взаємно перпендикулярні кварцові деформографи, базами 6,5 м та 24,5 м. Орієнтація цих приладів установлена паралельно Карпатам та перпендикулярно до їх простягання в зоні Закарпатського внутрішнього прогину. Проведені дослідження привели до таких висновків: відбувається стиснення в широтному напрямку та розширення в меридіональному. Результати, отримані на деформометричній станції «Берегове-1» (с. Мужієве, Берегівський район, Закарпатська область), підтвердилися результатами деформометричних спостережень на деформометричній станції «Берегове-2» в РГС «Берегове» (м. Берегове, Берегівський район, Закарпатська область). Через демонтаж деформометричної станції «Берегове-1» її було перенесено в штольню Замкової гори в с. Королеве (Берегівський район, Закарпатська область) і змонтовано в 1998 р. Результати, отримані в перші роки спостережень, показали на особливості сучасних горизонтальних рухів кори, а саме інтенсивне розширення в широтному напрямку [12]. Проведено дослідження зміщення рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому за 2023 рік, було розраховано їх кінематичні та динамічні характеристики сучасних горизонтальних рухів кори. На рис. 4 показано часовий розподіл динаміки зміщення в сучасних горизонтальних рухах у центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину в січні 2023 р.



Рис. 4. Прискорення рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому в січні 2023 р.

Зміщення рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому в січні 2023 р. представлено розширеннями кори величиною 8,14 мкм (деформація кори при цьому становить 332 нстр (нанострейн,х10-9). Періоди коливання прискорення рухів кори змінюються від 2 діб до 5 діб, переважають 2–3-добові періоди. Амплітуди коливання прискорення варіюють у межах від 0,138 мкм до 0,345 мкм. Розглянуто зв'язки між температурою повітря та динамікою сучасних рухів кори за досліджуваний період (рис. 5).

Температура повітря на пункті спостереження має тенденцію до спадання. Періоди коливання температури повітря змінюються від 2 діб до 8 діб. Порівняння кривих на рис. 5 дає підстави припустити, що температура повітря має особливий вплив на рухи кори в регіоні, це можна відзначити, якщо криві температури повітря змістити на 1–2 доби. Згідно з фізикою процесу підняття температури повітря через деякий період повинно супроводжуватися розширеннями порід, і навпаки – зменшення температури повітря повинно приводити до стиснення порід. Проведено розрахунок ступеня кореляції прискорення рухів кори та температури пові-



**Рис. 5.** Варіація середньодобової температури повітря на РГС «Тросник» (крива коричневого кольору), прискорення рухів кори (крива синього кольору). Січень 2023 р.

тря, який становить 0,1. За зміщення рядів спостереження на декілька діб розрахований коефіцієнт кореляції становить 0,3. Таким чином, температура повітря має певний вплив на фізичні параметри гірських порід. Розглянуто результати геофізичних спостережень у центральній частині Закарпаття (рис. 6).



**Рис. 6.** Геофізичні спостереження в Закарпатському внутрішньому прогині: прискорення рухів кори (крива синього кольору), радіоактивний фон бета-випромінювання (крива жовтого кольору), середньодобова температура повітря (крива коричневого кольору). Січень 2023 р.

Розглянуто зв'язок прискорення рухів кори та радіоактивного фону середовища в регіоні. Прискорення рухів кори, що відповідає за стиснення порід, супроводжується підвищеними величинами радіоактивного фону, зокрема бета-випромінювання. Розраховано кореляційний зв'язок між прискореннями рухів кори та радіоактивного фону середовища, яке становить 0,2. Проведено розрахунок прискорення рухів кори та радіоактивного фону середовища за зміщення рядів на 2 доби, який дорівнює 0,2. Проаналізовано варіації температури повітря та радіоактивного фону середовища: ступінь кореляції становить 0,3, якщо проведено зміщення рядів спостереження на 2 доби. Таким чином, температура повітря має зв'язок із радіоактивним фоном середовища. Фактором, який характеризує сейсмотектонічні процеси, є сейсмічність регіону. Закарпаття – сейсмічний регіон, де реєструють місцеві як сильні, так і слабкі підземні поштовхи. Протягом року сейсмічна активність на території Закарпатського внутрішнього прогину представляється серією відчутних місцевих землетрусів, кількість яких варіює в межах 1–6 підземних поштовхів. Також протягом року сейсмічними станціями регіону реєструються

біля двох сотень незначних місцевих землетрусів, магнітудою менше 3. Індикаторами підвищення сейсмічності регіону є не тільки рої місцевих землетрусів, а й сильніші, відчутні поштовхи. Періодичність місцевих сильних землетрусів становить  $100\pm30$  років, останній сильний землетрус відбувся в 1908 р. поблизу м. Свалява (Закарпаття). Ймовірність прояву сильного землетрусу зростає, тому важливо продовження вивчення як сейсмічності регіону, так і процесів, що його викликають, геодинамічних процесів. Важливе значення у вивченні сейсмотектонічних процесів мають дослідження реакції геофізичних полів на всі геологічні процеси в екологічно небезпечному регіоні. Відомості про сейсмічну ситуацію взято із сейсмологічних бюлетенів, підготовлених Відділом сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України. Протягом січня 2023 р. в Карпатському регіоні відбулися 6 місцевих землетрусів: 01.01.2023 р. в Хмельницькій області, Чернівецькій області, 03.01.2023 р. зареєстровано землетрус у Закарпатській області, с. Довге, 04.01.2023 р. відбувся повторний землетрус у с. Довге, 21.01.2023 р. – землетрус у Чернівецькій області, 23.01.2023 р. відбувся землетрус у Вінницькій області. На рис. 7 представлено часовий розподіл місцевої сейсмічності в січні 2023 р. в Карпатському регіоні.



**Рис.** 7. Геодинамічний стан регіону: прискорення рухів кори (крива жовтого кольору), радіоактивний фон середовища (крива сірого кольору), температура повітря (крива коричневого кольору), сейсмічність регіону (діаграма синього кольору). Січень 2023 р. Карпатський регіон

Аналіз комплексного графіку, який наведено на рис. 6, показує на зв'язки геофізичних полів із сейсмотектонічними процесами в регіоні. Сейсмічність у цей період представлена серією місцевих землетрусів у першій та третій декаді місяця. Землетруси в більшості випадків відбуваються в моменти, коли земна кора інтенсивно стискається, або після процесу стиснення порід. Розраховано коефіцієнт кореляції, який становить 0,11. Розглянуто сейсмічність і температуру повітря: більшу частину поштовхів реєструють у періоди підвищення температури повітря, яке підігріває верхні шари земної кори, викликаючи розширення порід. Ступінь зв'язку (коефіцієнт кореляції температури повітря та сейсмічності) дорівнює 0,1. Сейсмічність регіону та варіації радіоактивного фону середовища: на початку місяця землетруси відбуваються в моменти низького радіоактивного фону середовища, в третій декаді місяця землетруси та підвищений радіоактивний фон середовища лежать в одних інтервалах часу. Таким чином, отримані результати вказують на вплив метеорологічних параметрів на рухи кори, місцеву сейсмічність і радіоактивний фон середовища.

Гама-випромінювання та геодинамічний стан регіону. Розглянуто часові розподіли гамавипромінювання та комплексу геофізичних і метеорологічних спостережень: деформацій земної кори, варіацій температури повітря та місцевої сейсмічності (рис. 8).



**Рис. 8.** Геофізичні поля: гама-випромінювання (крива синього кольору), сейсмічність регіону (крива коричневого кольору), температура повітря (крива сірого кольору); геодинаміка регіону, прискорення рухів кори (крива жовтого кольору). Січень 2023 р., Карпатський регіон

Досліджено зміни радіоактивного фону (гама-випромінювання) та, відповідно, сучасні рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому, температури повітря, місцевої сейсмічності. Рухи кори супроводжуються змінами їх фізичних властивостей, що впливають на зміни досліджуваних геофізичних полів, на екологічний стан регіону. Геофізичні поля в цьому випадку розглядаються як один із наслідків таких змін, проте важливо усвідомити також вплив певних умов, зокрема метеорологічних, на варіації геофізичних полів. Тому також актуально вивчити саме частку впливу тих чи інших умов, визначивши їх пріоритетні впливи. Радіоактивний фон (гама-випромінювання) та зміни температури повітря в точці спостереження: зменшення температури повітря (вимірювання проводяться на висоті 2 м) певним чином впливає на земну поверхню, викликаючи стиснення породи, що своєю чергою супроводжується підвищеннями величин радіоактивного фону середовища. Це можна спостерігати на комплексному графіку (рис. 8). Розраховано ступінь кореляції радіоактивного фону та варіації температури атмосферного повітря, який становить 0,3. Вивчено варіації радіоактивного фону середовища та прискорення рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому: важливо вказати на те, що радіоактивний фон реагує на рухи кори обох знаків, як стиснення, так і розширення порід. Розраховано ступінь кореляції цих полів, що становить 0,2. Проаналізовано, чи є який-небудь зв'язок між радіоактивним фоном (гама-випромінювання) і проявом місцевої сейсмічності: виявлено особливості їх часових розподілів. Сейсмічність Карпатського регіону в часовому розподілі супроводжує радіоактивний фон середовища як за його мінімальних, так і максимальних величин. Ступінь кореляції при цьому становить 0,2, що підтверджує наведені висновки.

Висновки. Проведені дослідження геодинамічного та сейсмічного стану в Карпатському регіоні в 2023 р. приводять до таких висновків: відмічено загальне розширення порід, зокрема в січні 2023 р. воно представлене величиною +8 мкм (деформація кори при цьому становить +332 нстр(x10-9). У 2023 р. в Карпатському регіоні зареєстровано 183 підземних поштовхи, в січні місяці сейсмічність представлена 6 місцевими землетрусами, 2 землетруси відбулися в Закарпатті, поблизу с. Довге, магнітуди яких дорівнювали, відповідно, 1,9 та 1,5. Землетруси відбуваються в часових інтервалах, коли спостерігаються інтенсивні рухи кори, зокрема в разі стиснення порід, що підтверджується варіаціями розрахованих величин прискорення геомеханічних рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому. Розглянуто варіації радіоактивного фону середовища у 2023 р. в центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину, зафіксовано особливості часового розподілу спостережуваних параметрів. Показано зміни метеорологічного стану середовища, зокрема температури атмосферного повітря на режимній станції «Тросник». Досліджено зв'язки метеорологічного стану середовища та варіацій радіоактивного фону середовица: бета- та гама-випромінювання, розраховано ступені кореляції цих параметрів. Показано варіації радіоактивного фону середовища та місцевої сейсмічності в досліджуваний період, проаналізовано їх зв'язок. Таким чином, сучасні рухи кори супроводжуються відгуком радіоактивного фону середовища, проявом місцевої сейсмічності, відзначається метеорологічний аспект сейсмотектонічних процесів.

**Новизна дослідження.** У статті розглянуто аналіз геодинамічного та сейсмічного стану в Карпатському регіоні, вперше досліджено зв'язки між динамікою рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому, часовим розподілом місцевої сейсмічності, відгуком на ці процеси радіоактивного фону середовища за 2023 р.: інтенсивні рухи кори, сейсмічна активність та аномальні варіації параметрів геофізичних полів об'єднані в одні часові інтервали. Показано вплив температури атмосферного повітря середовища на геофізичні та геологічні процеси в досліджуваному регіоні.

### Список використаних джерел:

- 1. Національний сейсмологічний бюлетень України за 2021 р. / Ю. Андрущенко та ін. *Геофізичний жур*нал. 2022. № 44 (6). С. 162–180. DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v44i6.273649
- 2. Бурахович Т., Кушнір А., Ільєнко В. Сучасні геоелектромагнітні дослідження Українських Карпат. *Геофізичний журнал.* 2022. № 44 (3). С. 21–43. DOI: https://doi.org/10.24028/ gj.v44i3.261966
- 3. Гнип А. Визначення різницевих координат і механізму вогнища землетрусів поблизу с. Тросник у Закарпатті протягом 2013–2015 рр.: Методичні аспекти та аналіз результатів. *Геодинаміка*. 2022. № 2 (33). С. 50–63. DOI: https://doi.org/10.23939/jgd2022.02.050
- 4. Доскіч С., Савчук С., Джуман Б. Визначення горизонтальних деформації земної поверхні території України за даними ГНСС вимірів. *Геодинаміка*. 2023. № 2 (35). С. 89–98. DOI: https://doi.org/10.23939/ jgd2023.02.089
- 5. Моніторинг сейсмотектонічних процесів у Закарпатському внутрішньому прогині за результатами комплексних геофізичних спостережень / В. Ігнатишин та ін. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. *Геологія*. 2022. № 3 (98). С. 42–48. DOI: https://doi.org/10.17721/1728-2713.98.05
- 6. Геодинамічний стан Закарпатського внутрішнього прогину за результатами деформометричних спостережень в регіоні / В. Ігнатишин та ін. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. *Геологія.* 2024. № 1 (104). С. 13–21. DOI: https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.02
- 7. Метеорологічний аспект геодинамічного стану Закарпатського внутрішнього прогину за 2021 рік / В. Ігнатишин та ін. *Acta Academiae Beregsasiensis : Geographica et Recreatio*. 2024. № 1. С. 32–47.
- 8. Ігнатишин В.В., Іжак Т.Й., Молнар Д.С.С. Радіоактивний фон середовища та сучасні рухи кори в Закарпатському внутрішньому прогині: сейсмічний аспект. *Acta Academiae Beregsasiensis : Geographica et Recreatio*. 2024. № 2. С. 58–68.
- 9. Дослідження змін параметрів магнітного поля та поля деформацій у сейсмонебезпечних регіонах / В. Ігнатишин та ін. *Acta Academiae Beregsasiensis : Geographica Et Recreatio*. 2024. № 3. С. 48–58. DOI: https://doi.org/10.32782/2786-5843/2024-3-6
- 10. Ігнатишин В.В., Іжак Т.Й., Молнар Д.С.С. Електромагнітна емісія середовища як реакція на сейсмотектонічні процеси в сейсмогенерувальних регіонах. *Acta Academiae Beregsasiensis : Geographica Et Recreatio*. 2024. № 4. С. 17–26. DOI: https://doi.org/10.32782/2786-5843/2024-4-2
- 11. Відображення розподілу механічних напруг в гірничих масивах у динаміці інтенсивності природного імпульсного електромагнітного поля Землі / Е. Кузьменко та ін. *Геодинаміка*. 2022. № 2 (33). С. 64–77. DOI: https://doi.org/10.23939/jgd2022.02.065
- 12. Малицький Д., Ігнатишин В., Коваль Ю. Деформометричні дослідження в зоні Оашського розлому Закарпаття за результатами режимних спостережень на РГС «Тросник», «Королево та «Берегово». Вісник КНУ ім. Тараса Шевченка. Серія геологія. 2012. Вип. 59. С. 15–17.
- 13. Закарпатський прогин: дослідження зон зниженої швидкості у земній корі за даними регіональних сейсмічних профілів / А. Муровська та ін. *Геофізичний журнал.* 2023. № 45 (2). С. 30–43. DOI: https://doi.org/10.24028/ gj.v45i2.278310
- 14. Сейсмотектоніка зони перетину Оашського і Закарпатського глибинних розломів (Українське Закарпаття) / А. Назаревич та ін. *Геодинаміка*. 2022. № 2 (33). С. 99–114. DOI: https://doi.org/10.23939/ jgd2022.02.100

- 15. Геомагнітне поле Українських Карпат та 3D магнітна модель Закарпатського прогину / М. Орлюк та ін. *Геофізичний журнал.* 2023. № 45 (4). С. 20-42. DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v45i4.286284
- 16. Осадчий В., Андрущенко Ю., Лящук О. Ідентифікація природних та техногенних сейсмічних подій за енергетичними характеристиками. *Геодинаміка*. 2023. № 2 (35). С. 99–105. DOI: https://doi.org/10.23939/ jgd2023.02.099
- 17. Пирієв Р. Огляд електромагнітних моніторингових досліджень у прогнозі землетрусів: останні результати та нові перспективи. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. *Геологія.* 2022. № 1 (96). С. 40–45. DOI: https://doi.org/10.17721/1728-2713.96.06
- 18. Савчин I. Визначення сучасних ротаційних параметрів основних тектонічних плит на основі ГНССданих. *Геодинаміка*. 2022. № 2 (33). С. 17–27. DOI: https://doi.org/10.23939/ jgd2022.02.017
- 19. Савчин I., Білащук А. Сучасні рухи земної поверхні Карпатської гірської системи за даними ГНСС. Геодинаміка. 2024. № 2 (37). С. 5–15. DOI: https://doi.org/10.23939/jgd2024.02.005
- 20. Третяк К., Брусак I. Сучасні деформації земної кори території Заходу України за даними ГНСС мережі «GEOTERRACE». *Геодинаміка*. 2022. № 1 (32). С. 16–25. DOI: https://doi.org/10.23939/jgd2022.02.016
- 21. Третяк К., Брусак I., Бабченко В. Сучасні деформації земної кори території України за даними ГНСС-мереж GEOTERRACE ТА SYSTEM.NET. *Геодинаміка*. 2024. № 2 (38). С. 56–69. DOI: https://doi.org/10.23939/jgd2024.02.056
- 22. Третяк К., Кухтар Д. Застосування радарних інтерферометричних знімків Sentinel-1 для моніторингу вертикальних зміщень земної поверхні, викликаних неприпливним атмосферним навантаженням. *Геофізичний журнал.* 2023. № 45 (1). С. 87–101. DOI: https://doi.org/10.24028/ gj.v45i1.275180
- Bala A., Toma-Danila D. Radulian M. Focal mechanisms in Romania: statistical features representative for earthquake-prone areas and spatial correlations with tectonic provinces. *Acta Geod. Geophys.* 2019. Vol. 54. P. 263–286. DOI: https://doi.org/10.1007/s40328-019-00260-w
- 24. Bala A., Radulian M., Toma-Danila, D. Crustal stress partitioning in the complex seismic active areas of Romania. *Acta Geod. Geophys.* 2020. Vol. 55. P. 389–403. DOI: https://doi.org/10.1007/s40328-020-00299-0
- 25. Kováčiková S., Logvinov I., Nazarevych A. et al. Seismic activity and deep conductivity structure of the Eastern Carpathians. *Stud. Geophys. Geod.* 2016. Vol. 60. P. 280–296. DOI: https://doi.org/10.1007/s11200-014-0942-y
- 26. Kumar S., Tripathi G., Kumar P. et al. Ionospheric perturbations observed due to Indonesian Earthquake (Mw=7.4) using GPS and VLF measurements at multi-stations. *Acta Geod. Geophys.* 2021. Vol. 56. P. 559–577. DOI: https://doi.org/10.1007/s40328-021-00345-5
- Nayak K., López-Urías C., Romero-Andrade R., Sharma G., Guzmán-Acevedo G. M., Trejo-Soto, M. E. Ionospheric Total Electron Content (TEC) Anomalies as Earthquake Precursors: Unveiling the Geophysical Connection Leading to the 2023 Moroccan 6.8 Mw Earthquake. *Geosciences*. 2023. Vol. 13 (11). P. 319. DOI: https://doi.org/10.3390/geosciences13110319
- Perez J.S., Llamas D.C.E., Buha D J'.L., Constantino R.C.C., Legaspi C.J.M., Lagunsad K.D.B., Grutas R.N., Quimson M.M.Y. Impacts of a Moderate-Sized Earthquake: The 2023 Magnitude (Mw) 4.7 Leyte, Leyte Earthquake, Philippines. *Geosciences*. 2024. Vol. 14 (3). P. 61. DOI: https://doi.org/10.3390/ geosciences14030061
- 29. Petraki E, Nikolopoulos D., Panagiotaras D., Cantzos D., Yannakopoulos P., et al. Radon-222: A Potential Short-Term Earthquake Precursor. J. Earth. Sci. Clim. Change. 2015 Vol. 6. P. 282. DOI:10.4172/2157-7617.1000282
- Porkoláb K., Broerse T., Kenyeres A. et al. Active tectonics of the Circum-Pannonian region in the light of updated GNSS network data. *Acta Geod. Geophys.* 2023. Vol. 58. P. 149–173. DOI: https://doi.org/10.1007/ s40328-023-00409-8
- 31. Wu Z., Hu, M. Definitions, Classification Schemes for Active Faults, and Their Application. *Geosciences*. 2024. Vol. 14 (3). P. 68. DOI: https://doi.org/10.3390/geosciences14030068

#### **References:**

- Andrushchenko, Y., Lyashchuk, O., Farfulyak, L., Amashukeli, T., Ganiev, O., Osadchyi, V., Petrenko, K., & Verbytskyi, S. (2022). National Seismological Bulletin of Ukraine for 2021. *Geophysical Journal*, 44(6), 162–180. https://doi.org/10.24028/gj.v44i6.273649. [in Ukrainian].
- 2. Burakhovych, T., Kushnir, A., & Ilienko, V. (2022). Modern geoelectromagnetic studies of the Ukrainian Carpathians. *Geophysical Journal*, 44(3), 21–43. https://doi.org/10.24028/gj.v44i3. 261966. [in Ukrainian].

- 3. Gnip, A. (2022). Determination of difference coordinates and focal mechanism of earthquakes near the village of Trosnyk in Transcarpathia during 2013-2015: Methodological aspects and analysis of results. *Geodynamics*, 2(33), 50–63. https://doi.org/10.23939/jgd2022.02.050. [in Ukrainian].
- 4. Doskich, S., Savchuk, S., & Dzhuman, B. (2023). Determination of horizontal deformations of the earth's surface of the territory of Ukraine according to GNSS measurements. *Geodynamics*, 2(35), 89–98. https://doi.org/10.23939/jgd2023.02.089. [in Ukrainian].
- Ihnatyshyn, V., Malytskyi, D., Izhak, T., Ihnatyshyn, M., & Ihnatyshyn, A. (2022). Monitoring of seismotectonic processes in the Transcarpathian internal trough based on the results of complex geophysical observations. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(98), 42–48. https://doi.org/10.17721/1728-2713.98.05. [in Ukrainian].
- 6. Ihnatyshyn, V., Malytskyi, D., Izhak, T., Molnar D., Ihnatyshyn, M., & Ihnatyshyn, A (2024). Geodynamic state of the Transcarpathian internal trough based on the results of deformometric observations in the region. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 1*(104), 13–21. https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.02. [in Ukrainian].
- 7. Ihnatyshyn, Vasyl, Izhak, Tibor, Molnar D, S., Ratz Adalbert. (2024). Meteorological aspect of the geodynamic state of the Transcarpathian internal trough for 2021. *Acta Academiae Beregsasiensis Geographica et Recreatio*, *1*, 32-47. [in Ukrainian].
- 8. Ignatyshyn, V.V., Izhak, T.I., & Molnar D, S.S. (2024). Radioactive background of the environment and modern crustal movements in the Transcarpathian internal trough: seismic aspect. *Acta Academiae Beregsasiensis Geographica et Recreatio*, *2*, 58–68. [in Ukrainian].
- 9. Ignatyshyn, V.V., Malytskyi, D.V., Izhak, T., Molnar D, S., Ratz, A., & Ignatyshyn, A.V. (2024). Study of changes in the parameters of the magnetic field and the deformation field in seismically hazardous regions. *Acta Academiae Beregsasiensis: Geographica Et Recreatio*, *3*, 48–58. https://doi.org/10.32782/2786-5843/2024-3-6 [in Ukrainian].
- 10. Ignatyshyn, V.V., Izhak, T.J., & Molnar D, S. (2024). Electromagnetic emission of the environment as a response to seismotectonic processes in seismogenerating regions. *Acta Academiae Beregsasiensis: Geographica Et Recreatio, 4,* 17–26. https://doi.org/10.32782/2786-5843/2024-4-2 [in Ukrainian].
- Kuzmenko, E., Bagriy, S., Artim, I., & Artim, V. (2022). Reflection of the distribution of mechanical stresses in rock masses in the dynamics of the intensity of the Earth's natural pulsed electromagnetic field. *Geodynamics*, 2(33), 64–77. https://doi.org/10.23939/jgd2022.02.065 [in Ukrainian].
- 12. Malytskyi, D., Ihnatyshyn, V., & Koval, Yu. (2012). Deformometric studies in the Oash Fault zone of Transcarpathia based on the results of routine observations at the Trosnyk, Korolevo and Berehove geophysical stations. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series Geology, 59*, 15–17. [in Ukrainian].
- 13. Murovska, A., Verpakhovska, O., Hnylko, O., Chorna, O., & Egorova, T. (2023). Transcarpathian trough: study of zones of reduced velocity in the Earth's crust based on regional seismic profiles. *Geophysical Journal*, 45(2), 30–43. https://doi.org/10.24028/gj.v45i2.278310. [in Ukrainian].
- 14. Nazarevich, A., Nazarevich, L., Bayrak, G., & Pirozhok, N. (2022). Seismotectonics of the zone of intersection of the Oash and Zakarpattya deep faults (Ukrainian Transcarpathia). *Geodynamics*, 2(33), 99–114. https://doi.org/10.23939/jgd2022.02.100. [in Ukrainian].
- 15. Orlyuk, M., Bakarzhieva, M., Marchenko, A., Shestopalova, O., & Drukarenko, V. (2023). Geomagnetic field of the Ukrainian Carpathians and 3D magnetic model of the Transcarpathian trough. *Geophysical Journal*, *45*(4), 20–42. https://doi.org/10.24028/gj.v45i4.286284. [in Ukrainian].
- Osadchyi, V., Andrushchenko, Y., & Lyashchuk, O. (2023). Identification of natural and man-made seismic events by energy characteristics. *Geodynamics*, 2(35), 99–105. https://doi.org/10.23939/jgd2023.02.099. [in Ukrainian].
- 17. Piriev, R. (2022). Review of electromagnetic monitoring studies in earthquake forecasting: recent results and new perspectives. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 1*(96), 40–45. https://doi.org/10.17721/1728-2713.96.06. [in Ukrainian].
- 18. Savchyn, I. (2022). Determination of modern rotational parameters of the main tectonic plates on the basis of GNSS data. *Geodynamics*, 2(33), 17–27. https://doi.org/10.23939/jgd2022.02.017 [in Ukrainian].
- 19. Savchyn, I., & Bilashchuk, A. (2024). Modern movements of the earth's surface of the Carpathian mountain system according to GNSS data. *Geodynamics*, 2(37), 5–15. https://doi.org/ 10.23939/jgd2024.02.005. [in Ukrainian].

- 20. Tretiak, K., & Brusak, I. (2022). Modern deformations of the earth's crust of the territory of Western Ukraine according to GNSS data of the GEOTERRACE network. *Geodynamics*, 1(32), 16–25. https://doi.org/10.23939/jgd2022.02.016. [in Ukrainian].
- 21. Tretiak, K., Brusak, I., & Babchenko, V. (2024). Modern deformations of the earth's crust of the territory of Ukraine according to GNSS networks GEOTERRACE and SYSTEM.NET. *Geodynamics*, 2(37), 56–69. https://doi.org/10.23939/jgd2024.02.056. [in Ukrainian].
- 22. Tretiak, K., & Kukhtar, D. (2023). Application of Sentinel-1 radar interferometric images for monitoring vertical displacements of the earth's surface caused by non-tidal atmospheric load. *Geophysical Journal*, 45(1), 87–101. DOI: https://doi.org/10.24028/gj.v45i1.275180. [in Ukrainian].
- 23. Bala, A., Toma-Danila, D. & Radulian, M. (2019). Focal mechanisms in Romania: statistical features representative for earthquake-prone areas and spatial correlations with tectonic provinces. *Acta Geod. Geophys.*, *54*, 263–286. https://doi.org/10.1007/s40328-019-00260-w.
- 24. Bala, A., Radulian, M. & Toma-Danila, D. (2020). Crustal stress partitioning in the complex seismic active areas of Romania. *Acta Geod. Geophys.*, *55*, 389–403. https://doi.org/10.1007/s40328-020-00299-0.
- 25. Kováčiková, S., Logvinov, I., Nazarevych, A. et al. (2016). Seismic activity and deep conductivity structure of the Eastern Carpathians. *Stud. Geophys. Geod.*, 60, 280–296. https://doi.org/10.1007/s11200-014-0942-y.
- 26. Kumar, S., Tripathi, G., Kumar, P. et al. (2021). Ionospheric perturbations observed due to Indonesian Earthquake (Mw=7.4) using GPS and VLF measurements at multi-stations. *Acta Geod. Geophys., 56,* 559–577. https://doi.org/10.1007/s40328-021-00345-5.
- Nayak, K., López-Urías, C., Romero-Andrade, R., Sharma, G., Guzmán-Acevedo, G.M., & Trejo-Soto, M.E. (2023). Ionospheric Total Electron Content (TEC) Anomalies as Earthquake Precursors: Unveiling the Geophysical Connection Leading to the 2023 Moroccan 6.8 Mw Earthquake. *Geosciences*, 13(11), 319. https://doi.org/10.3390/geosciences13110319.
- Perez, J.S., Llamas, D.C.E., Buhay, D.J.L., Constantino, R.C.C., Legaspi, C.J.M., Lagunsad, K.D.B., Grutas, R.N., & Quimson, M.M.Y. (2024). Impacts of a Moderate-Sized Earthquake: The 2023 Magnitude (M<sub>w</sub>) 4.7 Leyte, Leyte Earthquake, Philippines. Geosciences, 14(3), 61. https://doi.org/10.3390/geosciences14030061.
- 29. Petraki, E., Nikolopoulos, D., Panagiotaras, D., Cantzos, D., Yannakopoulos, P. et al. (2015). Radon-222: A Potential Short-Term Earthquake Precursor. *J. Earth Sci. Clim. Change, 6*, 282. 10.4172/2157-7617.1000282.
- 30. Porkoláb, K., Broerse, T., Kenyeres, A. et al. (2023). Active tectonics of the Circum-Pannonian region in the light of updated GNSS network data. *Acta Geod. Geophys.*, 58, 149–173. https://doi.org/10.1007/s40328-023-00409-8.
- 31. Wu, Z., & Hu, M. (2024). Definitions, Classification Schemes for Active Faults, and Their Application. *Geosciences*, 14(3), 68. https://doi.org/10.3390/geosciences14030068.