

УДК 550.34

**Л. Є. НАЗАРЕВИЧ**, канд. геол. наук, науковий співробітник (Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, відділ сейсмічності Карпатського регіону), nazarevych.L@gmail.com, ORCID-0000-0001-8038-9535,

**А. В. НАЗАРЕВИЧ**, канд. фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник (Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України), nazarevych.a@gmail.com, ORCID-0000-0002-1989-0790

# СЕЙСМОГЕОДИНАМІЧНА АКТИВІЗАЦІЯ НАФТОГАЗОНОСНИХ РАЙОНІВ ПЕРЕДКАРПАТСЬКОГО ПРОГИНУ (Долина, Надвірна, Борислав)

Простежено сучасну сейсмічну активізацію основних нафтогазоносних районів Передкарпатського прогину – Долини (1974–1976 рр.), Надвірної (1996–2013 рр.) і Борислава (2014–2017 рр.), яка, очевидно, є додатково техногенно спровокованою (наведеною). Уточнено локалізацію вогнищ досліджуваних землетрусів, досліджено напрями спорювання розривів у вогнищах сильніших з них, оцінено величини розривів та інші параметри цих вогнищ, створено просторові моделі сейсмічної активності основних сейсмогенних структур.

**Ключові слова:** сейсмічність, землетрус, магнітуда, розлом, Передкарпатський прогин, поклади нафти й газу.

**L. Ye. Nazarevych**, Candidate of Geological Sciences, researcher (S. I. Subbotin name Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, Department of seismicity of the Carpathian region), nazarevych.L@gmail.com, ORCID-0000-0001-8038-9535, **A. V. Nazarevych**, Candidate in Physics and Mathematics (Geophysics), senior researcher (Carpathian Branch of S. I. Subbotin name Institute of Geophysics of NAS of Ukraine), nazarevych.a@gmail.com, ORCID-0000-0002-1989-0790

SEISMOGEO-DYNAMIC ACTIVATION OF OIL AND GAS AREAS OF PRE-CARPATHIAN FOREDEEP (Dolyna, Nadvirna, Boryslav)

The modern seismic activation of the main oil and gas areas of the Pre-Carpathian foredeep – Dolyna (1974–1976), Nadvirna (1996–2013) and Boryslav (2014–2017) was traced. The refinement of the location of the studied earthquakes courses is carried out on the regional travel time tables and the method of residuals minimizing. The directions of ruptures breaking in the foci of the stronger ones were studied, the ruptures lengths and other parameters of these courses were estimated. The spatial models of seismic activity of the main seismogenic structures in these areas have been constructed. It has been established that most of the earthquakes courses tend to transverse faults of the anti-Carpathian (northeastern) direction (in the zones of their intersection with the Precarpathian deep fault), which cross or limit the oil and gas structures, part of the courses tend to the ones available here thrusts and folds of different depth. Taking into account the long-lasting (starting from the 19th century) active production of oil and gas condensate here the local seismicity, obviously, is additionally technogenically provoked (induced).

**Keywords:** seismicity, earthquake, magnitude, fault, Pre-Carpathian foredeep, oil and gas deposits.

**Вступ.** В останні десятиріччя геологи-нафтогазорозвідники стали приділяти більше уваги питанням сейсмічності територій, де активно розробляють поклади нафти й газу [10, 17, 18]. Причиною цього стало значне зростання сейсмічної активності в багатьох таких районах, зокрема, катастрофічні землетруси в районі Газлійського газового родовища (Середня Азія) у 1976 і 1984 рр. з магнітудою  $M$  6,8 і 7,3 відповідно, а також Нефтегорський землетрус 1995 р. з  $M=7,2$  (о. Сахалін). Дуже зросла сейсмічна активність у низці районів видобутку сланцевої нафти й газу [17, 18], де інтенсивно використовують методику гідророзриву пласта, зокрема, у штаті Оклахома (США), у Ботсвані (Африка). Подібно й у Передкарпатті 1976 року в районі нафтопромислів м. Долини відбулося кілька відчутних (з  $I=5-6$  балів) землетрусів [6]. У районі газового родовища Лопушна (Покутсько-Буковинські Карпати) у перші півроку експлуатації (1986 р.), імовірно, через тектонічні рухи, вийшли з ладу через зрізування й змінання обсадних колон декілька свердловин. За даними ряду вчених (зокрема, Ніколаєв, 1995 р.) причиною цих землетрусів стало активне видобування вуглеводнів. Такі землетруси виникають тоді, коли родовища розробляють без урахування рівня тектонічних напружень і це може слугувати спусковим механізмом для збудження індукованої сейсмічності [10, 17, 18].

За даними проведених досліджень ([10, 17, 18] та ін.) на виникнення наведеної сейсмічності, поряд з наявністю спричи-

нених природними геодинамічними процесами фонових тектонічних напружень у земній корі нафтогазоносних районів впливають такі чинники (вони діють і в Передкарпатті):

- тривалий інтенсивний видобуток вуглеводнів, що спричиняє зміну поля напружень у зоні видобутку. Сейсмічна активність проявляється в районі покладів газу в середньому через 2–16 рр., на нафтових промислах – через 7–30 рр. від початку інтенсивного видобутку;

- тектонічні напруження, девіаторна складова яких реагує подіями навіть на незначні впливи техногенного характеру (відбирання-закачування рідин);

- фізико-механічна неоднорідність продуктивних пластів, уміщувальних порід і покришок.

Західна частина України характеризується в загальному спорадично-диференційованою місцевою сейсмічністю із землетрусами порівняно невеликої сили (з магнітудою  $M$  здебільшого до 3,5; для окремих землетрусів – до 5,4; з інтенсивністю струшувань  $I$  до 6–7 балів) [5, 6, 8]. За прогнозною інтенсивністю територія заходу України (крім сейсмоактивнішого Закарпаття) за картою загального сейсмічного районування ЗСР-2004 належить до 6-бальної зони. Тому питання вивчення сейсмічних впливів місцевих землетрусів регіону на народногосподарські комплекси є актуальним. Важливість сейсмоологічних досліджень зумовлена наявністю в регіоні багатьох важливих і екологічно небезпечних об'єктів – АЕС, ГЕС, ГАЕС, магістральних нафто- і газопроводів, численних родовищ нафти й газу, залізничних і автомобільних доріг з мо-

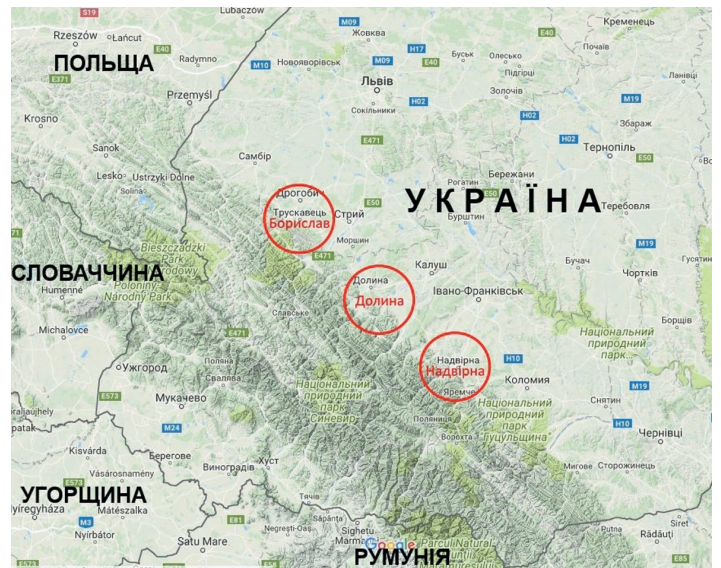
стами й тунелями, хвостосховищ хімічних підприємств тощо. Останнім часом підвищена актуальність таких досліджень пов'язана ще і з плануванням видобутку сланцевого газу на Олескій площі із застосуванням технологій гідророзриву.

**Метою цієї публікації** є дослідження власної природної сейсмічності головних нафтогазоносних районів Передкарпатського прогину, що останнім часом активізувалася, локалізація гіпоцентрів місцевих землетрусів щодо тектонічних структур, оцінка величин і характеру напружень у геологічному середовищі – усе це відіграє важливу роль у пізнанні причин сейсмічності досліджуваної території і в розробленні заходів для зменшення сейсмічного ризику для неї.

**Методика.** Детальніші інструментальні сейсмічні спостереження в Карпатському регіоні України тривають з 1960 року [8]. Зі збільшенням у наступні десятиліття кількості сейсмічних станцій у Карпатах, Закарпатті, Передкарпатті (нині тут працює 20 сейсмічних станцій) та використанням сучасної цифрової апаратури, нових методик гіпоцентрії [12] стало можливим з високою точністю (до  $\pm 1$  км) локалізувати вогнища землетрусів (визначати їхні координати й глибини). Для локалізації вогнищ землетрусів у Передкарпатському прогині використовували цифрові записи сейсмічних подій всієї мережі, а також сейсмічних станцій Польщі, Румунії, Угорщини і Словаччини; комп'ютерні програми визначення координат і глибин вогнищ землетрусів, в яких закладено ітераційний метод; модельний годограф для всієї території Карпатського регіону [12]. Оскільки швидкісна будова літосфери регіону є досить складною і для конкретних сейсмічних трас (трас вогнище – сеймостанція) може відхилитися від швидкісної моделі, закладеної в регіональний годограф, для підвищення надійності гіпоцентрії та мінімізації нев'язок під час визначення координат і глибин вогнищ сейсмічних подій пріоритетом для визначення ваги кожної сейсмічної станції в програмі гіпоцентрії є її наближеність до вогнищевої зони і зрівнювання часів пробігу сейсмічних хвиль від землетрусу з графіком Вадаті. Це дає змогу точніше визначати локалізацію вогнища і в підсумку надійніше дешифрувати тектонічно активні структури літосфери регіону.

**Виклад основного матеріалу. Геодинаміка Передкарпатського прогину.** Сейсмічність на території Передкарпатського прогину пов'язана переважно з двома чинниками – регіональною складовою глобального геодинамічного процесу й субрегіональними та місцевими (локальними) процесами [19]. До першої категорії належать процеси, що зумовлюють втягування Східноєвропейської платформи, а також зони її зчленування з молодшою Західноєвропейською платформою і Карпатським орогеном у деформаційні процеси, що відбуваються в Альпійсько-Трансасійському сейсмоактивному поясі та в обрамленні цих тектонічних структур і можуть бути причиною сильних землетрусів на цій території. Субрегіональна і локальна складові сейсмічності спричинені здебільшого процесами в мантії регіону (плюм в астеносфері під Паннонією) [19], деформаційними та фізико-хімічними процесами в земній корі, антропогенним впливом тощо.

**Сейсмічність Передкарпатського прогину.** Територія заходу України зазнає впливу як місцевих землетрусів [3, 5, 6, 8, 12, 19], так і глибокофокусних ( $h > 100$  км) сильних (з  $M = 6,6-7,8$ ) землетрусів зони Вранча (Румунія) [3, 5, 6] (сила сейсмічних струшувань I від останніх сягає 4–5 балів). За картою сеймотектонічного потенціалу території України (О. М. Сафронов [15]) Передкарпаття належить до Передкарпатсько-Дністровської сеймотектонічної провінції з підвищеним сеймотектонічним потенціалом. Зокрема, у Перед-

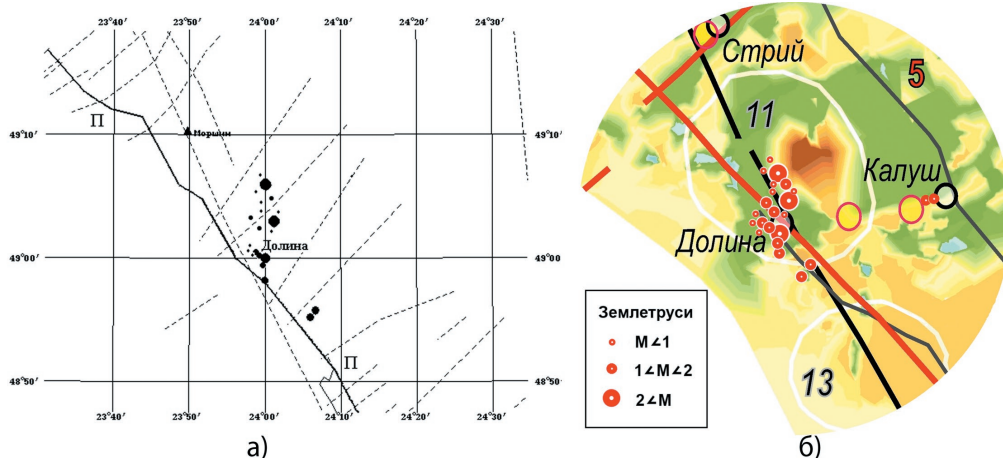


**Рис. 1.** Сейсмоактивні райони Передкарпаття на карті заходу України (картооснова Google maps)

карпатському прогині виділяються домени з максимальною прогноною магнітудою  $M_{max} = 5,5$  [15]. За період інструментальних спостережень (1961–2017 рр.) тут відбулося кілька серій землетрусів [3, 6, 8, 12, 19], які мають свої енергетичні та часово-просторові особливості. За цими даними у Передкарпатському прогині виділяються три найсейсмоактивніші райони: Долина, Надвірна, Борислав (рис. 1).

**Сейсмічність району Долини.** Цей район першим з районів Передкарпаття зазнав вираженої сеймотектонічної активізації. У 1974–1976 рр. сейсмічна мережа зареєструвала тут понад 30 землетрусів різної сили (рис. 2) [3, 6], найсильніші – зі струшуваннями інтенсивністю I до 3–6 балів в районі м. Долини. Кілька землетрусів невеликої енергії (з  $M$  приблизно 0,5–0,8) було зареєстровано тільки однією-двома станціями негустої ще на той час сейсмічної мережі. Для трьох найсильніших місцевих землетрусів (14.01.1976 р., 01.02.1976 р., 07.03.1976 р.) побудовано карти-схеми макросейсмічних полів. Вогнища цих землетрусів (із застосуванням нових методик оброблення даних та аналізу макросейсмічних полів для знаходження параметрів вогнищ сейсмічних подій) локалізовано в районі Долинського родовища, де з 1950 р. інтенсивно видобували нафту й газ. У 1963 р. тут досягнуто максимального видобутку газу (1,2 млрд  $m^3$ ), а 1966 р. – максимального видобутку нафти (2 млн т), що набагато перевищило заплановані показники. Такий інтенсивний видобуток вуглеводнів порушив геодинамічну рівновагу в геологічному середовищі, тут відбувся перерозподіл тектонічних напружень, що й спровокував серію Долинських землетрусів на глибинах 2–3 км, які спричинили низку аварій на промислах (вище вогнищ землетрусів, на глибинах 1,5–1,8 км залягають основні нафтові пласти) [2, 7]. Спільний аналіз тектоніки та локалізації гіпоцентрів Долинських землетрусів засвідчив, що вогнища цих землетрусів знаходяться в зоні впливу перетину діагонального Передкарпатського й ортогонального Турянського розломів [2, 7, 16] (рис. 2а). Водночас першого з них тут перетинає під гострим кутом також Краковецький розлом (рис. 2б). Розриви у вогнищах трьох сильніших землетрусів району Долини (напрямки яких трасуються за аналізом макросейсмічних полів) мають орієнтацію, яка збігається із простяганням тут Передкарпатського розлому, а просторово – з простяганням Долинської складки. Після серії землетрусів 1974–1976 рр. у цій зоні на певний період встановилося сейсмічне затишшя.





**Рис. 2. Сейсмічність району Долини:** а) – карта-схема просторової локалізації вогнищ землетрусів (чорні кружки – епіцентри подій різної магнітуди) на фоні розломної тектоніки району (за В. В. Плушком та С. С. Кругловим [12] (П-П – Передкарпатський розлом)); б) – землетруси району Долини на карті голоценових піднять/опускань (фрагмент за працею [13])

Але в 1983 р. тут знову зафіксовано сейсмічну активність на північний захід від попередніх вогнищевих зон. Землетруси ці невеликої сили –  $K=7,6-8,6$  ( $M=2-2,6$ ). В останні роки кілька слабких землетрусів зафіксовано інструментально за 5–10 км на південний захід від Долини, у напрямку простягання Турянського розлому, в районі села Вигоди.

За даними карти вертикальних голоценових рухів А. В. Полівцева [14] (рис. 2б) вогнища землетрусів з району Долини локалізуються в зоні Моршинсько-Рожнятівського морфоструктурно-неотектонічного вузла з диференційованими голоценовими вертикальними рухами (сумарні амплітуди піднять від 0,9 до 12,8 м). Тут (рис. 2б) також нанесено техногенні провальні землетруси в Калуші (1987 р.).

**Сейсмічність району Надвірної.** Іншою сейсмоактивною зоною в Передкарпатті є район Надвірної [10] у межах Бориславсько-Покутської зони Передкарпатського прогину, тут знаходиться Надвірнянський морфоструктурно-неотектонічний вузол [14]. Він утворений перетином Передкарпатського й ортогонального Шопурсько-Надвірнянсько-Монастирецького розломів, належить до трьох найбільших вузлів у Передкарпатті [2, 7, 14, 16]. Унаслідок комплексного аналізу геолого-геофізичних даних Передкарпатський розлом трасується в цій зоні по лінії Дерезичі – Лисовичі – Заріччя з амплітудою скиду 2–3 км [7, 14, 16].

За історичними та інструментальними даними раніше на цій території не було зафіксовано жодного відчутного землетрусу. А починаючи з 1996 року, тут спостережено помітну сейсмічну активізацію (рис. 3) [10]. Спочатку землетруси були слабкими (рис. 3б) ( $K=6-7$ ,  $M=1,1-1,7$ ), з 1999 р. сила землетрусів зростає ( $K$  – до 8,  $M$  – до 2,2). З 2004 р. і до 2011 р. кількість землетрусів різної сили суттєво зростає, пік сейсмічної активності припадає на 2008 рік – 11 подій. Закінчується цикл активізації 2013 роком – слабким землетрусом з  $K=6$  ( $M=1,1$ ).

Ми уточнили гіпоцентрію місцевих землетрусів (рис. 3, 4), дослідили напрямки спорювання розривів у їхніх вогнищах (рис. 3в), проаналізували просторову локалізацію вогнищ щодо геологічних структур і родовищ вуглеводнів (рис. 3, 4) [10]. Для цього, зокрема, уточнені з використанням відповідних методик [12] вогнища землетрусів було винесено на розріз по субрегіональному профілю Бистриця – Гвізд [2, 7] (рис. 4).

Аналізуючи дані на рис. 4, бачимо, що вогнища (з уточненими координатами й глибинами) майже всіх винесених на профіль землетрусів приурочені до різноглибинних поверхонь насувів і складок з різною крутістю занурення (кутами падіння). Найактивнішою в цьому сенсі і добре про-

стеженою гіпоцентрами землетрусів (5 вогнищ) є поверхня, по якій на автохтонні осадові структури Передкарпатського прогину насувається нижній (Дзвиняч-Рунгурський) покрив внутрішньої зони прогину. Причому сейсмоактивна зона пов'язана з ділянкою найпологішого (близькогоризонтального) залягання цієї поверхні (на північ від струмка Бухтовця у районі сіл Пнева та Гвізда, глибини 4,8–6,2 км). Два з цих землетрусів (на південь від села Пнева) локалізуються в зоні зчленування цієї поверхні насування зі стрімкішою (ближче до підкидової) поверхнею насування чола Пасічнянської глибинної складки (третій ярус складок) на нижню частину Пнівської складки (у тілі Дзвиняч-Рунгурського покриву).

Вогнище ще одного землетрусу локалізується приблизно на 1 км вище (глибина 4,5–4,8 км) і приурочене до тієї ж стрімкішої поверхні насування Пасічнянської складки на Пнівську. Ще 2 вогнища (глибини 2,0 і 2,8 км) є у верхньому ярусі сеймотектонічної активності. Одне з них приурочене до тіла складки Глибинної (Битківського покриву) і локалізується над описаною вище зоною сеймотектонічної активізації поверхні насування покривів на автохтон. Інше – на 7,5 км південно-західніше, на підкидовій поверхні насування складки Газової (Бухтовецької) на складку Газову.

Ще південно-західніше, але вже на нижньому ярусі активності (глибина 5,8 км) локалізується ще одне вогнище, яке приурочене до поверхні насування верхнього (Майданського) покриву внутрішньої зони Передкарпатського прогину на середній (Битківський) покрив. І одне вогнище на проміжній (3,5 км) глибині (північно-східна частина профілю, район села Пнева) приурочене до площини насування Пнівської складки на Старунську. До цього треба додати, що активність Старунської складки відображає також одне зі згаданих першими вогнищ на поверхні насування її підосви на автохтон, що локалізується у вузлі зчленування цієї поверхні зі стрімкішою поверхнею, по якій Старунська складка насувається (з підкиданням) на Гвіздецьку. Саме в зоні цієї складки неподалік (приблизно за 7 км на північний захід від точки Б профілю) розміщений відомий грязьовий вулкан “Старуня” (1907 р. тут знайшли забальзамоване в сольових і нафтово-озокеритових товщах тіло мамонта, а 1929 р. – довгошерстого носорога та інших викопних тварин), який активізувався після сильного землетрусу в зоні Вранча 1977 року, викидаючи (з ослабленою до сьогодні інтенсивністю) через 7 кратерів і 12 мікрократерів газ, воду, глинисту пульпу, інколи нафту й озокерит.

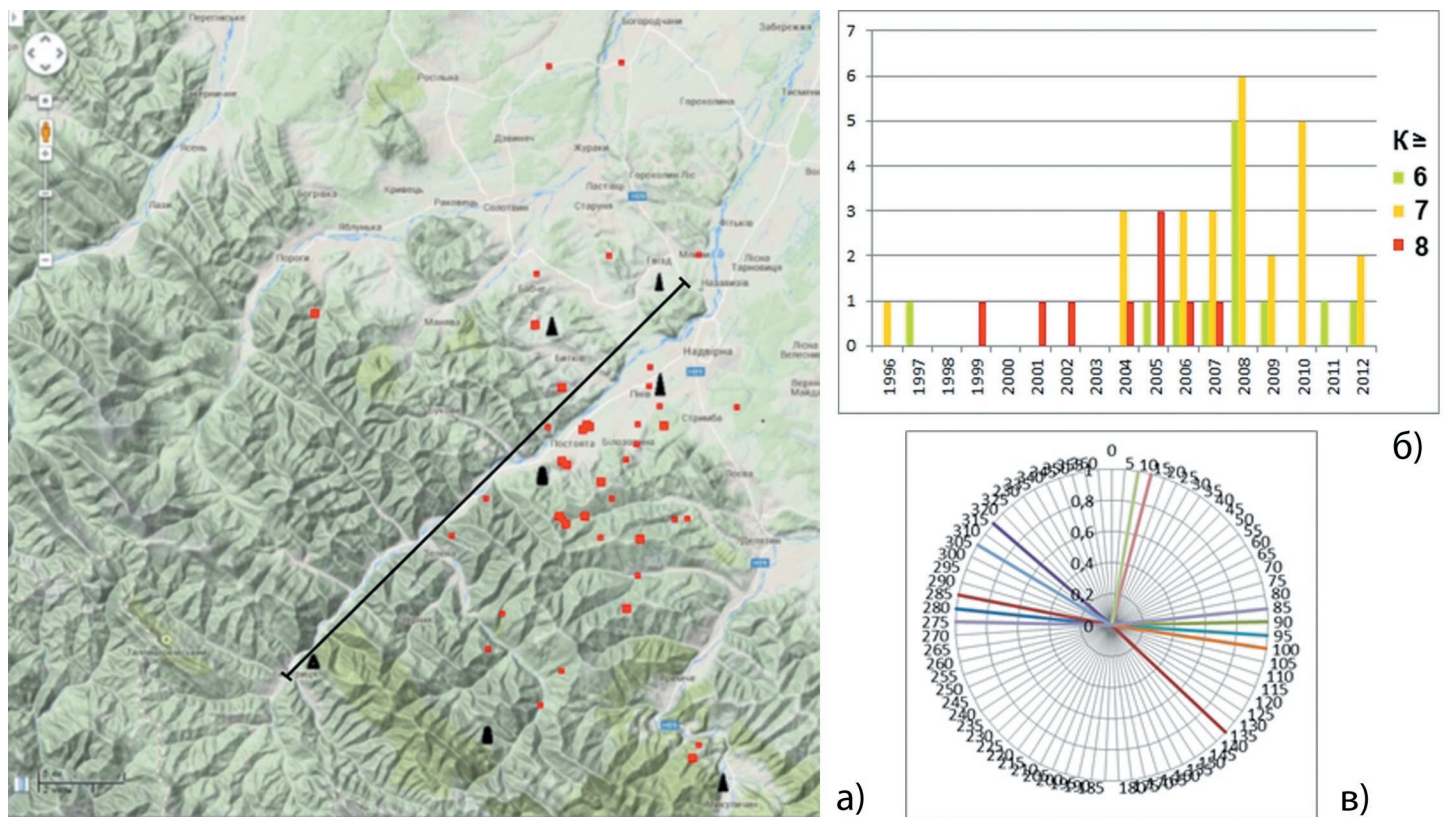
На користь передбачуваних підкидо-насувних механізмів більшості місцевих землетрусів Надвірнянського району (реалізованих в умовах стиску вхрест Карпат (у напрямку півден-

ний захід – північний схід) з деякою тангенціальною складовою схід – південно-східного напрямку (див. нижче) свідчить (крім локалізації вогнищ на тектонічних структурах кори й переважно незбіжних з простяганням у плані до задокументованих розривних порушень напрямків спорювання розривів у їхніх вогнищах) і такий важливий та вже чимало досліджений параметр місцевих землетрусів, як кріпекс [9, 11]. Зокрема кріпекс чотирьох сильніших землетрусів, що відбулися у 2009–2011 рр., має виражені від’ємні ( $-0,17 \div -0,52$ ) значення, що свідчать про “жорстке” (високочастотне) сейсмічне випромінювання зазначених вогнищ, а це притаманно для механізмів підкидо-насувного типу, які є характерними в умовах стиску.

У світлі викладеного стає зрозумілим специфічне співвідношення між вогнищами землетрусів і пастками вуглеводнів, яке ми помітили раніше (рис. 4). Землетруси відбуваються на розривних порушеннях (розломах, поверхнях насувів і скла-

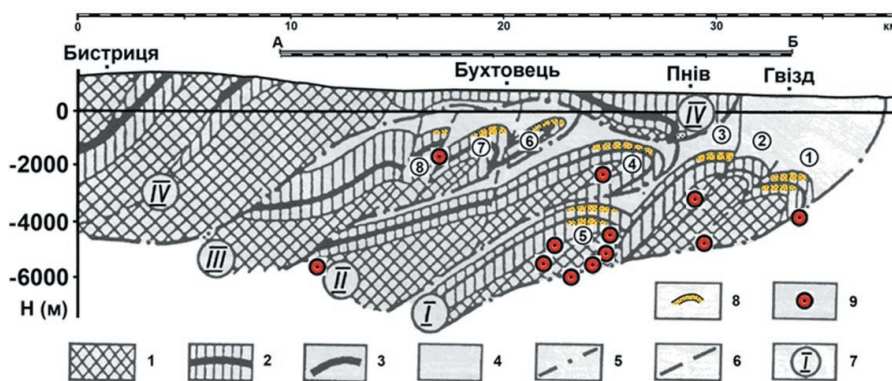
док), що оточують геологічні структури (антиклінальні складки) – пастки нафти й газу. У самих пастках таких активних розривних порушень немає, інакше скупчення вуглеводнів у них би не утворилися. Зазначимо до цього, що такі геодинамічно активні розривні порушення є, на наш погляд, добрими каналами підведення вуглеводнів до пасток з більших глибин, ці вуглеводні далі мігрують від зон таких активних розривних порушень угору і вбік по колекторах у зони покладів.

**Сейсмічність району Борислава.** Район Борислава є тим районом Передкарпаття, де сеймотектонічну активність зафіксовано найпізніше, вона проявилася буквально в останні роки. Сучасну сейсмічну активізацію в цьому районі спостережено, починаючи з 2014 р. [13] (рис. 5). Зафіксовані в районі землетруси є невеликої сили – з  $M=0,8-2,5$ . Глибини вогнищ цих землетрусів також є невеликими ( $H=0,9-6,0$  км). До 2014 р. тут інструментально не було зафіксовано земле-



**Рис. 3.** Сейсмічність району Надвірної за працею [3]:

а) – просторова локалізація вогнищ землетрусів (червоні квадратики – епіцентри подій різної магнітуди, чорна лінія – профіль Бистриця – Гвізд) на фоні рельєфу (на картооснові Google maps); б) – щорічна кількість сейсмічних подій різного класу/магнітуди в районі за 1996–2012 рр.; в) – азимут простягання розривів у вогнищах сильніших з місцевих землетрусів



**Рис. 4.** Локалізація вогнищ землетрусів Надвірнянського нафтогазоносного району на структурах кори. Геологічний розріз по профілю Бистриця – Гвізд [11] з доповненнями й деталізацією за працею [10]:

1 – крейдяний фліш; 2 – палеогеновий фліш; 3 – Шешорський горизонт і Бистрицька світа всередині палеогену; 4 – моласи неогену; 5 – границі покривів; 6 – насув; 7 – покриви (I – нижній (Дзвиняч-Рунгурський), II – середній (Битківський), III – верхній (Майданський) (усі три – внутрішня зона Передкарпатського прогину), IV – Скибовий покрив Карпат (Берегова скиба)); 8 – поклади вуглеводнів; 9 – вогнища землетрусів у зоні профілю; цифри в кружках – окремі складки внутрішньої зони Передкарпатського прогину (1 – Гвіздецька, 2 – Старунська, 3 – Пнівська, 4 – Глибинна, 5 – Пасічнянська, 6 – Стара Копальня, 7 – Газова, 8 – Газова (Бухтовецька))



трусів, хоча (за даними світової статистики [10, 17, 18]) на газових родовищах сейсмічна активізація часто настає через 3–16 р. після початку видобування, на нафтових – через 7–30 р. (для прикладу, основні Долинські землетруси 1975–1976 рр. відбулися через 25 років від початку розроблення нафтових родовищ). За період 2014–2017 рр. у районі Борислава зафіксовано 25 землетрусів невеликої сили ( $M=0,8-2,7$ ) (рис. 5б), з них 2014 р. – чотири, 2015 р. – дев'ять, 2016 р. – чотири, 2017 р. – вісім. Загальна енергія, що виділилася під час цих землетрусів, становить  $2,1 \times 10^9$  Дж, найбільша кількість енергії виділилася 2017 р. –  $1,4 \times 10^9$  Дж, менша – 2014 р. ( $0,4 \times 10^8$  Дж). Вогнища землетрусів цього району знаходяться в зонах видобутку нафти й газоконденсату [2, 7].

Бориславська сейсмогенна зона займає центральну частину території Бориславського нафтопромислового району (НПР) – західної частини Передкарпатського прогину, від кордону з Польщею до річки Стрий. Географічно (геоморфологічно) район розташований на стику Українських Карпат (Зовнішніх (Скибових) Карпат) і Передкарпатської хвилястої височини, захоплюючи частину обох цих геоморфологічних одиниць [1]. Унікальність цього району полягає в тому, що тут ведеться (починаючи з 1810 р.) активне видобування нафти, газу й озокериту в промислових масштабах [2, 7], яке впливає (зокрема, через зміну флюїдного режиму структур земної кори) на зміну напружено-деформованого стану геологічного середовища не тільки довкола свердловин, але, очевидно, і в набагато ширшому масштабі.

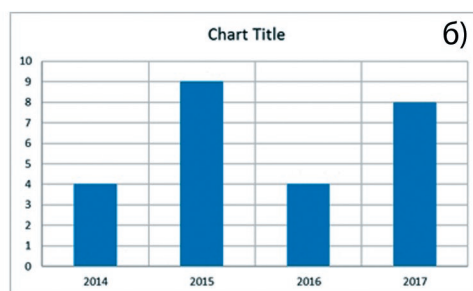
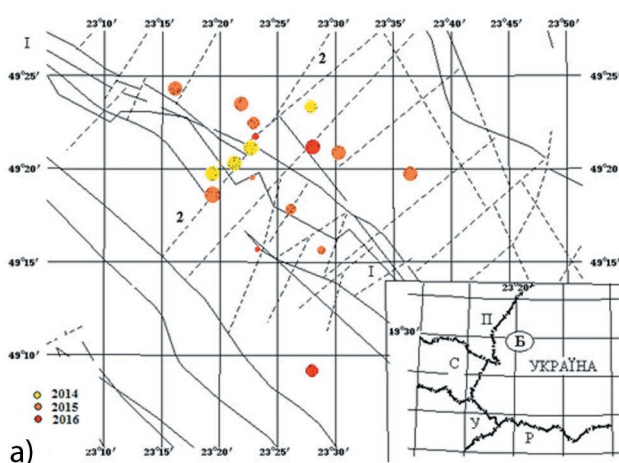
Бориславський сейсмоактивний район розташований переважно у Внутрішній зоні Передкарпатського прогину [2, 7, 16]. Основним структурним елементом фундаменту тут є Попельський структурний виступ, а також блок між Раточинським і Стрийським поперечними розломами (Оривське підняття). Характерною особливістю будови земної кори району є наявність численних складок-насувів, до яких приурочені родовища вуглеводнів. Це, наприклад, Бориславська складка першого ярусу структур і насунута складка другого ярусу структур Бориславсько-Покутської зони Передкарпатського прогину [2, 7, 13, 16]. Складки розбиті низкою тектонічних порушень різної амплітуди на окремі тектонічні блоки. У першому ярусі структур – це Попельський, Бориславський і Помірківський блоки, у другому – Бориславський і Попельський тектонічні блоки [2, 7, 13].

Просторова локалізація епіцентрів землетрусів на тектонічній карті [16] (рис. 5а) виявила деякі особливості сейсмотектоніки району. Зокрема, ланцюжок землетрусів північно-східного

напрямку на північ від Борислава трасує лінію Раточинського розлому, далі на північ простежено ще одне сейсмоактивне тектонічне порушення. За результатами дешифрування космічних знімків і геолого-геофізичних даних (А. Кудряшов, О. Мичак) встановлено, що простежений тут спряжений з розломом Раточинський лінеамент є регіональною субвертикальною зоною деструкції земної кори (за Р. Бембелем) з ознаками розтягу. На режим розтягу земної кори цього району вказує також додатний знак параметра кріпекс (Cr) досліджених землетрусів, який добре характеризує напружений стан вогнищевих зон, зумовлений локальною геодинамікою [11]. Проаналізовані амплітудно-частотні спектри деяких землетрусів більшої сили (з  $M 2,0-2,5$ ) Бориславської зони свідчать про двоетапний характер утворення розривів, а також низьку частоту зрізу спектра Р-хвилі  $f_0$ . У частотному спектрі таких землетрусів переважають низькі частоти, питома пружна енергія джерела є порівняно малою, а вогнищева зона відносно великою. За класифікацією Е. Каверіної та ін. – це так звані “кріпексні” землетруси, які відбуваються в районах, для яких характерні процеси розтягу й опускання земної кори [11]. Сейсмічно активною в цьому районі є також Трускавецька структура (Помірківської блок) та Оривська структура Складчастих Карпат. Певну сейсмічну активність проявляє і територія біля курорту Східниця. Також тут проявляється сейсмоактивна структура північно-західно – південно-східного простягання в зоні впливу Передкарпатського розлому, ймовірно, опірвальні розриви та складки в чохлах й фундаменти.

Про “наведену” геодинамічну активність району Борислава свідчать і дані щодо розміщеного на сході району Орив-Уличнянського нафтового родовища [3] – тут зафіксовано численні зм'яття обсадних колон пробурених свердловин (у 12-ти з 40), причому більшість з таких аварій сталася через 12–15 років після початку експлуатації, деякі – через 3–7 років. У свердловині 58-Іваники колона була деформована прямо під час буріння. Відсутність тут землетрусів пов'язана з розрядженням напружень пластичними деформаціями в глинисто-соляних відкладах воротищенської світи (глибини 1520–2600 м).

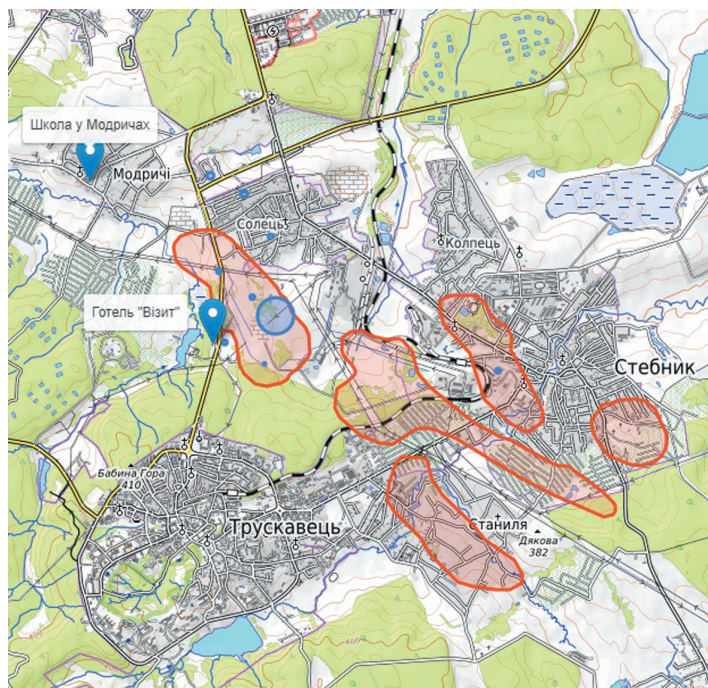
Техногенна сейсмічність у районі м. Стебника. Ще одим із чинників сейсмічної активізації в районі Борислава є техногенно спровоковані процеси в зонах гірничих виробок Стебницького калійного родовища. Заслужують на підвищену увагу землетруси, які відбулися в районі міст Дрогобича й Стебника, зокрема, 22.08.2016 р. і 29.09.2017 р. Ці землетруси мали відчутний сейсмічний вплив на територію рудника № 2 в Стебнику. Перший землетрус із магнітудою  $M=2,3$  на глибині 6 км о 13.36.31,5 за Гринвічем, можливо, був тригером



**Рис. 5. Сейсмічність Бориславської зони:**

а) – просторова локалізація вогнищ землетрусів (кружки – епіцентри подій різної магнітуди, кольором позначено рік події) на фоні розломної тектоніки

(за В. В. Плущком та С. С. Кругловим [12]) (I–I – Передкарпатський розлом; 2-2 – Раточинський розлом), на врізці – локалізація Бориславської зони (Б) на оглядовій карті заходу України; б) – щорічна кількість сейсмічних подій у районі за 2014–2017 рр.



**Рис. 6.** Карта шахтних полів ПАТ “Стебницьке ГХП “Полімінерал” (червоним кольором) і останнього 29.09.2017 р. сейсмогравітаційного провалу на руднику № 2 (синє коло) (<http://gis.Icr.edu.ua:8080/geoserver/www/index.html>)

[13] для пізнішої й більш приповерхневої події о 16.36 (імовірно, гірничого удару або обвалу однієї з камер шахтного поля), яку зафіксувала гірнична служба в одній з недіючих тепер шахт поблизу м. Стебника. Цей землетрус зафіксували 19 станцій карпатської сейсмічної мережі, його кріпекс додатний, спектр 3-східчастий (що свідчить про складний характер розриву й три структурно-ієрархічні рівні руйнування у вогнищі), основна (нижня – кріпексна) частота зрізу спектра Р хвилі  $f_0$  для різних станцій становить 0,4–0,8 Гц (у середньому 0,65 Гц). Цій частоті відповідає довжина розриву у вогнищі (за встановленими кореляційними залежностями для регіону [9]) приблизно 3 км, тоді як за цими самими залежностями середня довжина розриву для землетрусів такого класу/магнітуди становить приблизно 0,7 км.

Другий землетрус 29.09.2017 р. з  $M=2,7$  о 21 год 46 хв за Гринвічем (30.09.2017 р. о 0 год 46 хв за місцевим часом) стався внаслідок сейсмогравітаційного зміщення – провалу на калійному руднику № 2 біля м. Стебника (рис. 6).

Такі сейсмогравітаційні зміщення відбуваються у вже підготовленому геологічному середовищі – у цьому випадку внаслідок карстових процесів під час затоплення недіючої шахти 2-го рудника ПАТ “Стебницьке ГХП “Полімінерал”. Щодо ділянки провалу, то тут уже був у минулому гравітаційний обвал на нижніх горизонтах гірничих виробок [4], несуча міцність порід шахтного поля знижувалася внаслідок карстових процесів.

Сейсмогравітаційний провал відбувся тут у зоні попереднього руйнування ціликів виробок шахти й величезна маса порід впала на водяне “дзеркало”, яке утворилося під час затоплення виробок ґрунтовими водами й розсолами і руйнування ціликів. Цей удар об воду загасив височастотні коливання, тому ця техногенна сейсмічна подія має специфічний спектр, для якого також характерна східчаста форма з низькою основною частотою зрізу спектра Р-хвилі. Водночас помітне зниження крутизни зростання спектра до низьких частот указує на зменшення скинутих напружень з

переходом від нижчих масштабно-ієрархічних рівнів розривотворення до вищих.

**Висновки.** Наведений аналіз сейсмічності й сеймотектоніки сейсмоактивних нафтогазоносних районів Передкарпатського прогину дає змогу зробити такі узагальнення.

Сейсмічність у районі Долини (перша активізація району відбулась у 1974–1976 рр.) пов’язана з інтенсивним видобуванням нафти на Долинському родовищі. Складний напружений стан геологічного середовища нижче зони родовища й додаткові гідродинамічні чинники, зокрема, застосування з 1958–1963 років законтурного закачування води й технології гідророзриву пласта [2, 3, 7] сприяли сейсмогеодинамічній активізації – відчутним землетрусам, деформаціям порід, змінанню й розривам обсадних колон свердловин. Поява тут нових вогнищ землетрусів з 1983 р. свідчить про сучасну тектонічну активність наявних геологічних структур.

У Надвірнянській сейсмогенній зоні (активізованій у 1996–2013 рр.) установлено, що вогнища землетрусів здебільшого розміщені вище (2,0–2,5 км) і нижче (4,8–6,0 км) зон локалізації покладів нафти й газу (2,8–4,5 км) або збоку від нафтогазоносних структур. Частина вогнищ місцевих землетрусів тяжіє до зони поперечного Надвірнянського розлому та оперувальних розривних порушень, частина – до поверхонь різноглибинних (1-й, 2-й та 3-й яруси складок) насувів, ще кілька – до структур у зоні грязьового вулкана Старуна.

Зазначимо, що такі геодинамічно активні розривні порушення є, на наш погляд, добрими каналами підведення вуглеводнів до пасток з більших глибин, відтак ці вуглеводні мігрують від зон активних розривних порушень вгору і вбік по колекторах у зони покладів.

Сучасна (2014–2017 рр.) сейсмічна активізація Бориславської зони пов’язана з низкою чинників. Насамперед це зумовлений тектонікою складний напружений стан структури Раточинського розлому. Цей розлом є складовою частиною вираженого субрегіонального лінеамента північно-східного простягання (простежуваного від м. Дрогобича до села Тур’я) і північно-західним обмеженням Бориславської нафтоносної структури. З іншого боку, район характеризується підвищеною тріщинуватістю й флюїдонасиченістю порід, передусім колекторів нафти й газу, а також зон численних різнорангових розривних порушень, під час видобування нафти й законтурного закачування води створюється додатковий гідродинамічний тиск на вже механічно ослаблені породи в цих зонах, що сприяє розрядці землетрусами накопичених тут тектонічних напружень.

Загалом можна констатувати, що сеймотектонічна активізація нафтогазоносних районів Передкарпатського прогину спричинена як наявністю тут тектонічних напружень (необхідна умова), так і “збуренням” напружено-деформованого стану масивів порід у цих районах процесами нафтогазовидобутку й закачування рідин, що призводить до такого перерозподілу напружень і деформацій або/і до такої зміни механічних властивостей порід (достатня умова), за яких у певних зонах геологічного середовища досягається перевищення накопиченими напруженнями межі міцності порід (на розрив або/і зсув), що зумовлює техногенно спровоковану (наведену) сейсмічність.

З огляду на те, що, крім нафтопромислів, великих міст (Дрогобича, Борислава, Долини, Надвірної) та багатьох інших населених пунктів, у смугі Передкарпатського прогину знаходяться гірничі виробки калійних родовищ Стебника й Калуша, а також відомі бальнеологічні курорти Трускавець,



Моршин, Східниця, завдання організації детального сейсмічного та геофізичного моніторингу геоекологічної безпеки на цій території є актуальним.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Алехин В. И.* Геологические мезоструктуры флишевой толщи Скибовой зоны Восточных Карпат (участки с. Бубныше и п.г.т. Сходниця)//Вісті Донецького гірничого інституту. – 2015. – № 1–2(36–37). – С. 15–22.
2. Атлас родовищ нафти і газу України: В 6 т./Вид-во “Центр Європи” (гол. ред. М. Н. Іванюта). – Львів, 1998. – Т. IV–V.
3. *Бень Я., Пронишин Р., Стасюк А., Мельничук О.* Сейсмогеодинамічні умови нафтогазових родовищ Передкарпатського прогину//Геодинаміка. – 1999. – № 1(2). – С. 111–116.
4. *Дяків В. О.* Динаміка водопитоків, розвитку техногенно-активізованого карсту та прогнозованого провалу 30 вересня 2017 р. у зоні впливу рудника №2 Стебницького ГХП “Полімінерал”//Матеріали четвертої міжнародної науково-практичної конференції “Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування” Україна, м. Трускавець, (6–10 листопада 2017 р.). У 2-х томах. – Київ: ДКЗ, 2017. – Т. 2 – С. 273–288.
5. *Евсеев С. В.* Землетрясения Украины. – Киев: Изд-во АН УССР, 1961. – 76 с.
6. *Кендзера О., Пронишин Р., Бень Я.* Сейсмічна безпека Передкарпаття//Праці НТШ. – Львів, 1997. – Т. 1. – С. 104–113.
7. *Крупський Ю. З.* Геодинамічні умови формування і нафтогазонасність Карпатського та Волино-Подільського регіонів України. – Київ: УкрДГРІ, 2000. – 144 с.
8. *Назаревич Л. Є., Стародуб Г. Р.* Деякі особливості сейсмічного процесу в Карпатському регіоні України (40 років спостережень)//Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – Київ, 2010. – С. 286–299.
9. *Назаревич А. В., Назаревич Л. С.* Масштабно-енергетичні кореляційні співвідношення для вогнищ землетрусів Закарпаття: деякі наслідки та енергетична верифікація//Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – Київ, 2009. – С. 279–298.
10. *Назаревич Л. Е., Назаревич А. В.* Сейсмичность и сейсмотектоника Надворьянского нефтегазосного района (Украинское Предкарпатье)//Бюл. Моск. о-ва испытателей природы. Отд. геол. – 2015. – Т. 90. – Вып. 6. – С. 17–27.
11. *Назаревич Л. Е., Назаревич А. В., Баштевич Н. В.* Крипекс землетрясений и его применение в сейсмологии//Материалы международной конференции “Проблемы оценки сейсмической опасности, сейсмического риска и прогноза землетрясений” Ташкент, 7–8 октября 2004 г. Ташкент, 2004. – С. 33–37.
12. *Назаревич Л. Е., Назаревич А. В.* Методики уточнения параметров гипоцентров Карпатских землетрусів//Геодинаміка. – 2004. – № 1(4). – С. 53–62.
13. *Назаревич Л. Є., Ніцименко І. М., Назаревич А. В., Олійник Г. І.* Сейсмогеодинамічна активізація Бориславського нафтогазосного району як фактор екологічного ризику//Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції “ЕКОГЕОФОРУМ-2017. Актуальні проблеми та інновації”, м. Івано-Франківськ, (22–25 березня 2017 р.). – Івано-Франківськ, 2017. – С. 192–194.
14. *Поліщев А. В.* Карта вертикальних голоценових рухів Волино-Поділля та Передкарпаття//Геодинаміка. – 2011. – № 1(10). – С. 58–70.
15. *Сафронов О. М.* Геодинамически активные зоны и перспективы уточнения сейсмического районирования территории Украины//Геодинаміка. – 2012. – № 1(12). – С. 152–157.
16. Тектоническая карта Украинских Карпат. М-б 1:200 000/Под ред. В. В. Глушко, С. С. Круглова. – Киев: УкрНИГРИ, 1986.
17. Geomechanical Study of Bowland Shale Seismicity. – Cuadrilla Resources, 02.10.2011.
18. *Keranen K. M., Savage H. M., Abers G. A. and Co-chran E. S.* Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA: Links between wastewater injection and the 2011 Mw 5.7 earthquake sequence//Geology. – 2013. – Vol. 41. – P. 699–702.
19. *Nazarevych A., Nazarevych L.* Modern and alpine geodynamics of Ukrainian Carpathians (multi-tier “crocodile” or “shaking hand” and “fir-tree” tectonics)//Proceedings XVIII-th congress of the Carpathian-Balkan geological association. September 3–6, 2006, Belgrade, Serbia. Belgrade. 2006. – P. 399–401.

## REFERENCES

1. *Alekhin V. I.* Geological mesostructures in the flysch strata of the Thrust zone of Eastern Carpathians (Bubnyshe and Skhodnitsa areas)//Visti Donetskoho hirnychoho instytutu. – 2015. – № 1–2(36–37). – P. 15–22. (In Russian).
2. Atlas of Ukrainian oil and gas deposits: In 6 volumes/Publishing house “Center of Europe” (Editor in Chief M. N. Ivanyuta). – Lviv, 1998. – Vol. IV–V. (In Ukrainian).
3. *Ben Ya., Pronyshyn R., Stasyuk A., Melnychuk O.* Seismogeodynamic conditions of oil and gas deposits of the Pre-Carpathian fore-deep//Heodynamika. – 1999. – № 1(2). – P. 111–116. (In Ukrainian).
4. *Dyakiv V.* Dynamics of water flow, development of technogenic-activated karst and prognosis funnel which occurred on september 30, 2017 in the zone of influence of mine №2 Stebnitsky MICF “Poliminerall”//Materialy chetvertoi mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii “Nadrokorystuvannia v Ukraini. Perspektyvy investuvannia” Ukraina, m. Truskavets, (6–10 lystopada 2017 r.). U 2-kh tomakh. – Kyiv: DKZ, 2017. – Vol. 2. – P. 273–288. (In Ukrainian).
5. *Evseev S. V.* Earthquakes of Ukraine. – Kiev: Izd-vo AN USSR, 1961. – 76 p. (In Russian).
6. *Kendzera A., Pronyshyn R., Ben Ya.* Seismic hazard of Pre-Carpathians//Pratsi NTSh. – Lviv, 1997. – Vol. 1. – P. 104–113. (In Ukrainian).
7. *Krupskiy Yu. Z.* Geodynamical conditions of forming and oil-gas bearing of the Carpathian and the Volyn-Podillia regions of Ukraine. – Kyiv: UkrDHRI, 2001. – 144 p. (In Ukrainian).
8. *Nazarevych L. Ye., Starodub G. R.* Some peculiarities of the seismic process in the Carpathian region of Ukraine (40 years of observation)//Teoretychni ta prykladni aspekty heoinformatyky. – Kyiv, 2010. – P. 286–299. (In Ukrainian).
9. *Nazarevych A. V., Nazarevych L. Ye.* Scale-energy correlation values for foci of Transcarpathian earthquakes: some consequences and energy verification//Teoretychni ta prykladni aspekty heoinformatyky. – Kyiv, 2009. – P. 279–298. (In Ukrainian).
10. *Nazarevych L. Ye., Nazarevych A. V.* Seismicity and seismotectonics of the Nadvirna oil and gas area (Ukrainian Precarpathian)//Byul. Mosk. o-va ispytatelej prirody. Otd. geol. – 2015. – Vol. 90. – Iss. 6. – P. 17–27. (In Russian).
11. *Nazarevych L. Ye., Nazarevych A. V., Bashtevych N. V.* Creep of earthquakes and its application in seismology//Materialy mezhdunarodnoj konferentsii “Problemy ocenki sejsmicheskoy opasnosti, sejsmicheskogo riska i prognoza zemletryasenij” Tashkent, 7–8 oktyabrya 2004 g. – Tashkent, 2004. – P. 33–37. (In Russian).
12. *Nazarevych L. Ye., Nazarevych A. V.* Methods of refining the parameters of the hypocenters of the Carpathian earthquakes//Heodynamika. – 2004. – № 1(4). – P. 53–62. (In Ukrainian).
13. *Nazarevych L. Ye., Nishchymenko I. M., Nazarevych A. V., Oliy-nyk G. I.* Seismogeodynamic activation of the Boryslav oil and gas area as a factor of ecological risk//Materialy Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii “EKOHEOFORUM-2017. Aktualni problemy ta innovatsii”, m. Ivano-Frankivsk, (22–25 bereznia 2017 r.). – Ivano-Frankivsk, 2017. – P. 192–194. (In Ukrainian).
14. *Polivtsev A. V.* The map of vertical holocene movements of Volyno-Podillya and Pre-Carpathians//Heodynamika. – 2011. – № 1(10). – P. 58–70. (In Ukrainian).
15. *Safronov O. N.* Geodynamically active zones and prospect of improvement of seismic zoning of territory of Ukraine//Heodynamika. – 2012. – № 1(12). – P. 152–157. (In Russian).
16. Tectonic map of the Ukrainian Carpathians. M-b 1:200 000/Ed. V. V. Glushko, S. S. Kruglov. – Kiev: UkrNIGRI, 1986. (In Russian).
17. Geomechanical Study of Bowland Shale Seismicity. – Cuadrilla Resources, 02.10.2011.
18. *Keranen K. M., Savage H. M., Abers G. A. and Co-chran E. S.* Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA: Links between wastewater injection and the 2011 Mw 5.7 earthquake sequence//Geology. – 2013. – Vol. 41. – P. 699–702.
19. *Nazarevych A., Nazarevych L.* Modern and alpine geodynamics of Ukrainian Carpathians (multi-tier “crocodile” or “shaking hand” and “fir-tree” tectonics)//Proceedings XVIII-th congress of the Carpathian-Balkan geological association. (September 3–6, 2006), Belgrade, Serbia. – Belgrade. – 2006. – P. 399–401.

Рукопис отримано 7.02.2018.