

ІНФОРМАТИВНІСТЬ ГЕОМАГНІТНОГО МОНІТОРИНГУ В ЗАКАРПАТСЬКІЙ СЕЙСМОАКТИВНІЙ ЗОНІ

Наведено результати геомагнітного моніторингу при дослідженні сейсмотектонічних процесів у Закарпатському прогині. Виявлено тектономагнітні аномалії різної тривалості та інтенсивності, встановлено їх просторово-часовий зв'язок із сейсмічними подіями. Зроблено висновки про інформативність геомагнітного моніторингу в Закарпатській сейсмоактивній зоні для виявлення провісників місцевих землетрусів з магнітудою $M > 3$ в геолого-геофізичних умовах Закарпатського прогину.

Ключові слова: моніторинг; провісники землетрусів; тектономагнітні аномалії.

Вступ

Проблема прогнозування землетрусів, на розв'язання якої були спрямовані значні зусилля вчених багатьох країн впродовж останніх 40–50 років, незважаючи на помітні досягнення в її окремих аспектах, все ж далеко не повністю вирішена. Про необхідність її розв'язання час від часу нагадують катастрофічні землетруси у різних районах планети. Цілком зрозуміло, що задачу прогнозування землетрусів необхідно розв'язувати для кожного конкретного регіону, з урахуванням особливостей його геологічної будови, рівня сейсмічної активності та багатьох інших факторів. При цьому актуальними залишаються питання забезпечення неперервних спостережень за параметрами геологічного середовища на спеціально створеній мережі пунктів, накопичення довготривалих часових рядів геофізичних полів та їх математичної обробки, тобто організації системи геофізичного моніторингу.

Результати досліджень в сейсмоактивних районах світу показали, що підготовка землетрусів супроводжується збуреннями (варіаціями) різних геофізичних полів та параметрів середовища: сейсмічного режиму, деформацій масивів гірських порід, рівня та хімічного складу підземних вод, електропровідності, електричних струмів, магнітних полів тощо [Рикитакє, 1979; Сковородкин, 1985; Максимчук, 2001; Гуфельд, 2007]. Як правило, такі збурення ототожнюються з провісниками землетрусів.

Для вивчення сейсмотектонічних процесів та виявлення провісників землетрусів у Закарпатській сейсмоактивній зоні в 70-ті роки ХХ ст. створено Карпатський геодинамічний полігон з мережею режимних геофізичних станцій [Карпатський..., 1972].

У комплексі геофізичних методів, які використовуються під час сейсмопрогностичних досліджень на Карпатському полігоні, важливе місце займають тектономагнітні дослідження. Починаючи з 1982 р., на полігоні організовано цілодобові режимні геомагнітні спостереження, мета яких – вивчення аномальних часових змін магнітного поля сейсмотектонічного походження. Було обґрунтовано методику і досягнуто необхідної точності спостережень, що дало змогу забезпечити виявлення аномальних ефектів від місцевих землетрусів [Кузнєцова, Лебедович, 1988; Кузнєцова і др., 1989]. Спостереження проводились на

чотирьох режимних геофізичних станціях (РГС), які розміщені у виділених раніше за результатами площинних тектономагнітних спостережень індикаторних зонах: РГС “Брід”, РГС “Н. Селище”, РГС “Тросник”, РГС “Берегове” (рис. 1). На жаль, з технічних причин з середини 2006 р. спостереження на РГС “Берегове” припинені.

За майже 30-річний період моніторингових геомагнітних спостережень на Карпатському геодинамічному полігоні отримано довготривалі неперервні ряди середньодобових, середньодекадних, середньомісячних та середньорічних значень різниці геомагнітного поля ΔT між станціями. У часових рядах ΔT було виявлено трендову складову, аномальні геомагнітні ефекти, що корелюють у часі з місцевими землетрусами, довготривалі квазіперіодичні зміни, сезонні варіації різниці геомагнітного поля, а також локальні зміни поля, зумовлені метеофакторами [Максимчук та ін., 2001; Дослідження..., 2005; Кузнєцова, 2005; Климкович, 2009].

Такий складний спектр геомагнітних ефектів, зумовлених різними факторами, не дає змоги однозначно виділяти локальні аномалії сейсмотектонічного походження і тим самим загострює питання інформативності геомагнітного моніторингу сейсмотектонічних процесів в умовах Закарпатського прогину. У зв'язку з цим постала задача аналізу результатів багаторічних геомагнітних спостережень та оцінки інформативності методу під час вивчення сейсмотектонічних процесів у Закарпатській сейсмоактивній зоні.

Характеристика району робіт та мережа спостережень

Карпатський геодинамічний полігон з мережею сейсмічних та режимних геофізичних станцій охоплює в основному Закарпатський внутрішній прогин (рис. 1). У розрізі земної кори прогину виділяється неогеновий чохол і донеогеновий фундамент, який характеризується складною блоковою будовою. Глибина залягання донеогенового фундаменту коливається в межах від 0,7–1,1 км у південно-західній частині до 2,6–3,3 км у центральній частині прогину. Блокова структура фундаменту характеризується наявністю значних поздовжніх і поперечних диз'юнктивних порушень з вертикальним або близьким до цього падінням. Земна кора прогину має шарувато-блокову будову. Товщина кори у прогині становить ~25 км.

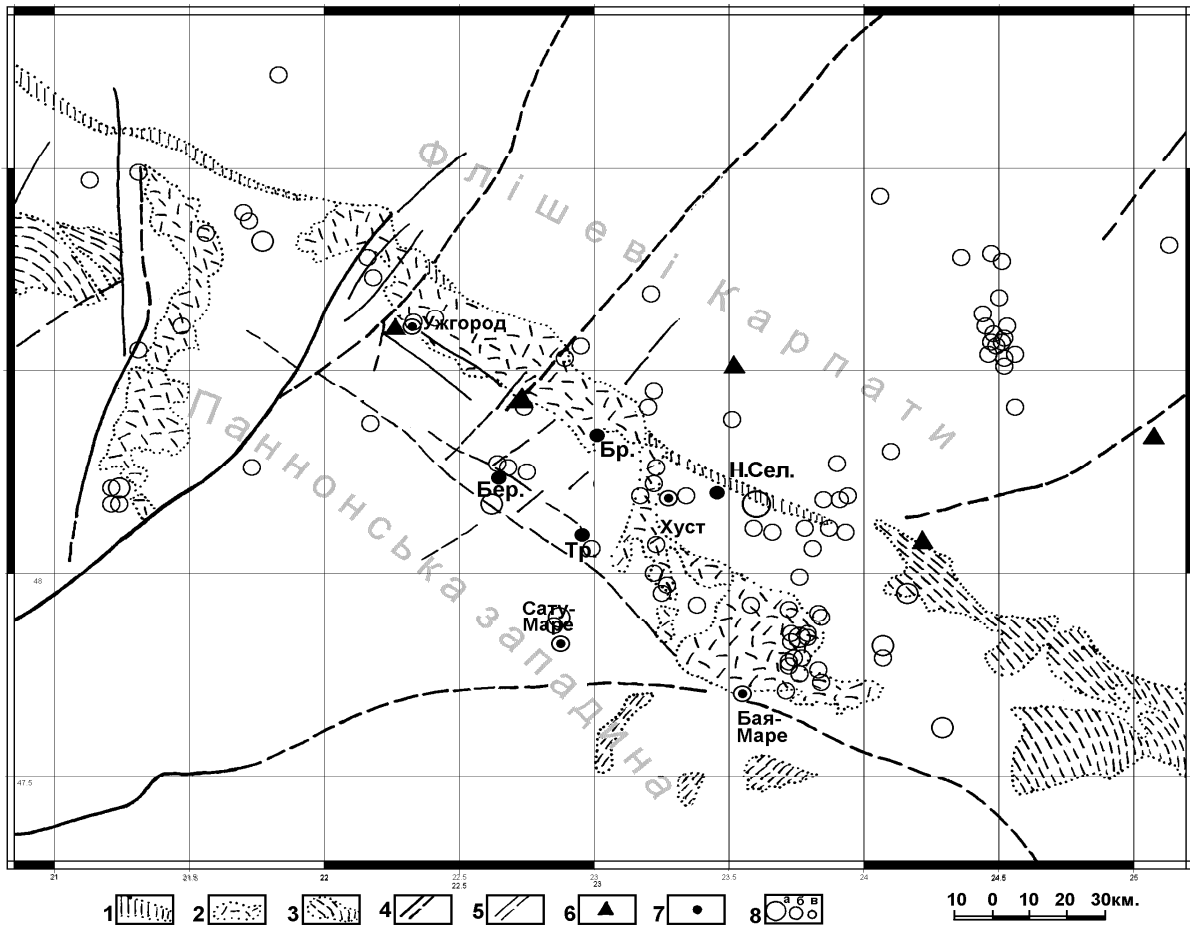


Рис. 1. Мережа геофізичних та сейсмічних станцій на Карпатському геодинамічному полігоні та сейсмічність регіону за період 2007–2010 рр.:

1 – зона Пенінських скель; 2 – вулканічні утворення; 3 – метаморфічні комплекси порід; 4 – розломи першого порядку підтверджені; можливі; 5 – розломи другого порядку підтверджені; можливі; 6 – сейсмічні станції; 7 – режимні геофізичні станції (Бр – РГС “Брід”, Н.Сел. – РГС “Н. Селище”, Тр. – РГС “Тросник”, Бер. – РГС “Берегове”); 8 – епіцентри землетрусів та їх клас: а – >9, б – 8,1-9, в – 7-8.

Геологічна основа – з “Тектонічної карти Карпато-Балканської гірської системи та прилеглих районів”, 1973 р., м-б 1: 1 000 000 за редакцією М. Магел

Основними глибинними розломами в прогині є Закарпатський і Припанонський. Закарпатський розлом розділяє Зовнішні і Внутрішні Карпати і являє собою велику шовну зону. Приуроченість до нього епіцентрів значної кількості місцевих землетрусів дає підстави вважати його основною сеймотектонічною лінією регіону. Зона Припанонського глибинного розлому складена з цілої серії припіднятих і опущених блоків і має в загальному плані горстову будову.

Через Закарпаття із Словаччини в Румунію простягається Вигорлат-Гутинське вулканічне пасмо, сформоване потоками андезито-базальтової лави і туфами.

За сейсмічним районуванням територія Закарпаття належить до 7-бальної зони за шкалою MSK-64. Щорічно тут відбувається від 2 до 25 землетрусів з $K=6\div 10$. Періоди сейсмічної активності становлять 5–10 років для подій з $K=8\div 11$, 50 років для $K=11\div 12$ і 130 років для землетрусів максимальної енергії ($K>12$). Гіпоцентри вогнищ розміщені переважно у

верхніх горизонтах земної кори на глибинах $2\div 10$ км [Кендзера, Пронишин, 2005]. Виділення аномалій – провісників землетрусів для цього регіону є непростим завданням внаслідок складної геологічної будови Закарпаття та невеликої енергії місцевих землетрусів, що не дозволяє очікувати значних ефектів у геофізичних полях.

Режимні геофізичні станції розташовані поблизу сейсмоактивних розломів та індикаторних зон, виявлених за результатами площівних тектономагнітних спостережень: РГС “Нижнє Селище” – поблизу Закарпатського глибинного розлому, РГС “Тросник” – поблизу Припанонського розлому, РГС “Берегове” – у Берегівській горстовій зоні, РГС “Брід” – на Вигорлат-Гутинському вулканічному пасмі (рис. 1).

Методика геомагнітного моніторингу основана на вивченні змін у часі різниці середньодобових значень модуля геомагнітного поля ΔT між парами режимних станцій і детально описана в [Максимчук та ін., 2001: Дослідження..., 2005].

Обчислюючи різницеве поле ΔT , відбраковують некондиційні дані з використанням методу, описаного у [Городиський та ін., 2000].

На мережі РГС використовуються протонні магнітометри МВ-01 з чутливістю 0,1 нТл. Спостереження здійснюються цілодобово з дискретністю 1 вимір на 10 хв.

Виявлення аномалій сейсмотектонічного походження є складним завданням виділення корисного сигналу на фоні завад як техногенного, так і природного походження. Про якість спостережень можна зробити висновок з результатів статистичної обробки даних за 2000–2011 рр. Середньоквадратичні відхилення σ різницевого поля ΔT для кожної пари станцій за вказаний період наведено в таблиці.

Аналіз значень середньоквадратичних відхилень показує, що величина σ різницевого поля ΔT між станціями “Нижнє Селище” (Н.С.), “Тросник” (Тр.), “Брід” (Бр.) є досить стабільною. Вона найменша для різниць $\Delta T_{Н.С.-Тр.}$ (0,35-0,53) і найбільша для $\Delta T_{Бр.-Тр.}$ (0,69-1,2). У 2010-2011 рр. виникали перебої у роботі магнітометра на РГС “Брід”, що, як видно з таблиці, відбилися на точності спостережень.

Загалом якість спостережень на РГС Карпатського геодинамічного полігона задовільна, про що свідчать графіки вікових змін поля T (рис. 2, а).

Для порівняння розглянуто особливості вікового ходу геомагнітного поля T у Карпатському регіоні та сусідніх територіях за даними магнітних обсерваторій (рис. 2, б).

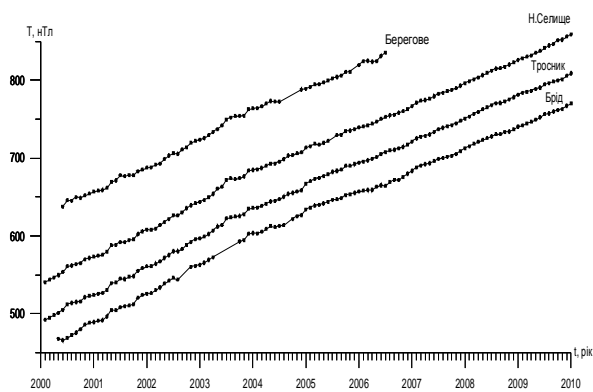
Як бачимо, віковий хід поля T на режимних станціях має таку саму тенденцію росту і градієнти, як і на найближчих обсерваторіях Львів, Гурбаново, Сурларь, Бельськ.

**Довгоперіодні часові зміни
локального магнітного поля
на Карпатському геодинамічному полігоні**

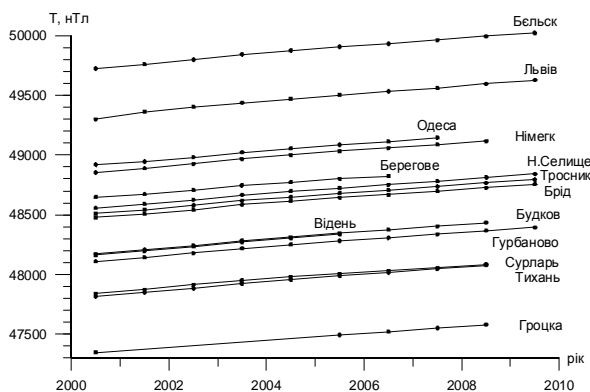
Довгоперіодні часові зміни локального магнітного поля тривалістю від одиниць до десятків років викликають значний інтерес, оскільки вони можуть бути пов’язані з катастрофічними тектонічними землетрусами, які охоплюють великі території і підготовка яких триває багато років. За доволі тривалий час геомагнітних досліджень на Карпатському геодинамічному полігоні отримано багаторічні часові ряди геомагнітних даних, за якими можна вивчати досить широкий спектр часових змін геомагнітного поля – від декількох тижнів до десяти і більше років. Часові ряди середньодекадних значень поля ΔT для різних пар РГС на Карпатському полігоні за період з 1990 по 2011 роки наведено на рис. 3.

Середньоквадратичне відхилення σ поля ΔT для різних пар станцій за 2000–2011 роки

Рік	σ , нТл					
	Н.С.-Тр.	Бр.-Тр.	Бр.-Н.С.	Бер.-Н.С.	Бер.-Тр.	Бер.-Бр.
2000	0,46	0,99	0,95	1,47	1,56	1,71
2001	0,41	0,94	0,88	1,04	0,99	1,24
2002	0,53	1,00	0,97	0,98	0,95	1,25
2003	0,37	0,92	0,88	1,47	1,38	1,51
2004	0,36	0,74	0,62	0,9	0,89	1,1
2005	0,38	0,84	0,7	0,7	0,58	0,94
2006	0,43	1,2	0,99	0,64	0,86	1,36
2007	0,42	0,94	0,82			
2008	0,42	0,96	0,75			
2009	0,38	0,69	0,84			
2010	0,35	0,89	0,99			
2011	0,39	0,98	1,01			



а



б

Рис. 2. Вікові зміни поля T на режимних геофізичних станціях Карпатського геодинамічного полігона (а) та віковий хід геомагнітного поля T на обсерваторіях Карпато-Балканського регіону (б)

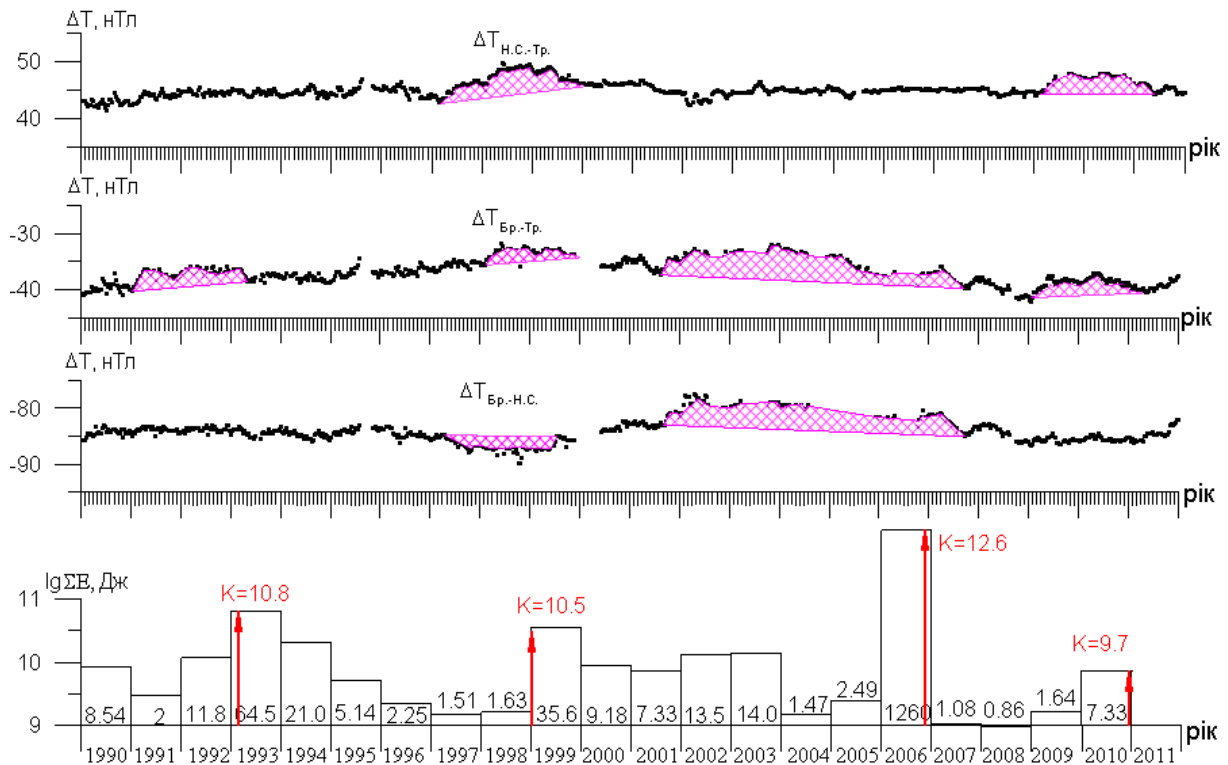


Рис. 3. Порівняння часового ходу середньодакдних значень різницевого поля ΔT між РГС Карпатського геодинамічного полігона зі змінами величини сумарної виділеної річної сейсмічної енергії ($\Sigma E \times 10^9$ Дж) Закарпаття

Зазначимо, що використання методики диференціальних геомагнітних спостережень дає змогу отримати різницеве поле ΔT , яке не містить складових, викликаних впливом варіації змінного магнітного поля. Як бачимо з рис. 3, у часових рядах ΔT досить виразно виділяються квазілінійні тренди та довготривалі коливання з різними періодами. Квазілінійний тренд у різницевому полі ΔT спостерігається на графіках $\Delta T_{\text{Бр.-Тр.}}$ і $\Delta T_{\text{Н.С.-Тр.}}$ на часовому інтервалі 1990-1997 рр. У $\Delta T_{\text{Бр.-Тр.}}$ він досяг майже 5 нТл, в $\Delta T_{\text{Н.С.-Тр.}}$ тренд не перевищує 2 нТл, а на графіку $\Delta T_{\text{Бр.-Н.С.}}$ він від'ємний, величиною близько -2 нТл.

Згаданий тренд закінчився яскравою бухтоподібною аномалією, яка проявилась на всіх кривих ΔT . Вона почала формуватись у 1996 р. і завершилась у кінці 1999 р., тобто тривала майже три роки. На графіку $\Delta T_{\text{Н.С.-Тр.}}$ її амплітуда була найбільшою – майже 5 нТл, на графіку $\Delta T_{\text{Бр.-Н.С.}}$ ця аномалія мала від'ємний знак і амплітуду до -2.5 нТл. Менш виражено, як за морфологією, так і за інтенсивністю на фоні вищезгаданого тренду, виділяється аномалія в локальних змінах поля ΔT у 1991-1992 рр. Найкраще вона проявилась на графіку $\Delta T_{\text{Бр.-Тр.}}$ (тривалість 2,5 року, амплітуда до 2 нТл).

Дещо інший характер часових змін поля ΔT спостерігаємо у другій половині розглянутого періоду – з 1999 до 2011 рр. На графіках $\Delta T_{\text{Бр.-Тр.}}$ та $\Delta T_{\text{Бр.-Н.С.}}$ можна виділити від'ємний тренд до -3 нТл, ускладнений довготривалою аномалією

ΔT . На графіку $\Delta T_{\text{Н.С.-Тр.}}$ вона спостерігалась з середини 2001 р. до середини 2007 р. з максимальною інтенсивністю 5 нТл. Майже з такими самими характеристиками вона проявилась на графіку $\Delta T_{\text{Бр.-Тр.}}$. В різницевому полі $\Delta T_{\text{Н.С.-Тр.}}$ ні зазначена аномалія, ні тренд не спостерігались. Це свідчить, що виявлені довгоперіодні зміни поля ΔT відбулись на РГС "Брід". До переліку довготривалих зарахуємо також аномальні зміни поля, які проявились на графіку $\Delta T_{\text{Н.С.-Тр.}}$ у 2009-2011 рр. з амплітудою до 3 нТл.

Якщо порівняти ряди ΔT з місцевою сейсмічністю, помітні деякі цікаві особливості, які можуть свідчити про зв'язок варіацій магнітного поля з місцевими землетрусами. За весь розглянутий 20-річний період у Закарпатській сейсмоактивній зоні відбулись лише чотири відчутних землетруси: 1 – 1.03.1993 р. ($K = 10,8$, Словацькі Бескиди), 2 – 04.01.1999 р. ($K = 10,5$, Північна Румунія, м. Холмеу), 3 – 23.11.2006 р. ($K = 12,6$, м. Берегове), 4 – 14.12.2010 р. ($K = 9,7$, с. Угтя). Як бачимо з рис. 3, всі виділені довготривалі аномальні зміни різницевого поля ΔT на РГС Карпатського полігона корелюють у часі з названими землетрусами.

Землетрус з епіцентром у Словацьких Бескидах 1.03.1993 р. відбувся на завершальній фазі аномальних змін поля $\Delta T_{\text{Бр.-Тр.}}$. Подібною є ситуація у 1997-1999 рр. Момент землетрусу 4.01.1999 р. в м. Холмеу ($M=3,5$, $K=10,5$) збігався у часі з екс-

тремумом бухтоподібної аномалії ΔT , після чого поле поступово повертається до вихідного рівня. Довготривала аномалія ΔT у 2001–2007 рр. завершується найсильнішим за розглянутий 20-річний період землетрусом у м. Берегове (23.11.2006 р., $K=12,6$, $M=3,9$). На завершальній фазі часових змін поля $\Delta T_{\text{Н.С.-Тр}}$ 2009–2010 рр. відбувся відчутний землетрус у зоні Закарпатського розлому (с. Угля, 10.12.2010 р., $M=3,2$).

Складнішою є ситуація з просторовим зв'язком виявлених аномальних ефектів в полі ΔT з місцевими землетрусами. У випадку аномалії ΔT у 1999 р. можна припустити прояви процесів підготовки землетрусу 04.01.1999 р. (м. Холмеу) на всіх РГС при максимальному (від'ємному) ефекті на РГС "Тросник". Відстані від епіцентра цього землетрусу до РГС такі: РГС "Тросник" – 28 км, РГС "Н.Селище" – 51 км, РГС "Брід" – 55 км. Землетрус поблизу м. Берегове 23.11.2006 р. найбільше проявився на РГС "Брід", розташований на відстані 32 км від епіцентра. Дещо іншою є ситуація з аномалією ΔT у 2009–2011 рр. Найближче до епіцентра землетрусу 14.12.2010 р. розташована РГС "Н.Селище" (14 км). Однак ця аномалія ΔT найконтрастніше проявилась у різницевому полі $\Delta T_{\text{Н.С.-Тр}}$ (2 нТл), дещо слабше – у $\Delta T_{\text{Бр.-Тр}}$ і зовсім відсутня у $\Delta T_{\text{Бр.-Н.С.}}$. Однак, через специфіку використання різницевого методу, не можна виключити, що ефект від цього землетрусу проявився однаково на РГС "Н.Селище" і РГС "Брід", які розташовані поблизу Закарпатського розлому, в межах якого і відбувся зазначений землетрус. Це ще раз свідчить про необхідність розширення мережі режимних геомагнітних спостережень у Закарпатській сейсмоактивній зоні, що підвищить коректність та однозначність у просторово-часовій інтерпретації тектономагнітних аномалій.

Про можливий зв'язок виявлених довготривалих змін ΔT із сейсмічним режимом свідчать також результати порівняння часових рядів ΔT з графіком сумарної енергії, що виділялась щорічно в межах Закарпатського прогину (рис. 3). Так, аномалія перед землетрусом 4.01.1999 р. (м. Холмеу) частково збігається з періодом сейсмічного затишшя у 1995–1998 р. Період сейсмічного затишшя спостерігався також упродовж 2004–2005 рр. перед Берегівським землетрусом 23.11.2006 р. Подібну ситуацію спостерігаємо і перед Углянським землетрусом 14.12.2010 р., коли у Закарпатті з 2007 до 2009 р. також відзначалось сейсмічне затишшя, яке супроводжувалось аномалією ΔT у 2009–2011 р. і завершилось землетрусом 14.12.2010 р.

Враховуючи, що ймовірний час прояву провісників для землетрусів з магнітудою 4–5 не повинен перевищувати 1 рік [Абдуллабеков, 1989], а також невеликий (до 30 км) радіус прояву геомагнітних провісників, виділені аномальні ефекти не можна розглядати, очевидно, як безпосередні провісники вказаних землетрусів. На нашу думку, є більше підстав вважати їх реакцією геологічного середовища в масштабах всієї Закарпатської сейсмоактивної зони на тектонічні процеси регіонального характеру.

Як моделі для інтерпретації виявлених тектономагнітних ефектів ми розглядаємо моделі п'єзомагнітного та електрокінетичного ефектів, запропоновані раніше для інтерпретації геомагнітних ефектів перед землетрусами у Закарпатській сейсмоактивній зоні [Кузнецова та ін, 2005]. Як джерело та індикатор п'єзомагнітного ефекту розглядався масив магматичних утворень Вигорлат-Гутинського вулканічного пасма (рис. 4).

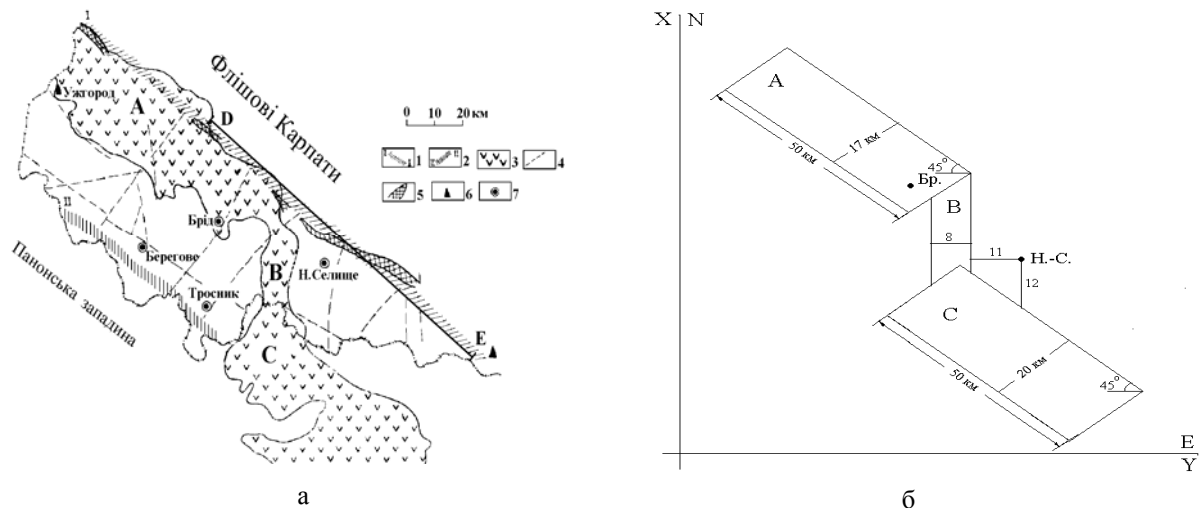


Рис. 4. Схема розташування вулканічних утворень у Закарпатському внутрішньому прогині [Глевасская, 1983] (а) та плановий вид моделі магнітної неоднорідності (б):

1 – Закарпатський глибинний розлом; 2 – Припанонський глибинний розлом; 3 – Вигорлат-Гутинське вулканічне пасмо; 4 – розломи донеогенового фундаменту; 5 – Пенінська зона; 6 – сейсмічні станції; 7 – режимні геофізичні станції; D-E – розрахунковий профіль

Розташування модельних блоків А, В, С в основному відповідає розташуванню трьох ділянок-блоків Вигорлат-Гутинського пасма (рис. 4). Глибини верхніх кромки моделі 100–200 м, нижніх – 1–1,2 км. Намагніченості від 0,5 до 1,2 А/м. Для блоків А і С задані протилежні напрямки намагніченості на різних глибинах.

Проведені обчислення показали, що чітко виражена аномалія в різниці $\Delta T_{\text{н.с.-тр.}}$, яка повністю збігалася з періодом сейсмічного затишшя, може бути викликана змінами намагніченості у блоці С внаслідок змін напружень у цьому блоці на 50 Бар.

П'єзомагнітним механізмом пояснюються також довготривалі аномальні зміни геомагнітного поля на РГС "Брід" перед землетрусом 2006 р.

Як можливе джерело часових змін геомагнітного поля електродинамічної природи розглянуто зону Закарпатського глибинного розлому [Городиський, Климкович, 2008]. Інтерпретація спостережених аномальних змін геомагнітного поля проводилася з використанням моделі вертикального контакту, яка добре описує активні зони розломів. За цією моделлю розраховано можливі величини часових змін локального геомагнітного поля (ΔT) провісничового типу (рис. 5) вздовж Закарпатського глибинного розлому по профілю D–E (рис. 4, а).

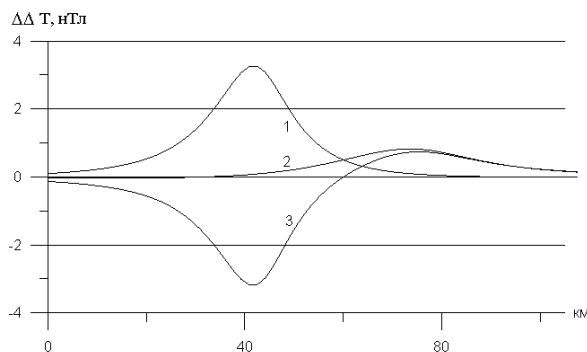


Рис. 5. Розрахована величина часових змін локального геомагнітного поля провісничового типу вздовж профілю D–E (див. рис. 4):

1 – $\Delta T_{\text{н.с.-тр.}}$; 2 – $\Delta T_{\text{бр.-н.с.}}$; 3 – $\Delta T_{\text{бр.-тр.}}$.

Згідно з цією моделлю, магнітний ефект від землетрусів у зоні Закарпатського розлому в районі с. Угля максимальним очікується у різниці $\Delta T_{\text{н.с.-тр.}}$ з амплітудою до 2 нТл, що відповідає даним експериментальних спостережень у 2010 р.

Короткоперіодні локальні зміни аномального геомагнітного поля та їх просторово-часовий зв'язок з сейсмічністю

Окрім довготривалих часових змін локального магнітного поля в часових рядах ΔT на РГС Карпатського полігона, виділяються бухтоподібні аномалії тривалістю від декількох тижнів до декількох місяців, а також знакозмінні аномалії, різкі зміни рівня поля з його поступовим відновленням, ділянки підвищеної дисперсії поля. Для їх надійного виді-

лення використано кореляційні методи аналізу: метод синус-кореляції, кореляція різницевого ряду з прямою, виявлення ділянок графіків поля з підвищеною дисперсією та інші [Городиський та ін., 2002]. Це дало змогу виділити за період 2000–2010 рр. 88 геомагнітних ефектів. При цьому аномальними вважалися лише часові зміни поля, амплітуда яких більш ніж у два рази перевищувала середньорічні середньоквадратичні похибки різницевого поля ΔT між станціями.

Важливим етапом аналізу та інтерпретації часових змін локального магнітного поля є встановлення їх просторово-часового зв'язку із землетрусами. За розглянутий період (2000–2010 рр.) в Закарпатській сейсмоактивній зоні та на прилеглих територіях зареєстровано 678 землетрусів з $K=6\div 10$ та епіцентральною відстанями від 10 до 160 км від найближчої РГС [Сейсмологический..., 2002–2011]. Оскільки апріорна інформація про те, що та чи інша аномалія викликана конкретним землетрусом, як правило, відсутня, це ускладнює пошуки взаємозв'язку часових змін поля ΔT з сейсмічністю. Тому для відбору сейсмічних подій використовують емпіричні залежності між магнітудою землетрусу, радіусом прояву провісників та їх тривалістю в часі.

Зокрема, на Гармському полігоні в Середній Азії отримано емпіричну залежність між магнітудою землетрусів M і відстанню R до найвіддаленішого пункту, в якому виникає варіація магнітного поля у вигляді [Сковородкин, 1985]:

$$\lg R = 0,35M + 0,04. \quad (1)$$

Для Ашхабадського сейсмоактивного району встановлено дещо іншу емпіричну залежність [Авагимов и др., 1986]:

$$\lg R = 0,45M - 0,57. \quad (2)$$

Для Закарпатської сейсмоактивної зони немає достатньої статистики для отримання подібних емпіричних залежностей, тому ми користуємось формулами (1) та (2), беручи до уваги, що у Закарпатті дуже поширені вулканічні породи з високими значеннями магнітних параметрів, що дає підставу очікувати відчутних аномальних ефектів у геомагнітному полі за менших тектонічних напружень.

Під час аналізу просторово-часового зв'язку аномальних ефектів з сейсмічністю частину землетрусів ми вилучили з розгляду за формальною ознакою – співвідношенням магнітуди сейсмічної події та відстані від епіцентра до найближчої РГС з врахуванням наявності даних спостережень. Оскільки Закарпаття є техногенно навантаженим регіоном з великою кількістю кар'єрів, каталоги нерідко містять події не тектонічного походження [Вербицький та ін, 2011]. Такі виявлені події теж не розглядалися. У результаті для розгляду відібрано 117 подій, які відбулися впродовж 2000–2010 рр. З них 24 події (20,5 %) не збігалися у часі з аномаліями у різницевого полі. Частина подій (20 подій, 17,1 %) збігалась з аномальними ефектами лише формально. Наприклад, епіцентр землетрусу 27.05.2002 р. був розміщений поблизу

РГС “Тросник”, а аномалія спостерігалася на РГС “Н.Селище”. Найбільша частина подій (43 події, 36,75 %) при виділенні методом синус-кореляції з високими коефіцієнтами кореляції збігаються з аномаліями, які відповідають просторовим та часовим критеріям відбору, але не є репрезентативними внаслідок їх невеликих амплітуд (від 1 до 2 середньоквадратичних відхилень за рік). Із всієї сукупності лише 30 землетрусів (25,64 %) збігались в часі з виділеними аномаліями, які задовольняють усі критерії: високий коефіцієнт кореляції ($|\rho| > 0,7$), просторова та часова відповідність, достатньо велика амплітуда. В основному це були землетруси з магнітудою $M < 3$.

Дещо детальніше зупинимось на часових змінах геомагнітного поля перед землетрусом в с. Угля 14.12.2010 р. з $M=3,3$. Епіцентр Углянського землетрусу був на відстані 11 км від РГС “Н.Селище”, в зоні Закарпатського глибинного розлому. Перед цим землетрусом у часовому ряді $\Delta T_{H.C.-Tp.}$ (рис. 6) спостерігається локальна аномалія величиною до 2.5 нТл і тривалістю 6 місяців.

Момент землетрусу при цьому припав на фазу відновлення поля ΔT . Водночас на графіку середньодадних значень $\Delta T_{H.C.-Tp.}$ (рис. 3) впевнено виділяється аномалія тривалістю майже 2,5 року (2009–2011 рр.) і амплітудою до 3 нТл. Отже, вказані короткоперіодні зміни ΔT проявились на завершальній фазі довгоперіодної аномалії ΔT .

Окрім зазначених вище часових змін поля ΔT , ймовірно, сейсмотектонічного походження, в рядах ΔT також виділяються аномальні ефекти, які за своїми морфологічними ознаками нагадують аномалії провісничого типу, але не мають просторово-часового зв'язку із землетрусами. Це ефекти сезонного характеру, спостерігаються переважно весною в період танення снігів і корелюють з рівнем ґрунтових вод. Їх тривалість становить 70–110 діб, а інтенсивність близько 2 нТл (рис. 7, а).

Як бачимо, зміни поля $\Delta T_{H.C.-Tp.}$ у лютому – березні 2001 р. корелюють з рівнем води на РГС “Тросник”, коливання якого становило у цей період близько 100 см.

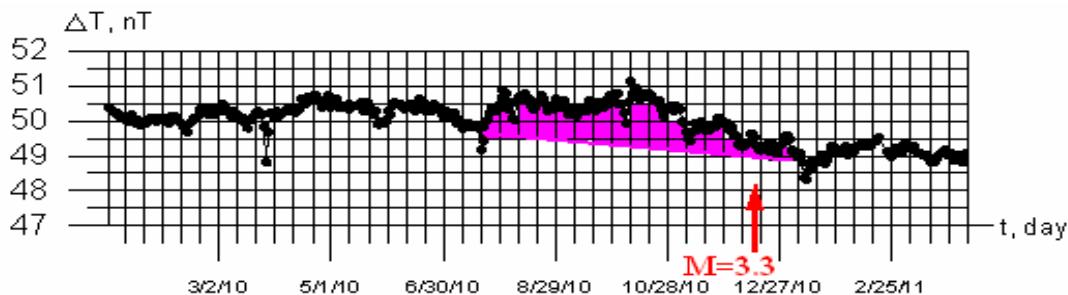


Рис. 6. Часовий ряд $\Delta T_{H.C.-Tp.}$ (2010–2011 рр.) з виділеною аномалією (стрілкою позначено момент Углянського (14.12.2010 р.) землетрусу)

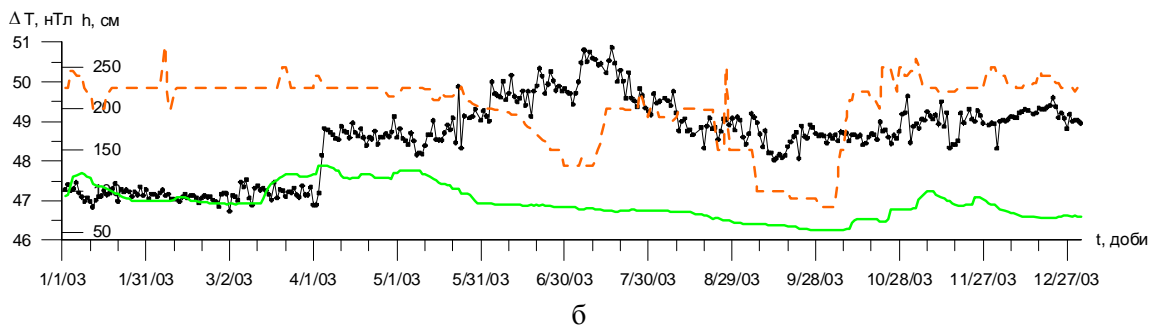
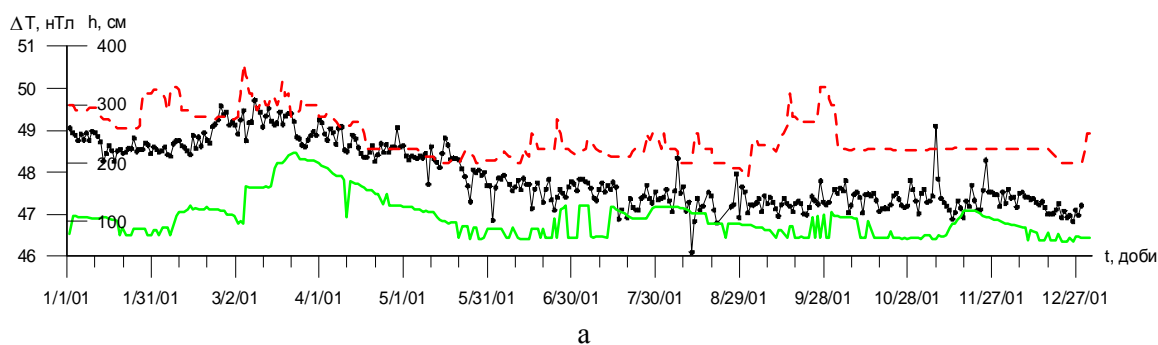


Рис. 7. Поле $\Delta T_{H.C.-Tp.}$ (лінія з точками) та рівень води на РГС “Тросник” (суцільна лінія) і РГС “Н. Селище” (пунктирна лінія): а – 2001 р.; б – 2003 р.

Цікаво зазначити, що кореляція $\Delta T_{\text{H.C.-Tp.}}$ з рівнем ґрунтових вод спостерігається також в інші періоди року. Зокрема, у травні–серпні 2003 р. зміни $\Delta T_{\text{H.C.-Tp.}}$ корелюють з інтенсивними змінами рівня ґрунтових вод на РГС “Н.Селище” (рис. 7, б). У цей час на РГС “Тросник” рівень ґрунтових вод майже не змінювався.

Наявність такого типу аномальних змін магнітного поля вказує на необхідність врахування даних про коливання рівня ґрунтових вод під час аналізу аномальних часових змін ΔT та здійснення відповідного відбракування геомагнітних ефектів. Проте питання взаємозв'язку бухтоподібних змін локального магнітного поля зі змінами рівня ґрунтових вод потребує детальніших досліджень.

Обговорення результатів та висновки

Накопичений багаторічний досвід, а також отримані результати тектономагнітних досліджень у Закарпатській сейсмоактивній зоні дозволяють зробити певні висновки стосовно інформативності геомагнітного методу для вивчення регіонального сейсмотектонічного процесу та виявлення провісників місцевих землетрусів. Результати проведених досліджень показали, що, незважаючи на невисоку сейсмічність району робіт, виявлені часові зміни локального магнітного поля досягають переважно 3–5 нТл, тобто за амплітудними та морфологічними особливостями є співмірними з геомагнітними ефектами, виявленими в інших регіонах світу перед сильними землетрусами. Проведений аналіз зв'язків аномалій ΔT з місцевою сейсмічністю свідчить про їх досить тісний зв'язок із землетрусами з енергетичним класом $K > 8$. Для переважної більшості сейсмічних подій, відібраних з урахуванням емпіричних залежностей між радіусом прояву землетрусу та його магнітудою, спостерігається просторово-часовий зв'язок. Водночас найбільш впевнено аномальні часові зміни поля виявлено перед місцевим землетрусом з магнітудою $M \geq 3$. Це дає підстави стверджувати, що сучасна мережа РГС у Закарпатті з відстаннями між станціями близько 50 км є оптимальною для виявлення геомагнітних ефектів від землетрусів з магнітудою $M \geq 3$. Також очевидно, що мережу РГС треба розширити як у північно-західному (Чоп – Мукачеве – Ужгород), так і у південно-східному (Солотвино – Рахів) напрямках.

Виявлені часові зміни локального магнітного поля у Закарпатській сейсмоактивній зоні поділяються на такі типи:

1. Квазілінійні довготривалі тренди, природа яких, ймовірно, пов'язана з сейсмотектонічними процесами в земній корі.
2. Довгоперіодні зміни різницевого магнітного поля (2–5 років) інтенсивністю у 3–5 нТл, які корелюють із сейсмічним режимом та відображають зміни тектонічних напружень у земній корі на регіональному рівні перед відчутними місцевими землетрусами.

3. Епізодичні короткотривалі зміни різницевого магнітного поля (від 1–2 тижнів до 2–5 місяців) амплітудою 2–3 нТл, які проявляються на окремих РГС, корелюють з сейсмічними подіями і, можливо, спричинені їх підготовкою.

4. Аномальні ефекти, зумовлені метеофакторами, інтенсивністю до 3 нТл, за морфологією і тривалістю аналогічні до аномалій, викликаних геотектонічними процесами.

Виявлені тектономагнітні аномалії пов'язані з реакцією геологічного середовища на зміни тектонічних напружень у регіоні. Їх джерелом, ймовірно, є Вигорлат-Гутинське вулканічне пасмо (п'єзомагнітний механізм) а також Закарпатський та Припанонський глибинні розломи, в зонах яких реалізується електрокінетичний механізм генерації часових змін геомагнітного поля.

Отримані результати свідчать про певну інформативність тектономагнітного методу стосовно вивчення сейсмотектонічних процесів у Закарпатській сейсмоактивній зоні. До інформативних ознак, отриманих за даними геомагнітного моніторингу, зарахуємо:

- наявність тектономагнітних аномалій з певними характерними особливостями: морфологією, тривалістю та інтенсивністю;
- закономірності просторово-часових зв'язків часових змін локального магнітного поля з місцевою сейсмічністю.

Підсумовуючи отримані результати багаторічних тектономагнітних досліджень у Закарпатській сейсмоактивній зоні, зазначимо, що метод в існуючому апаратурно-методичному забезпеченні ще себе не вичерпав. Однак, щоб отримати якісно нові результати та підвищити інформативність, необхідно модернізувати комплекс магнітометричної апаратури з переходом на компонентні високоточні геомагнітні спостереження, розширити мережу та виконувати комплексування з іншими геофізичними методами.

Література

- Абдуллабеков К.Н., Головков В.П. Электромагнитные явления в земной коре. – Ташкент: ФАН, 1989. – 232 с.
- Авагимов А.А., Атаев А.К., Жуков В.С., Лагутинская Л.П., Сатурян В.А. Локальные вариации геомагнитного поля токовой природы // Прогноз землетрясений. – Душанбе–Москва: Дошиш. – 1986. – № 7. – С. 181–185.
- Вербицкий Ю.Т., Гнип А.Р., Нарівна М.М., Новотна О.М., Ярема І.І. Утожднення вибухів у Карпатському регіоні України за ознакою схожості їхніх хвильових форм // Геодинаміка. – 2011. – № 1(10) – С. 103–109.
- Глевасская А.М. Магнитные минералы и магнетизм вулканитов. – Киев: Наук. думка, 1983. – 208 с.
- Городиський Ю.М., Климкович Т.А. Аналіз зв'язків локальних аномальних змін геомагнітного поля з землетрусами в зоні Закарпатського глибинного розлому // Геодинаміка. – 2008. – № 1(7). – С. 89–95.

- Городиський Ю.М., Струк Є.С., Климкович Т.А. Деякі кореляційні методи виділення малоамплітудних геомагнітних аномалій // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології. – 2002. – № 413. – С. 155–161.
- Городиський Ю.М., Струк Є.С., Климкович Т.А. Метод сортування часових рядів з помітною кількістю некондиційних даних // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології. – 2000. – № 392. – С. 141–145.
- Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. – Королев: ЦНИИМаш, 2007. – 160 с.
- Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат / за ред. В.І. Старостенка. – Київ: Наук. думка, 2005. – 256 с.
- Карпатський геодинамічний полігон / под ред. Я.С. Подстригача, А.В. Чекунова – М.: Сов. радио, 1978. – 126 с.
- Кендзера О.В., Пронишин Р.С. Сейсмічність Українських Карпат // В кн.: "Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат" / за ред. В.І. Старостенка. – Київ: Наук. думка, 2005. – С. 69–80.
- Климкович Т.А. Особливості часових змін аномального магнітного поля та векторів індукції у Закарпатському сейсмоактивному прогині: автореф. дис... канд фіз.-мат. наук. – Київ: ІГФ НАНУ, 2009. – 21 с.
- Кузнецова В.Г., Максимчук В.Ю., Городиський Ю.М., Климкович Т.А. Изучение связи аномальных эффектов в геомагнитном поле с сейсмическим режимом Карпат // Физика Земли. – 2005. – № 3. – С. 61–67.
- Кузнецова В.Г., Лебедович В.И. О некоторых вопросах методики геомагнитных сейсмопрогностических исследований // Исследование геодинамических процессов и предвестников землетрясений на территории УССР. – Киев: Наук. думка. – 1989. – С. 79–85.
- Кузнецова В.Г., Максимчук В.Е., Дембицкий Е.П., Лебедович В.И., Павлюк В.А. Итоги сейсмопрогностических исследований в Закарпатье за 1981-1985 гг. // Сейсмопрогностические исследования на территории УССР. – Киев: Наук. думка. – 1988. – С. 50–61.
- Максимчук В., Городиський Ю., Кузнецова В. Динаміка аномального магнітного поля Землі. – Львів: Євровіт, 2001. – 306 с.
- Рикитак Т. Предсказание землетрясений. – М.: Мир, 1979. – 388 с.
- Сейсмологический бюллетень Украины за 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 г. / ред. Б.Г. Пустовитенко. – Севастополь: НПЦ "Эко-си-Гидрофизика". – 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2011. – 166 с., 205 с., 295 с., 143 с., 251 с., 249 с., 199 с.
- Сейсмологический бюллетень Украины за 2000, 2001, 2002, 2003 год / ред. Б.Г. Пустовитенко – Симферополь: ИГФ НАНУ. – 2002, 2003, 2004, 2005. – 106 с., 136 с., 132 с., 132 с.
- Сквородкин Ю.П. Изучение тектонических процессов методами магнитометрии. – М.: ИФЗ АН СССР, 1985. – 197 с.

ИНФОРМАТИВНОСТЬ ГЕОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА В ЗАКАРПАТСКОЙ СЕЙСМОАКТИВНОЙ ЗОНЕ

В.Е. Максимчук, Т.А. Климкович, В.Г. Кузнецова, И.И. Ярема

Приведены результаты геомагнитного мониторинга при исследовании сеймотектонических процессов в Закарпатской сейсмоактивной зоне. Выявлены тектономагнитные аномалии разной продолжительности и интенсивности и установлена их пространственно-временная связь с сейсмическими событиями. Сделан вывод об информативности применения геомагнитного мониторинга в Закарпатской сейсмоактивной зоне для выявления предвестников местных землетрясений с магнитудой $M > 3$ (при существующей сети) в геолого-геофизических условиях Закарпатского прогиба.

Ключевые слова: мониторинг; предвестники землетрясений; тектономагнитная аномалия.

INFORMATIVITY OF GEOMAGNETIC MONITORING IN THE TRANSCARPATHIAN ACTIVE SEISMIC ZONE

V.Yu. Maksymchuk, T.A. Klymkovych, V.G. Kuznetsova, I.I. Yarema

The results of geomagnetic monitoring during investigations of seismic-tectonic processes in the in the Transcarpathian active seismic zone are shown. Tectonic-magnetic anomalies with different duration and intensity were detected. Connection of their spatial-temporal features with seismic events was defined. The conclusion about the informativity of geomagnetic monitoring in the Transcarpathian active seismic zone for definition of local earthquakes precursors (with $M > 3$ magnitude in existing network) in the geological-geophysics conditions of the Transcarpathians trough was done.

Key words: monitoring; earthquake precursors; tectono-magnetic anomalies.

¹Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, м. Львів

²Відділ сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, м. Львів